

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**RAFAEL RICARDO AVILA NARANJO**

**ESTUDO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA TURBINAS  
EÓLICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.**

**São Paulo – SP**  
**2011**

**RAFAEL RICARDO AVILA NARANJO**

**ESTUDO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA TURBINAS  
EÓLICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.**

Projeto de formatura apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Graduados em Engenharia

**São Paulo – SP**

**2011**

**RAFAEL RICARDO AVILA NARANJO**

**ESTUDO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA TURBINAS  
EÓLICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.**

Projeto de formatura apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Graduados em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia de Energia e Automação  
Elétrica

Orientador: Prof. Doutor Mauricio B.  
de C. Salles

**São Paulo – SP**

**2011**

FICHA CATALOGRÁFICA

M 2011 A

Naranjo, Rafael Avila. Estudo de sistemas de aterramento para turbinas eólicas pelo método dos elementos finitos. Naranjo, R.R. -- São Paulo, 2011. 123p. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. 1. Sistemas de aterramento 2. Proteção de sistemas elétricos 3. Sistemas elétricos de potência I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. t.

PS1

SYSNO : 2191780.

## RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo do comportamento de diferentes sistemas de aterramento de turbinas eólicas ante descargas atmosféricas na torre. Foi avaliada a energia que seria transferida a uma pessoa posicionada nos pontos de maior diferença de potencial para diferentes tipos de descarga com o fim de avaliar a validade das recomendações do roteiro técnico IEC 61400 – 24 parte 24 para a proteção dos seres humanos. Como metodologia para a solução das equações diferenciais que descrevem o fenômeno elétrico foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF), uma ferramenta poderosa para a simulação de sistemas que apresentam geometrias complexas.

Palavras-chave: Sistemas de aterramento. Turbinas eólicas. Energia suportável. Norma IEC-61400.

## RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de un estudio del comportamiento de diferentes sistemas de puesta a tierra de turbinas eólicas ante descargas atmosféricas en la torre. Fue evaluado el valor de energía que sería transferido a una persona posicionada en los puntos de mayor diferencia de potencial para diferentes tipos de descarga con el fin de evaluar la validez de las recomendaciones del reporte técnico IEC 61400 – 24 parte 24 para la protección de los seres humanos. Como metodología para la solución de las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno eléctrico fue utilizado el método de los elementos finitos (MEF), una herramienta poderosa para la simulación de sistemas que presentan geometrías complejas.

Palabras clave: Sistemas de puesta a tierra. Turbinas eólicas. Energía soportable .  
Norma IEC - 61400

## SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Justificativa.....	2
2. MARCO TEORICO.....	3
2.1 Descargas elétricas atmosféricas. ....	3
2.2 Desenho das turbinas eólicas... ..	4
2.3 Sistemas de terminação em terra.....	6
2.4 Normatividade existente para a proteção antes descargas atmosféricas.....	7
2.4.1 Roteiro técnico IEC/TR 61400 – 24.....	8
2.4.2 Standard IEEE 80.....	11
2.5 O solo.....	13
2.6 Método dos elementos finitos.....	16
4. PROCESSO DE SIMULAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	22
5. CÁLCULOS DOS VALORES DE ENERGIA TRANSFERIDA.....	31
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	39
3. CONCLUSÃO.....	47
3. BIBLIOGRAFIA.....	48

# **1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

## **1.1 Introdução**

O uso da energia eólica para a produção de energia elétrica experimentou um crescimento importante nos últimos anos, chegando atualmente a uma taxa de crescimento anual de 25 a 30%, com instalações de uma alta capacidade de geração (superando os 10000MW nos Estados Unidos) conforma a informação da American Wind Energy Association[1]. Defensores de esta tecnologia de geração prognosticam que poderia chegar a prover 10% da energia elétrica requeria pelo mundo para 2017.

Como toda instalação de geração de energia, as turbinas eólicas se encontram expostas a diferentes condições de falha, que si não são controladas corretamente, podem chegar a diminuir a qualidade do serviço prestado e ate por numa condição de risco a pessoas e equipe situado dentro ou na proximidade da instalação. Dois dos causantes mais freqüentes das já mencionadas condições de falha são as descargas elétrica atmosféricas e os curtos circuitos dentro do sistema de geração, sendo preciso realizar uma descrição das características de esses fenômenos ao apresentar-se nos sistemas de geração eólica.

## **1.2 Objetivos**

Avaliar pelo método dos elementos finitos o sistema de aterramento de turbinas eólicas e de possíveis modificações em sua configuração, visando diminuir as tensões de toque e de passo, bem como a máxima tensão de solo próxima a área de instalação da turbina.



### **1.3 Justificativa**

O numero de turbinas eólicas instaladas na America do Sul aumentará consideravelmente nos próximos anos, sendo que poucos estudos relacionados a esta aera podem ser encontrados na literatura. Por tanto, por esse motivo e pelo quadro já citado na introdução, este trabalho apresenta forte motivação para seu desenvolvimento. Além disso, o LMAG possui larga experiência na área de aterramento e, mais recentemente, na área de turbinas eólicas, apresentando neste tema a oportunidade de integração destas duas áreas.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 Descargas eléctricas atmosféricas**

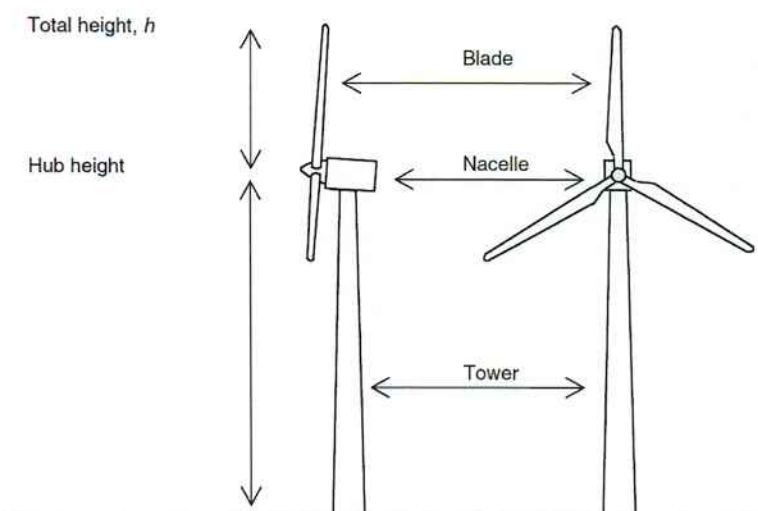
Graças a diferentes estudos, se estabeleceu que uma grande parte das regiões com um alto potencial eólico coincidem com regiões que apresentam uma atividade de tormenta elétrica considerável. Um desses estudos foi realizado pela NASA, entregando como conclusão geral que a maioria das regiões onde a densidade de ventos é alta, se apresentam 30 ou mais dias de tormenta elétrica por ano [2]. Entre 1992 e 1995 Alemanha reportou 393 incidentes de danos a turbinas eólicas causados por descargas eléctricas atmosféricas (124 descargas diretas à turbina e o resto a través da rede de distribuição eléctrica)[3]. Em outro estudo realizado pelo National Renewable Energy Association em 2002, foram apresentadas estadísticas que indicam que em 8 de cada 100 turbinas eólicas, pode se esperar receber uma descarga eléctrica direta cada ano[4].

Normalmente a superfície da terra se encontra carregada negativamente com respeito à atmosfera. Porém, com o passo de uma nuvem de tormenta, as cargas negativas no fundo da nuvem ocasionam uma acumulação de cargas positivas sobre a superfície da terra ao redor da tormenta. Esta carga positiva se concentra então em objetos verticais tais como arvores e edificações de grande altura, e a partir de ditos objetos são geradas pequenas descargas que tentam alcançar a carga negativa que desce da nuvem a través de um processo de descarga similar. O fenômeno conhecido como raio ocorre quando a carga negativa da nuvem alcança a carga positiva acumulada num objeto na terra. Sempre que a carga de um raio se propague em direção à terra deve existir um “ponto de junção” que é o origem da descarga ascendente. As turbinas eólicas são excelentes pontos de junção já que estão freqüentemente localizadas em regiões descobertas e são significativamente maiores que os objetos adjacentes. Quando qualquer parte da turbina é impactada pelo raio se converte em parte do caminho de descarga do raio. Desde o ponto de junção

ate o solo, a corrente do raio fluirá principalmente pelo caminho de menor impedância possível [5].

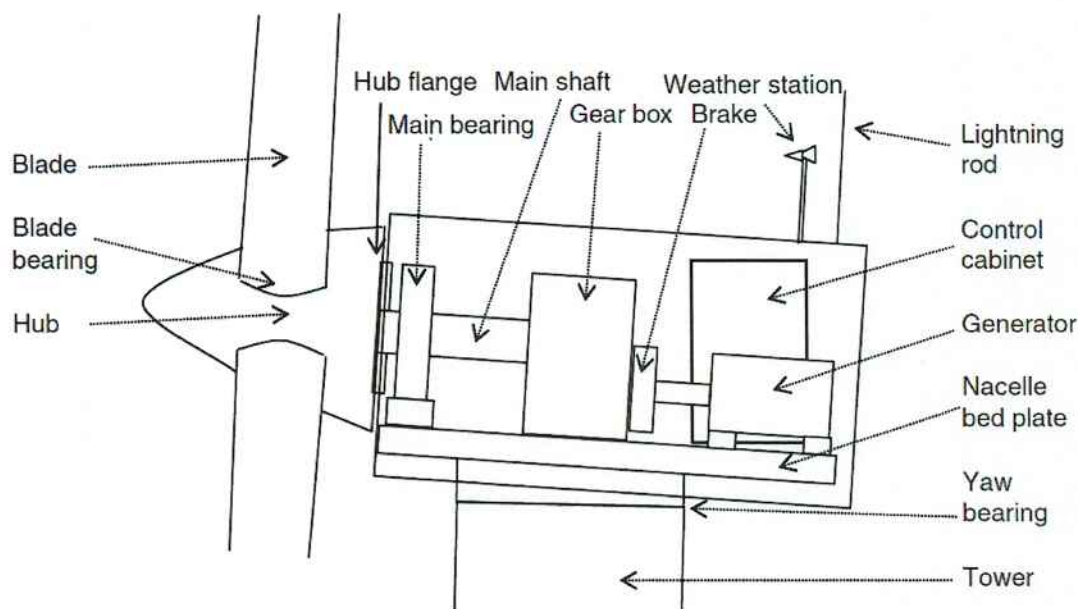
## 2.2 Desenho das turbinas eólicas

O desenho predominante para turbinas eólicas na atualidade é a turbina de eixo horizontal de três pás com torre tubular, como se mostra na figura 1. Os principais componentes da nacela da turbina são mostrados de uma forma geral na figura 2. Além de estes, um numero grande de componentes menores tais como sensores, motores, bombas e mais, estão localizados também na nacela. Em turbinas eólicas com potencias ate 3MW o gerador trabalha na maioria dos casos a uma baixa tensão (a tensão do estator é inferior a 1KV) e um transformador é usado para elevar a tensão a os valores da rede elétrica à que estará conectado. A maioria das turbinas eólicas de grande tamanho tem o transformador localizado dentro da nacela ou dentro da torre, e conectado à rede a través de um Switch Gear situado usualmente no fundo da torre. Alternativamente, o transformador pode estar localizado num cubículo perto da turbina.



**Figura 1** – Componentes fundamentais da turbina eólica

As turbinas eólicas estão compostas geralmente por três estruturas metálicas de grande tamanho como são: o cubo, a placa de suporte da nacela e a torre. Algumas nacelas usam placas metálicas como cobertura e outras usam uma cobertura de fibra de vidro montada sobre uma armação metálica.



**Figura 2** – Componentes fundamentais da turbina eólica

Estes componentes metálicos de grande tamanho devem ser usados tanto quanto seja possível para shielding, equipotencialização e aterramento, provendo assim a melhor “coluna vertebral” possível para o sistema de proteção contra raios. Esta idéia concorda com o proposto no standard IEC 62305 e IEC 60364 os quais permitem o uso dos componentes metálicos de grande tamanho como parte do sistema de aterramento e requerem uma união equipotencial com o sistema de aterramento das partes metálicas que não estão sendo usadas. Assim, o principal caminho a terra da turbina deve ser a traves do cubo, a estrutura da nacela e a torre, o que significa que a corrente de raio fluirá por ditos elementos para chegar finalmente ate os eletrodos de aterramento.

## **2.3 Sistema de terminação em terra**

O conjunto de eletrodos de aterramento conhecidos em alguns documentos como sistema de terminação em terra é um dos componentes fundamentais de um sistema de proteção contra raios (LPS) e a sua missão é conduzir e dispersar a corrente de raio dentro da terra, sem por em risco as pessoas ou causar danos às instalações dentro da estrutura protegida.

### **Princípios gerais:**

Quando se está lidando com dispersão de corrente na terra enquanto se controla a aparição de sobretensões que possam representar um risco, o comportamento transitório do sistema de terminação em terra sob a ação de correntes de raio de grande amplitude tem que ser estudado. A seguir se descreverão alguns fenômenos que caracterizam o comportamento dos eletrodos sob condições transitórias.

- O fenômeno indutivo influencia profundamente o comportamento transitório dos eletrodos de aterramento. A taxa de crescimento dos impulsos de corrente incrementa a queda de tensão indutiva com respeito à queda de tensão resistiva.
- Amplitudes elevadas de corrente de raio associadas com durações de frente de onda muito curtas podem resultar em altas densidades de corrente perto dos eletrodos de aterramento, assim os gradientes de tensão críticos podem ser excedidos e descargas parciais dentro do solo podem ocorrer.

Quando correntes de raio estão sendo dispersadas no solo, o nível de risco para as pessoas pode ser avaliado usando como parâmetro a quantidade de energia injetada ao corpo, tendo em conta que a máxima energia tolerada por este para condições transitórias tipo raio é igual a 20J[14]. Para conseguir o



anterior, o sistema de terminação em terra tem que estar desenhado de tal forma que a dispersão não resulte em tensões de passo maiores que a tensão necessária para dissipar o valor Máximo de energia num corpo humano para o qual se assume um valor de resistência de 500  $\Omega$ . Quando se aplica este procedimento, é possível estabelecer as dimensões mínimas requeridas do sistema de terminação em terra de acordo a Standards internacionais como o IEC62305 ou para nosso caso específico uma adaptação de este, o reporte técnico 61400-24.

## **2.4 Normatividade existente para a proteção ante descargas atmosféricas**

Existe um numero considerável de normas internacionais para a proteção ante descargas atmosféricas que foram aplicadas às turbinas eólicas. Entre elas estão:

- IEC 61024 Protection of Structures Against Lightning.
- IEC 61662 The Assessment of Risk Due to lightning.
- IEC 61312 1-5 Protection Against Lightning Electromagnetic Impulses.

Instalações de turbinas eólicas que foram protegidas usando os princípios descritos nestes três Standards, experimentaram danos significativos por causa dos raios. Documentação sobre estes casos tem sido produzida por investigadores do instituto de ciência e tecnologia da universidade de Manchester[5], a agencia internacional de energia(IEA)[6] e o NREL[7].

Recentemente foi publicada a primeira edição do standard internacional 61400-24 titulado Wind turbines – part 24: Lightning protection, especializado na proteção das turbinas eólicas ante descargas atmosféricas, incluindo um

capítulo sobre o tema de trabalho deste projeto, o sistema de aterramento da instalação, porém, ainda não tem uma difusão significativa de dito documento (representada por publicações técnicas que avaliem o desempenho de plantas de geração desenhadas sob as recomendações propostas) que permita a realização de um estudo com as características projetadas neste projeto. Antes da aparição do documento anteriormente mencionado, o desenho de instalações de geração eólica (as quais estão atualmente em serviço) estava baseado nas recomendações para proteção ante raios contidas no reporte técnico IEC/TR 61400-24 de 2002, por esta razão é necessária uma descrição do conteúdo do reporte, especificamente no que se refere ao sistema de aterramento da instalação.

#### **2.4.1 Roteiro técnico IEC/TR 61400-24**

Para o desenho do sistema de aterramento de cada torre eólica, são recomendados dois tipos de arreglos dos eletrodos de aterramento, como são:

Arreglo tipo A:

Este tipo de arreglo envolve eletrodos de aterramento horizontais e verticais conectados ao condutor encarregado de conduzir a corrente a terra desde a superfície, que no caso da turbina eólica será a torre da turbina.

Arreglo tipo B:

Este tipo de arreglo envolve um eletrodo tipo anel externo à estrutura da torre, o qual tem que estar em contacto com o solo pelo menos num 80% da sua longitude total, ou um eletrodo composto pela estrutura de cimentação da torre. Eletrodos adicionais já sejam horizontais ou verticais podem ser usados junto

com o eletrodo tipo anel. O eletrodo tem que estar enterrado a uma profundidade de pelo menos 0,5m.

Uma turbina eólica normalmente usa o arreglo tipo B, com um eletrodo tipo anel localizado ao redor dela e unido à estrutura metálica da cimentação da torre. Eletrodos horizontais podem ser usados para conectar o sistema de aterramento de uma turbina ao sistema das outras turbinas presentes no caso de uma granja eólica.

De acordo à norma IEC 61024-1, o radio do eletrodo tipo anel é definido tendo em conta o nível de proteção ante raios requerido para a estrutura, e a resistividade do solo. Um eletrodo tipo anel normalmente será instalado ao redor do perímetro da cimentação da torre, de esta forma o radio do anel normalmente será definido pelo radio da estrutura de cimentação da turbina e pode que tenham que ser instalados condutores adicionais.

No caso que a resistência de aterramento do sistema seja menor que  $10\Omega$ , as longitudes dos eletrodos mencionados no parágrafo anterior podem ser estimadas arbitrariamente, em caso contrario deverão seguir o procedimento de calculo indicado no standard 61024-1. O uso de eletrodos horizontais ou verticais está condicionado à distribuição espacial da granja e à estrutura do solo como indica a seguinte tabela:

Tipo de eletrodo	Localizações factíveis para seu uso
Horizontal	É usado quando a resistividade do solo não diminui com a profundidade ou onde os espaços no solo dos cabos de potencia permitem uma fácil instalação dos eletrodos.
Vertical	É usado quando a resistividade do solo diminui com a profundidade ou onde o sistema de aterramento deve permanecer com uma estrutura compacta.



Como já foi mencionado, é de particular importância no momento de impacto de um raio, não somente o valor de resistência de aterramento, senão também o valor da indutância. Devido a que a corrente de raio tem um grande número de componentes de alta frequência, se apresenta uma interação com a indutância do sistema de aterramento produzindo assim impedâncias transitórias de um valor elevado. Sendo assim, um sistema de aterramento que usa eletrodos horizontais com uma longitude aproximada de 50m pode ter uma resistência baixa, tendo ao mesmo tempo uma impedância transitória elevada.

Os condutores utilizados no sistema de aterramento devem cumprir as restrições de dimensões mínimas estabelecidas no IEC 61024-1. É particularmente importante garantir que os eletrodos não experimentarão uma corrosão significativa durante a vida útil da turbina.

As barras de aço que reforçam a cimentação da torre podem ser usadas como eletrodos de aterramento para o sistema. Se por exemplo, uma turbina eólica é montada sobre uma estrutura subterrânea de concreto reforçado de 15m de diâmetro, então esta pode ser considerada equivalente a um eletrodo tipo anel de 15m de diâmetro. As barras de reforço que se encontram imersas no concreto da cimentação devem cumprir também com as restrições de dimensões mínimas estabelecidas na IEC 61024-01.[8]

Em diferentes artigos técnicos se realizaram questionamentos sobre o funcionamento de um sistema de aterramento para uma turbina eólica desenhada a partir de Standards como o já mencionado IEC 61024-01, que tem uma orientação diferente à proteção de plantas eólicas, não tendo em conta características intrínsecas a este tipo de sistemas que podem ser cruciais no momento de escolher os parâmetros geométricos do sistema de aterramento. Esta situação lhe dá cabimento a estudos de avaliação do desempenho de sistemas que adotam como diretrizes as recomendações de ditos Standards.

### **2.4.2 Standard IEEE 80 para a segurança nos sistemas de aterramento de corrente alternada**

A implementação de um sistema de aterramento para uma instalação elétrica tem dois objetivos principais como são:

- Prover um meio para a condução da corrente elétrica dentro da terra sob condições normais ou de falha, evitando que se excedam os limites operativos e dos equipamentos ou uma influência negativa na continuidade do serviço.
- Garantir que uma pessoa que este numa região próxima às instalações aterradas, não este exposta ao risco de um choque elétrico crítico.

#### **Condições de risco**

Durante uma situação típica de falta, o fluxo de corrente a terra produzirá gradientes de potencial dentro e ao redor da instalação. A menos que no processo de desenho sejam tomadas as precauções adequadas, os gradientes de potencial máximos sobre a superfície da terra podem chegar a ter uma magnitude suficientemente elevada durante a condição de falta para por em risco a uma pessoa que este nessa área.

As circunstâncias que fazem possíveis os acidentes de tipo elétrico são as seguintes:

- Uma corrente de falta a terra relativamente alta em relação com a área utilizada pelo sistema de aterramento e ao valor de resistência com respeito a terra remota.
- Uma resistividade do solo e uma distribuição de correntes tais que permitam a existência de altos gradientes de potencial em pontos sobre a superfície da terra.

- A presença de uma pessoa num certo ponto, momento e posição corporal tal que o corpo este atuando como ponte entre dois pontos com uma diferença de potencial elevada.
- A ausência de uma resistência de contato suficiente ou de outras resistências série que ajudem a limitar a corrente a traves do corpo a um valor seguro quando se encontre em alguma das circunstâncias anteriormente mencionadas.
- Uma duração da falta e do contacto da pessoa com o ponto energizado, tal que permita um fluxo de corrente a traves do corpo o tempo suficiente para causar dano.

É agora preciso tomar algumas definições inerentes ao tema, estabelecidas pelo standard, que serão de grande utilidade em diante.

*Ground potential rise (GPR):* é o Máximo potencial elétrico que o sistema de aterramento de uma subestação pode alcançar com respeito a um ponto distante de aterramento o qual está ao potencial da terra remota. Este potencial, GPR, é igual á máxima corrente de malha multiplicada pela resistência de aterramento.

*Tensão de contato metal a metal:* é a diferença de potencial entre objetos metálicos ou estruturas dentro da área da subestação que podem ser postos em contato a traves de um contato mano a mano ou mano a pé.

*Tensão de passo:* é a diferença de potencial sobre a superfície do solo experimentada por uma pessoa que se encontra numa posição tal que seus pés estão separados uma distancia de 1m e nenhum deles esta em contato com outro objeto aterrado.

*Tensão de contato:* é a diferença de potencial entre o GPR e o potencial do ponto no qual uma pessoa esta parada tendo uma mão em contato com a estrutura aterrada.

*Tensão de malha:* é a máxima tensão de contato dentro da malha do sistema de aterramento.

*Tensão transferida:* é um caso especial de tensão de contato onde uma tensão é transferida dentro ou fora da subestação desde o pra um ponto remoto externo à subestação.

## **2.5O solo**

É fundamental para o desenho de um sistema de aterramento, conhecer algumas características do solo no que se trabalhara, especialmente o valor da resistividade, a qual como já vimos tem uma influencia importante nos valores de tensão de passo e de contato.

### **Efeito da umidade e temperatura no valor da resistividade**

Devido ao processo de condução da corrente no solo, se comprovou que a resistividade da maioria dos tipos de solo se incrementa abruptamente quando há uma diminuição do conteúdo de umidade por debaixo de 15% do peso do solo. O nível de umidade do solo depende das características tais como o tamanho dos grãos e a compactabilidade. Porem, a resistividade é levemente afetada uma vez que a umidade do solo excede aproximadamente o 22% como mostram os estudos apresentados em [9].

### **Medições de resistividade**

É inusual encontrar que o espaço que se dispus para o montagem do sistema de aterramento conta com umas condições de resistividade uniforme em toda a área e até uma profundidade considerável. Geralmente ditos terrenos estão compostos por varias capas de material, cada uma tendo uma resistividade diferente. Devido a estas razões é necessária a realização de testes de

resistividade com o fim de determinar se existe alguma variação importante da resistividade com a profundidade.

Se a resistividade varia de uma forma apreciável com respeito à profundidade, é recomendável obter um estimativo dos valores da resistividade a profundidades maiores. É possível realizar isto graças à versatilidade dos métodos utilizados para a medição que com simples deslocamentos sobre a área de trabalho entregam uma visão mais ampla das características elétricas.

### **Modelo de solo uniforme**

O modelo de solo uniforme pode ser usado quando não se conta com as ferramentas computacionais necessárias para a implementação de um modelo de duas capas ou um modelo de múltiplas capas. Quando o contraste entre os valores de resistividade das diferentes capas de terreno é moderado, uma resistividade de solo meia pode ser usada como uma primeira aproximação. A resistividade aproximada do solo pode ser obtida tomando um meio aritmético das resistividades aparentes medidas como se mostra a continuação:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$$

Onde  $\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$  são os dados de resistividade aparente obtidos para diferentes espaçamentos no método das 4 pontas, ou a diferentes profundidades no método da caída de potencial em  $\Omega \cdot m$  e  $n$  é o número total de medições.

Existem diferentes métodos para aproximar um solo não uniforme como um modelo de solo uniforme. Um de esses métodos inclui usar a resistividade aparente meia da capa superior para os cálculos de tensões de passo e de contato, e a resistividade aparente meio da capa inferior para o calculo da resistência do sistema de aterramento.

### **Método das duas capas**

O modelo das duas capas como já se menciona pode ser representado por uma capa superior de uma profundidade finita sobre uma capa de profundidade infinita. O cambio abrupto no valor da resistividade nas fronteiras de cada capa de solo pode ser descrito a traves de um fator de reflexão. O fator de reflexão,  $K$ , é definido pela equação:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Onde

$\rho_1$  é a resistividade da capa de solo superior em  $\Omega \cdot m$ .

$\rho_2$  é a resistividade da capa de solo inferior em  $\Omega \cdot m$ .

A representação mais precisa do sistema de aterramento deve estar baseada nas variações reais da resistividade do solo na área de trabalho. Modelar todas estas variações raramente será economicamente justificável ou tecnicamente realizável, porem, na maioria dos casos o uso do modelo de duas capas permite a realização de um desenho que cumpra com as condições de segurança requeridas. Existem diferentes técnicas para determinar um modelo equivalente de duas capas desde as medições de resistividade aparente obtidas nos testes de campo tal como se mostra em [10].

### **Comparação entre um modelo de solo uniforme e o modelo das duas capas em sistemas de aterramento.**

O modelo das duas capas demonstrou ser uma representação muito mais precisa que o modelo de solo uniforme. O comportamento de um sistema de aterramento instalado num solo que apresenta duas capas de materiais com diferente resistividade é muito diferente ao comportamento do mesmo sistema instalado num solo uniforme.

Geralmente para um sistema de aterramento instalado num solo uniforme ou num solo de duas capas no qual a resistividade da capa superior é menor que a da capa inferior, a densidade de corrente é alta nos condutores mais externos do sistema. Num solo onde a resistividade da capa superior é maior que a da capa inferior, a densidade de corrente é mais uniforme em todos os condutores do sistema de aterramento. Isto é causado pela tendência da corrente a fluir para a zona do solo com menor resistividade.

As variações na resistividade do solo têm uma influencia importante no desempenho da maioria dos sistemas de aterramento, afetando tanto o valor da resistência de aterramento como o GPR, e as tensões de passo e contato. Em geral para valores negativos de  $K$ , a resistência de aterramento do sistema e as tensões de passo e de contato são geralmente menores que si se instalara o sistema num solo com resistividade uniforme de valor  $\rho_1$ . Em contraste para valores de  $K$  positivos, a resistência e as tensões de passo e de contato são geralmente mais altas que aquelas num solo uniforme de resistividade  $\rho_1$ .

Outros parâmetros como a profundidade da capa superior de material, também afetam as diferencias no desempenho do sistema instalado num solo uniforme ou num solo de duas capas de material. A regra geral é que usando a profundidade da capa superior é consideravelmente maior que as dimensões do eletrodo de aterramento, o desempenho de dito eletrodo se aproxima ao desempenho do mesmo eletrodo num terreno de resistividade  $\rho_1$ .

Para situações que envolvam uma grande área a proteger, eletrodos de aterramento com formas complexas, ou onde a resistividade do terreno é claramente não uniforme, o engenheiro responsável pelo desenho deve decidir se é necessária a aplicação de métodos mais sofisticados.



## 2.6 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais parciais.

Já que uma grande quantidade de fenômenos físicos podem ser descritos por esta classe de equações, e devido a que a solução analítica de estas, para casos nos quais a geometria analisada não é simples, é praticamente impossível de obter, o método dos elementos finitos se apresenta como uma grande alternativa para a solução de problemas trabalhados em diferentes ramas da física e da engenharia.

A aplicação do método para a solução de problemas em engenharia elétrica inicio ao final da década de 1960, e a partir de então sua popularidade tem aumentado graças às vantagens que oferece frente a outros métodos numéricos para o calculo de campos eletromagnéticos, ate chegar atualmente a ser a metodologia mais usada pelos softwares comerciais para a solução de equações diferenciais ( na área da engenharia elétrica e mecânica)[14].

É necessário agora definir formalmente o tipo de problemas que se podem resolver usando o método. Estes recebem o nome de problemas de valor na fronteira e aparecem geralmente no modelaje matemático de sistemas físicos. Um problema de valor na fronteira pode ser definido por uma equação diferencial num domínio  $\Omega$  da forma:

$$\zeta \phi = f$$

junto com as condições de fronteira na fronteira  $\Gamma$  que encerra ao domínio. Na equação anterior  $\zeta$  é um operador diferencial,  $f$  é a função de excitação e  $\phi$  é a variável desconhecida. Em eletromagnetismos a forma da equação diferencial vai desde uma forma simples como a equação de Poisson, ate formas



complexas como a equação escalar de onda. As condições de fronteira também vão desde formas simples como as condições de fronteira de Dirichlet e Neumann, ate condições complexas de impedância e radiação [15].

O principio de trabalho do método é substituir um domínio continuo por um numero de subdomínios nos quais o valor da variável desconhecida é representado por funções de interpolação simples com coeficientes desconhecidos, assim o problema original com um numero infinito de grãos de liberdade é convertido num problema com um numero finitos de grãos de liberdade, ou em outras palavras, a solução do sistema completo é aproximada por um numero finito de coeficientes desconhecidos. Depois, um sistema de equações algébricas é obtido aplicando o método Ritz variacional ou o procedimento de Garlekin, e finalmente se chega à solução do problema ao resolver dito sistema de equações[15].

Assim a aplicação do método dos elementos finitos para a solução de um problema de eletromagnetismo e em geral para qualquer problema que possa ser descrito por equações diferenciais parciais deve incluir os seguintes passos básicos:

- 1) Discretização ou subdivisão do domínio.
- 2) Seleção das funções de interpolação.
- 3) Formulação do sistema de equações.
- 4) Solução do sistema de equações.

### **Discretização do domínio**

A discretização do domínio é um passo de grande importância na aplicação do método dos elementos finitos já que a forma em que seja discretizado afetara a precisão dos resultados numéricos obtidos, assim como os requerimentos de memória e o tempo necessários para a solução. Neste passo o domínio é

dividido num numero de pequenos subdomínios chamados elementos. Para um domínio unidimensional como uma linha reta, os elementos são geralmente pequenos segmentos de linha interconectados para formar aproximadamente a linha original. Para um domínio bidimensional os elementos são usualmente pequenos triângulos ou retângulos, sendo conveniente o uso de estes últimos quando se deseja realizar a discretização de uma região retangular e dos primeiros quando se esta trabalhando com regiões irregulares. Quando se esta trabalhando um problema donde o domínio é tridimensional, o domínio pode ser subdividido em tetraedros, prismas ou cubos retangulares.

A maioria dos problemas que se desejam solucionar usando o método dos elementos finitos são formulados em termos de uma função de valor desconhecido nos nodos associados aos elementos. Ditos nodos são em realidade os vértices dos elementos, tendo assim por exemplo que um elemento triangular pose 3 nodos. Para efeitos de implementação, é necessário associar a cada um destes nodos um numero local o qual indica a posição do nodo dentro do elemento, um numero global que indica sua posição no sistema e as suas coordenadas.

A discretização do domínio é usualmente considerada uma tarefa de pré-processamento já que pode ser realizada separadamente dos outros passos. Esta pode ser levada a cabo manualmente, o que exige muito trabalho quando se esta trabalhando com geometrias complexas ou de grande tamanho, por essa razão é comum usar programas geradores de malha, os quais dividem automaticamente o domínio e entregam os valores associados a cada nó mencionados anteriormente.

### **Seleção das funções de interpolação**

O segundo passo do processo é a seleção das funções de interpolação que provem uma aproximação da função desconhecida dentro do elemento. Geralmente são selecionadas funções polinomiais de primeira ordem (lineais), de segunda ordem (quadráticas) ou de ordem superior. Estas ultimas oferecem

uma alta precisão, sem embargo não são comumente usadas já que exigem uma formulação mais complexa que as de ordem inferior. Uma vez que a ordem do polinômio é selecionada, é possível estabelecer uma expressão que entregue os valores da variável desconhecida dentro de cada elemento em função do valor de dita variável nos nós do elemento e da função interpoladora de cada nó. Uma característica destacável de estas funções interpoladoras é que assumem um valor diferente de zero somente dentro do elemento ao qual pertencem e fora deste desaparecem.

### **Formulação do sistema de equações**

Para a obtenção do sistema de equações existem dois métodos freqüentemente usados como são o método Ritz variacional e o método de Galerkin. A continuação se realizara uma pequena descrição de cada um deles.

#### **Método Ritz variacional**

Neste método o problema de valor na fronteira é formulado em termos de uma expressão variacional chamada funcional, cujo valor mínimo corresponde á equação diferencial sob as condições de contorno. Assim, a solução ao problema se encontrara ao minimizar dito funcional com respeito a variáveis que definem certa aproximação á solução.

#### **Método de Galerkin**

Este método pertence à família dos métodos dos resíduos ponderados, a qual como seu nome indica, busca a solução do problema ponderando o resíduo da equação diferencial. Assuma que  $\phi'$  é uma solução aproximada da equação diferencial que caracteriza o problema. A substituição de  $\phi$  por  $\phi'$  levará à aparição de um resíduo diferente de zero.

$$r = \zeta\phi' - f \neq 0$$

A melhor aproximação para  $\phi$  será aquela que reduza o resíduo  $r$  ao menor valor possível em todos os pontos do domínio. Assim, os métodos de resíduos ponderados forçam o cumprimento da seguinte condição.

$$R_i = \int_{\Omega} \omega_i r \, d\Omega = 0$$

Onde  $R_i$  são as integrais dos resíduos ponderados e  $\omega_i$  são funções de peso escolhidas. No método de Galerkin as funções de peso são as mesmas funções de interpolação, levando esta metodologia quase sempre à solução mais precisa.

Depois de fazer algumas modificações leves a estes procedimentos com o fim de fazê-los compatíveis com o método dos elementos finitos, se obterá um sistema de equações da forma:

$$[K]\{\phi\} = \{b\}$$

Donde  $[K]$  é uma matriz simétrica de tamanho  $N \times N$  sendo  $N$  o número total de incógnitas ou nós,  $\{\phi\}$  é um vetor de tamanho  $N \times 1$  cujos elementos são os valores da variável nos nós e  $\{b\}$  é um vetor conhecido de tamanho  $N \times 1$ .

Antes que este sistema de equações esteja pronto para ser resolvido, é necessário aplicar as condições na fronteira requeridas. Existem duas classes de condições de fronteira usualmente encontradas, uma é a condição de fronteira de Dirichlet, a qual impõe um valor de  $\phi$  na fronteira, a outra é a condição de fronteira homogênea de Neumann que estabelece que a derivada de  $\phi$  com respeito ao vetor normal à fronteira se faz zero ali. A condição de Dirichlet deve ser imposta explicitamente, em contraste com a condição de Neumann, a qual usualmente é cumprida de forma implícita e automaticamente no processo de solução.

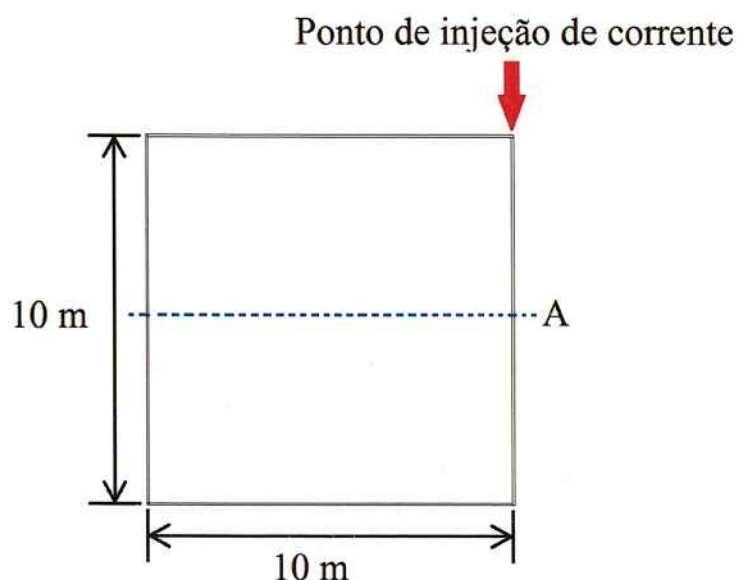
### **Solução do sistema de equações**

A solução do sistema de equações é o passo final no processo de resolução do problema. Para fazer isto, é possível usar diferentes métodos para a solução de sistemas de equações lineais tais como o método de Gauss de eliminação ou o método dos gradientes conjugados.

Este ultimo método será utilizado neste projeto devido a sua grande eficiência para a resolução de matrizes simétricas com termos positivos. Basicamente, o método opera gerando seqüências de vetores de soluções aproximadas, vetores de resíduos e vetores de direção de busca, que são utilizados para atualizar os próximos vetores de solução aproximada e resíduos. Desde o ponto de vista computacional, este método é muito interessante já que exige o armazenamento na memória de apenas 3 vetores, ademais dos termos não nulos da matriz global.

## **3. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO**

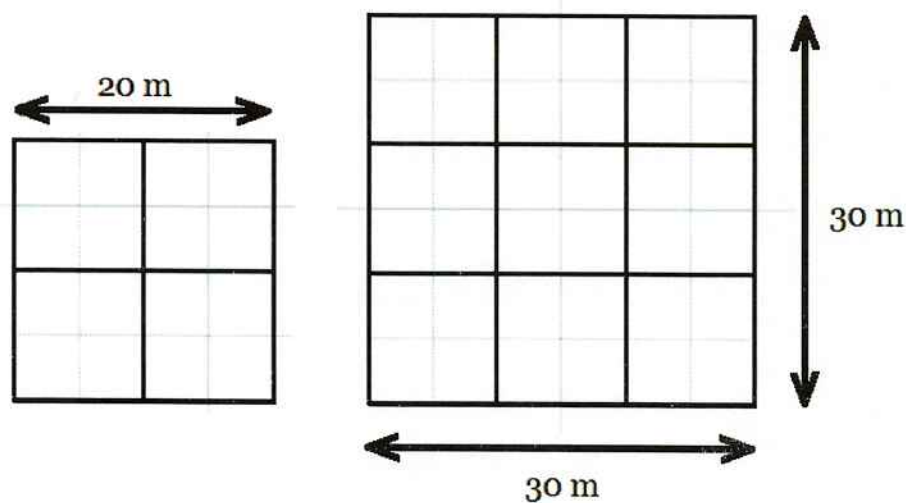
Para verificar a validade dos resultados do processo de simulação, decidiu-se reproduzir três casos de sistemas de aterramento apresentados em [13], tanto no software desenvolvido no LMAG - USP quanto no software comercial da simulação Comsol Multiphysics. O caso de teste primário selecionado consiste de um anel de 10 x 10 metros construído com condutores de cobre de 1,4 cm de diâmetro, enterrado a 0,5 m num terreno de uma única camada com uma resistividade elétrica de 1000  $\Omega \cdot m$  e uma permissividade relativa de 9. A injeção de corrente será feita num dos cantos, como mostrado na Figura 3.



**Figura 3** – estrutura do caso de teste

A figura 4 mostra os outros dois casos de teste, os quais são versões mais complexas do caso principal e serão usados apenas em algumas etapas do processo de comparação. Como variável de comparação foi selecionada a impedância vista à partir do ponto de injeção de corrente para diferentes valores de frequência, bem como o perfil das tensões sobre o caminho que passa atravessa o anel pelo meio.





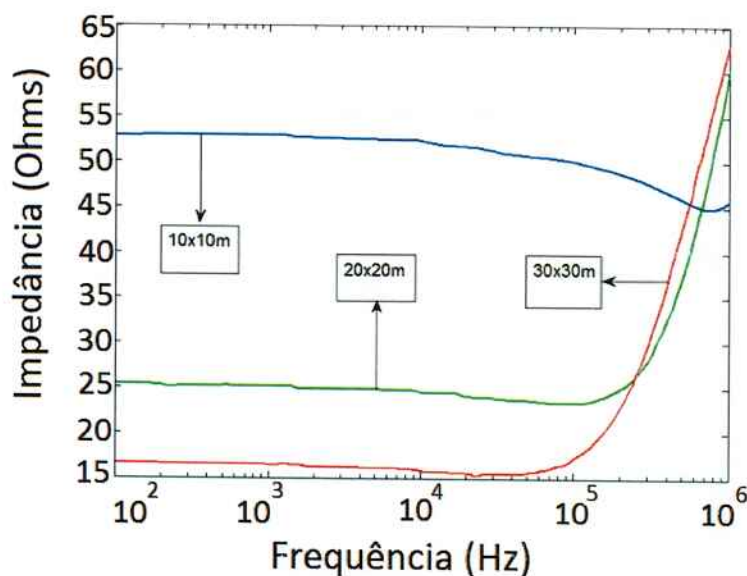
**Figura 4** – Casos de teste adicionais

Os valores de magnitude e ângulo da impedância para uma ampla gama de frequências, obtidos usando o método das diferenças finitas (MDF) [13], são apresentados nas figuras 5 e 6 respectivamente.

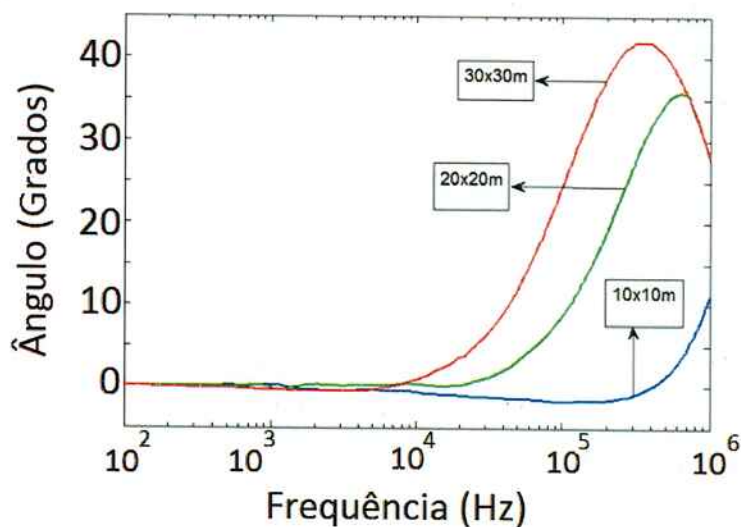
Na Figura 5, é possível observar que para valores de frequência inferiores aproximadamente a 100 kHz a magnitude da impedância mantém um valor praticamente constante. Para frequências maiores se apresenta um aumento significativo nesta variável chegando praticamente ao mesmo ponto para as três malhas, isso é devido a área efetiva das malhas que diminui conforme a frequência aumenta. Na Figura 6, vemos que se apresenta um comportamento semelhante ao convergir os valores da fase ao mesmo valor para frequências superiores a aproximadamente 1 Mhz.

A figura 7 mostra os valores da fase da impedância para todos os três casos, obtidos fazendo uso do software de simulação do LMAG - USP. Podemos ver que as simulações realizadas seguem o comportamento dos resultados do artigo de forma exata até um valor de 10 kHz para todos os três casos, no entanto no caso da malha de 10x10m foi possível chegar a um valor mais alto de frequência sem ter uma diferença maior do que alguns graus. A Figura 8 apresenta a diferença percentual entre os valores de fase do artigo e os obtidos

a partir de simulação para a malha de 10 x 10 m. Nesta figura é possível notar que se tem uma diferença máxima de 7,7% em 100 kHz, comprovando assim a validade da metodologia de simulação para configurações com dimensões próximas às dessa malha.



**Figura 5** – comportamento da magnitude da impedância na frequência para os casos de teste apresentados em [13]



**Figura 6** – comportamento do ângulo de fase da impedância na frequência para os casos de teste apresentados em [13]



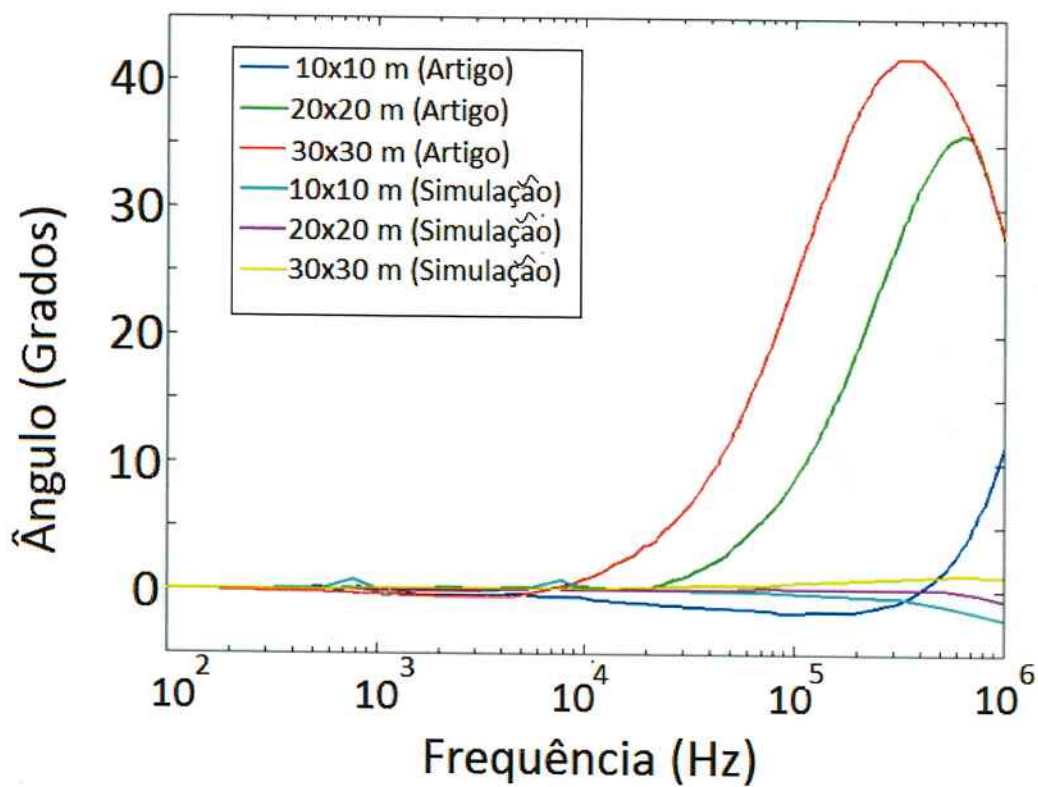


Figura 7 – comportamento do ângulo de fase da impedância na frequência para os casos de teste simulados

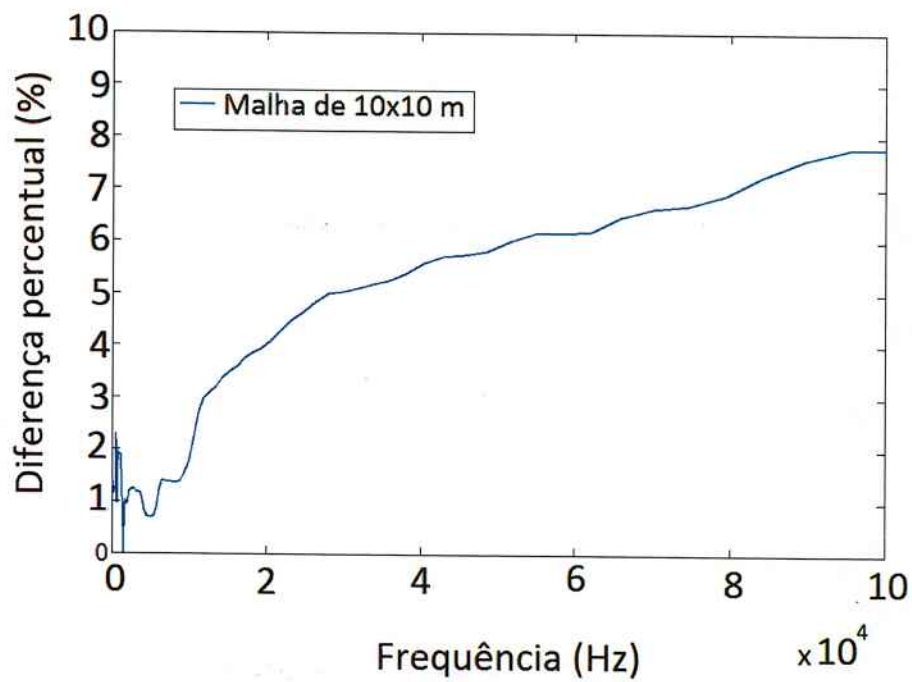
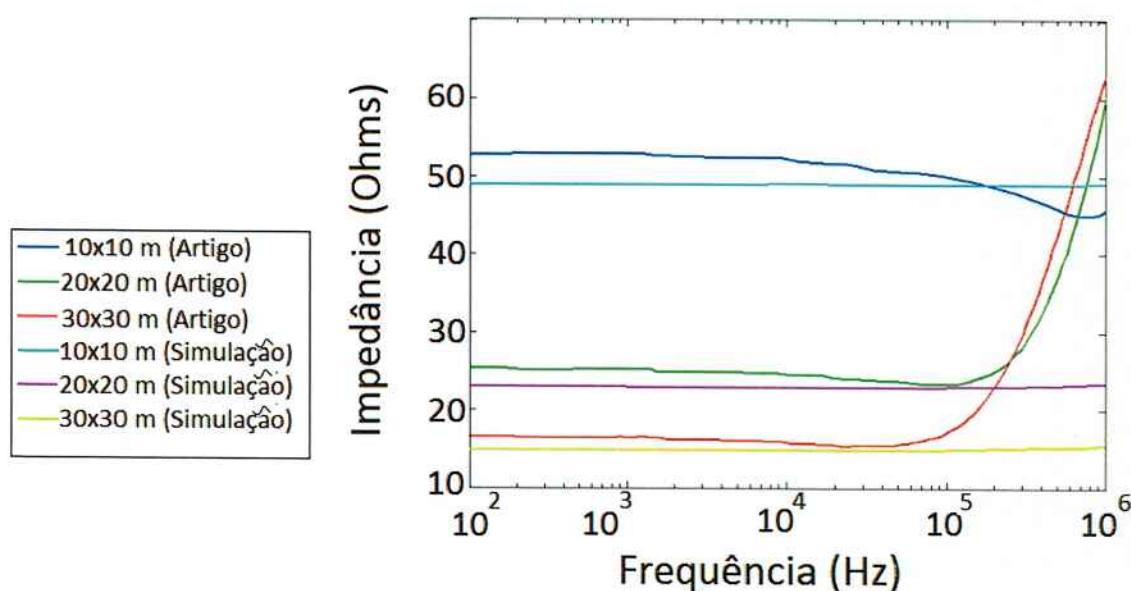


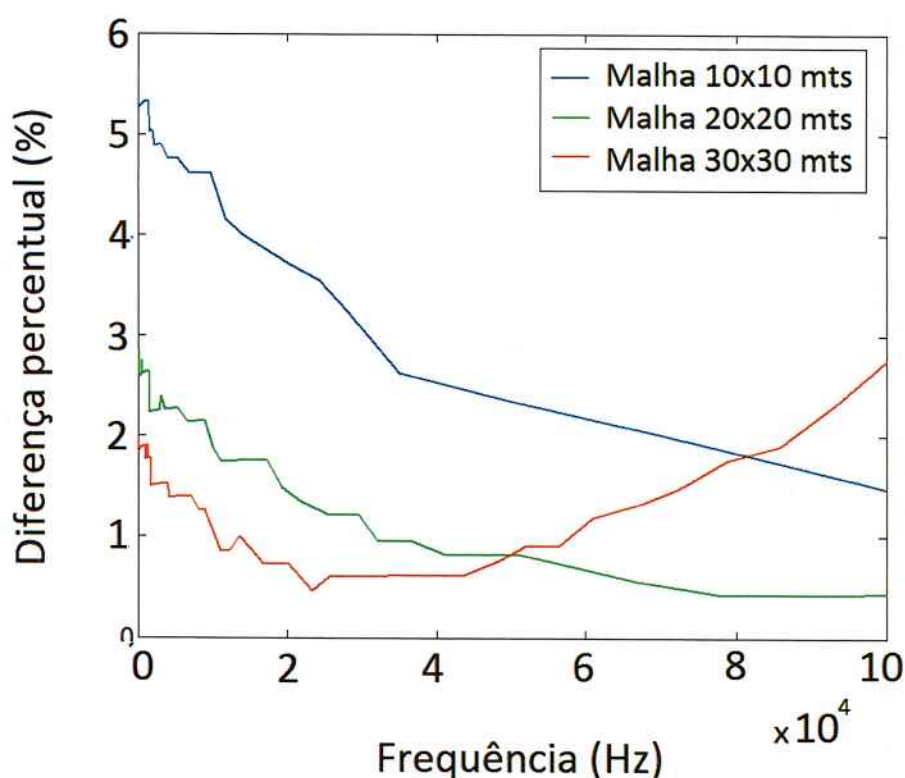
Figura 8 – Diferencia percentual da fase da impedância para a malha de 10 x 10 m

No caso da magnitude há uma grande proximidade entre os valores do artigo e os simulados para os três tamanhos de malha como se pode ver na Figura 9. Na Figura 10 se mostra o gráfico da diferença percentual entre os valores de magnitude do artigo e os valores da simulação. Ali é possível demonstrar que a diferença de percentagem máxima tem um valor de 5,3% para a malha de 10x10m, sendo causado por problemas relacionados com a alocação de memória RAM para uma das etapas da solução pelo método de elementos finitos.



**Figura 9** – comportamento da magnitude da impedância na frequência para os casos de teste simulados

A segunda fase do processo de validação é a comparação dos resultados obtidos no software COMSOL Mutiphysics contra os obtidos no software LMAG. Ao tentar inserir a geometria da malha de 10x10m no Comsol se apresentaram inconvenientes já que este software não admite uma relação entre o comprimento do condutor e o seu diâmetro superior a 150, permitindo isto chegar a um valor mínimo de 6,6 cm de diâmetro, que está longe o valor usado no artigo.

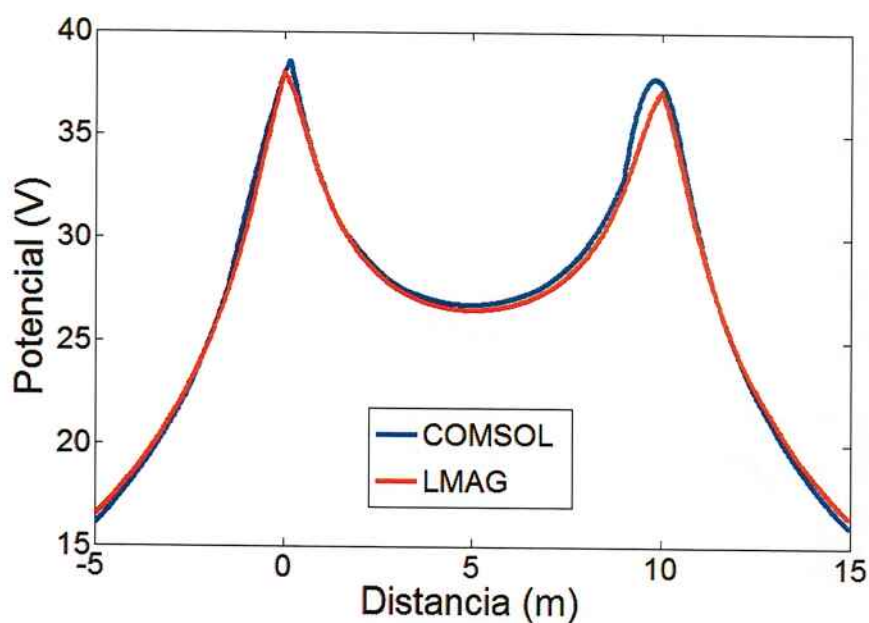


**Figura 10** – Diferencia percentual da magnitude da impedância para as três malhas

Para realizar uma comparação do desempenho dos programas tornou-se necessário aumentar o raio usado no programa LMAG até 6.6 cm, alcançando assim um valor bastante aproximado da magnitude da impedância calculada pelos dois como se pode ver na tabela 1 e também uma grande coincidência na forma dos perfis de tensão sobre a trajetória A como se pode ver na Figura 11.

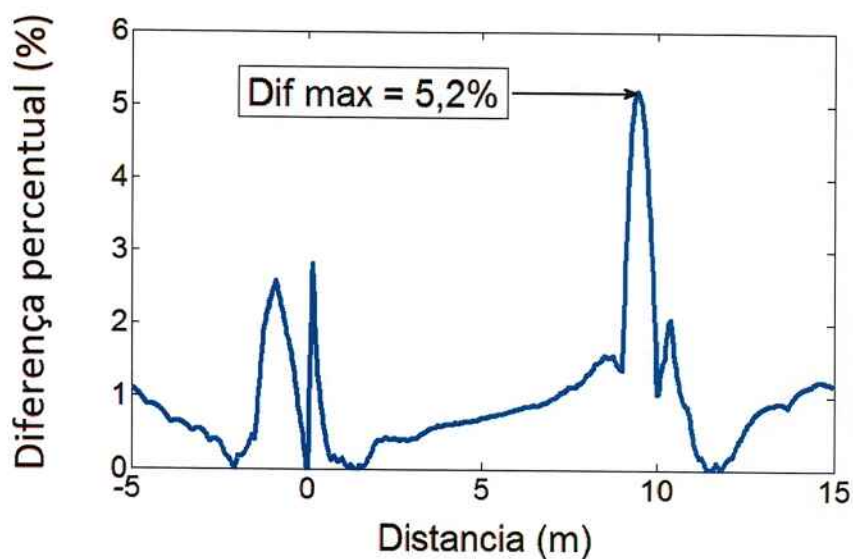
Software utilizado	Magnitude da impedância a 100 Hz ( $\Omega$ )
COMSOL Multiphysics	44,5
LMAG	44,6

**Tabela 1** – Valores de impedância registrados para os dois programas



**Figura 11** – Perfis de potencial sobre a trajetória A, a injeção de corrente é realizada no ponto 0.

Um gráfico da diferença percentual entre os resultados entregues pelos dois programas é mostrado na Figura 12. Ali vemos que há uma diferença máxima de 5,2%, que pode ser atribuída a falhas na discretização da região próxima aos condutores feita no programa GMSH.



**Figura 12** – Diferença percentual do potencial elétrico sobre a trajetória A para os dois programas de simulação usados.

Os resultados obtidos neste capítulo avaliam o uso do programa desenvolvido pelo LMAG, para o estudo de sistemas de aterramento em baixa frequência ( $< 100$  kHz), sendo isto suficiente como se verá no próximo capítulo para avaliar os valores de energia transferida a seres humanos por causa das descargas elétricas atmosféricas.



#### 4. SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO A ESTUDAR

Para a realização deste estudo foram selecionados três sistemas de aterramento projetados de acordo com as recomendações do relatório técnico IEC/TR 61400-24 para uma turbina eólica de 850kW, com uma altura de 60mts e um diâmetro de rotor de 60mts como se pode ver na Figura 13.

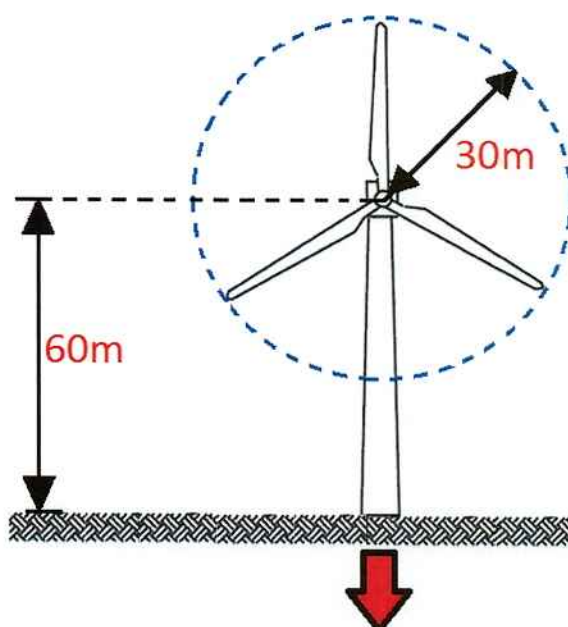


Figura 13 – Dimensões da turbina eólica escolhida para as simulações

**Caso 1: Uso da estrutura metálica que reforça a fundação da torre como um eletrodo de aterramento.**

Para o primeiro caso de estudo foi escolhida uma fundação de concreto típica, reforçada por uma estrutura externa de hastes de aço de  $\frac{3}{4}$  " de diâmetro [e]. Nas Figuras 14 e 15 se apresentam as dimensões do sistema que esta

aterrado 0,5 metros abaixo da superfície e está conectado diretamente com a torre da turbina no seu centro, conforme é indicado pela seta vermelha. Com respeito às características do solo, foi escolhido um modelo homogêneo de um material com resistividade elétrica de  $1000 \Omega.m$  e uma permissividade de 9, assumindo que o concreto apresenta características elétricas semelhantes às do solo

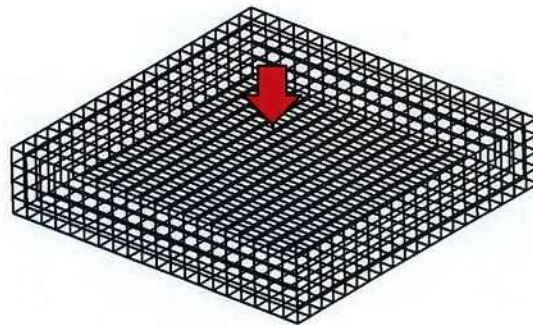


Figura 14 – Estrutura de aço da cimentação.

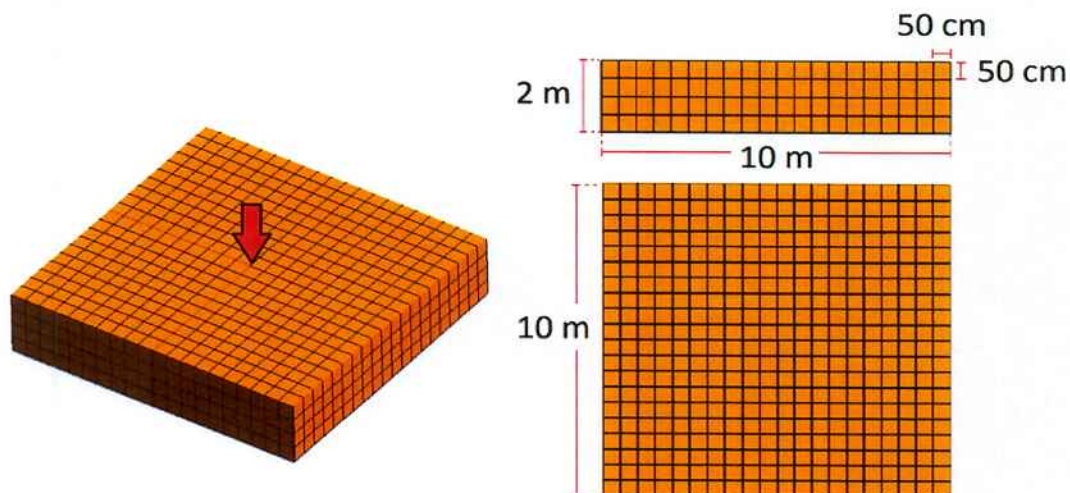
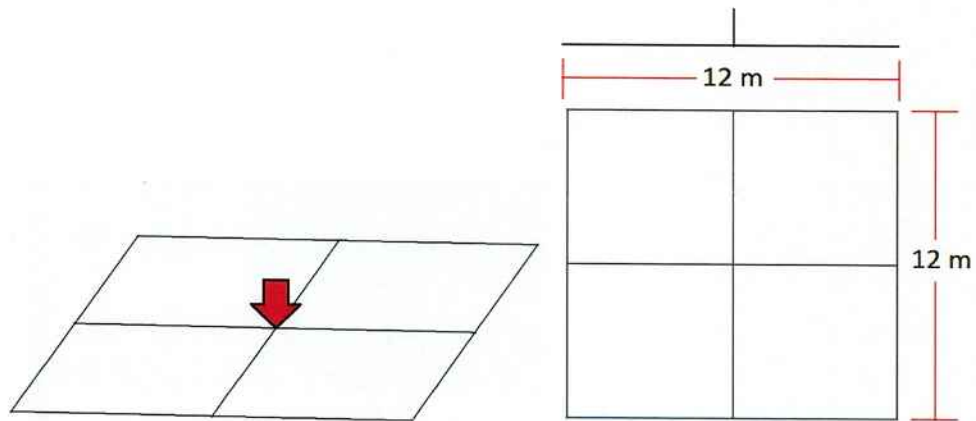


Figura 15 – Dimensões da estrutura de cimentação para o caso 1.

### **Caso 2: Utilização de um anel metálico exterior à Fundação como eletrodo de aterramento.**

Neste caso, foi utilizado como eletrodo de aterramento um anel de metal construído com condutores de 8 mm de diâmetro e aterrado a 0,5 metros de profundidade. Na Figura 16 são apresentadas as dimensões do anel, que está

localizado a 1 metro das paredes da estrutura da fundação como recomenda o relatório técnico. Uma característica importante desta instalação é que não foi levada em conta a influência do reforço metálico da fundação, isto foi feito com o fim de avaliar a influência de sua ausência ao realizar simulações.

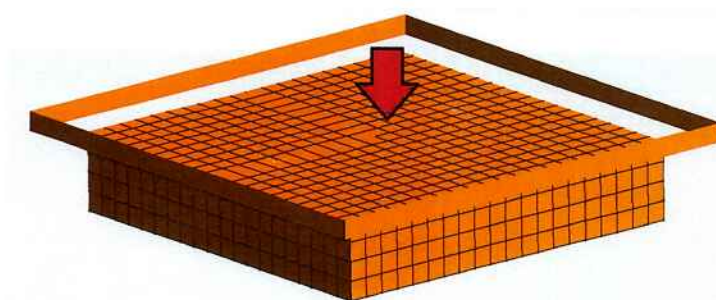


**Figura 16** – Dimensões do anel usado como sistema de aterramento para o caso 2.

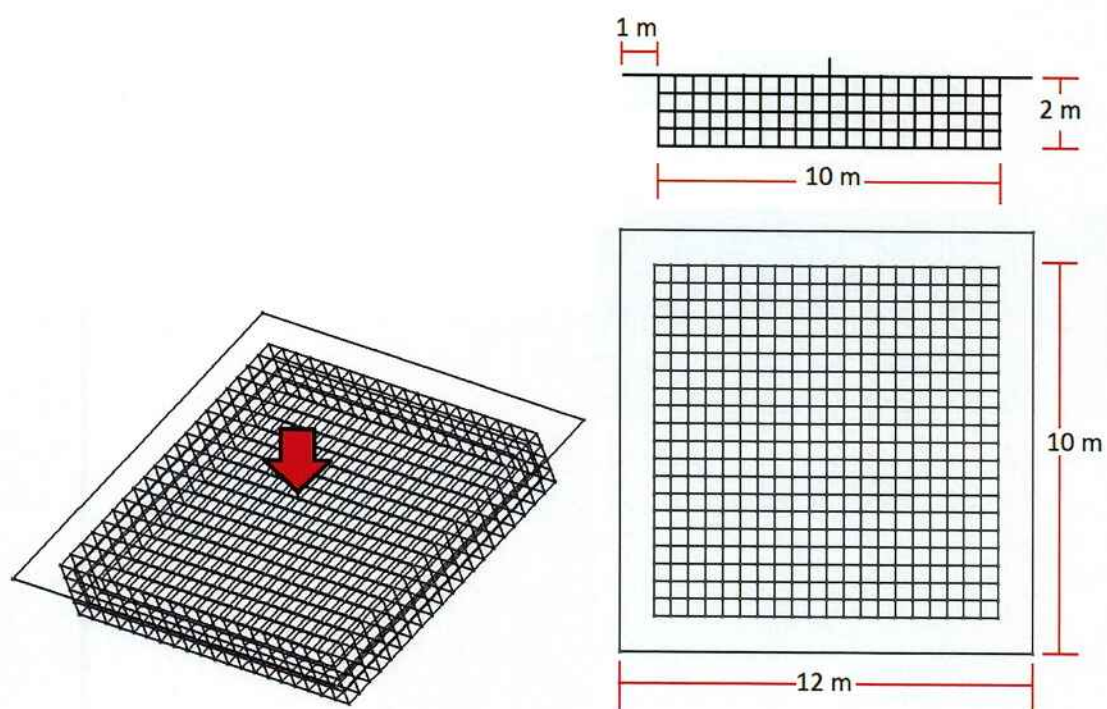
**Caso 3: Uso da estrutura metálica de reforço da Fundação (caso 1) juntamente com o anel metálico exterior a esta (caso 2) como um eletrodos de aterramento.**

Aqui se apresenta a união dos sistemas do caso 1 e do caso 2. Isto foi feito com o objetivo de mostrar a influência do sistema de cimentação no comportamento elétrico do sistema ante uma descarga atmosférica, sendo isto comparado com os resultados dos casos anteriores. Nas figuras 17 e 18 são apresentadas as dimensões do sistema completo.





**Figura 17** – Desenho esquemático do sistema de aterramento usado no caso 3.



**Figura 18** – dimensões do sistema de aterramento usado no caso 3.

## 5. PROCESSO DE SIMULAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Depois de ingressar ao software do LMAG as características geométricas dos sistemas de aterramento escolhidos e realizar o processo de discretização do domínio (passos necessários para a aplicação do método dos elementos finitos) foi necessário definir como se representaria a injeção de corrente no sistema de aterramento causada pelo impacto de

No caso de uma descarga atmosférica atingir as pás da turbina ou sobre a nacela, a corrente será conduzida em direção à terra pelo corpo da torre. Por esta razão o ponto no qual a injeção de corrente deve ser realizada é o centro da estrutura de cimentação sobre a superfície do solo.

É possível encontrar na literatura diferentes modelos para a corrente de raio na base do canal de descarga. Para este trabalho foi usada a função de Heidler segundo o estabelecido nas normas para proteção contra descargas da International Electrotechnical Commission (IEC) e foram realizados testes para os três níveis de proteção definidas por dita entidade.

Na equação (1) é apresentada a fórmula de Heidler. Esta oferece um controle quase independente das características do impulsos, como tempo de subida, tempo de queda e valor pico ao modificar os parâmetros. Na tabela 2 são apresentados os valores destes para os 4 níveis de proteção.

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k_s^n}{1+k_s^n} e^{\frac{t}{\tau_2}} ; \quad k_s = \frac{t}{\tau_1} \quad (1)$$

Parâmetros	Corrente da primeira descarga		
	Nível de proteção contra descargas		
	I	II	III-IV
$I_p(A)$	200	150	100
$\tau_1(\mu s)$	19	19	19
$\tau_2(\mu s)$	485	485	485
$n$	9.3	9.3	9.3

**Tabela 2** – Parâmetros usados para a definição dos níveis de proteção.

Devido a sua programação, o software LMAG permite apenas realizar um estudo harmônico do problema a simular, por esta razão foi necessário decompor o impulso de corrente fornecido pela função de Heidler em seus componentes de frequência utilizando a transformada rápida de Fourier. Na Figura 19 se encontram os impulsos dos 4 níveis de proteção existentes e na figura 20 a decomposição na frequência do impulso para o nível de proteção I.

Apesar do fato de que existem componentes de alta frequência como se pode ver na Figura 20, estes têm uma baixa amplitude em relação aos componentes de baixa frequência. Este fato permitiu a simplificação do cálculo dos valores de energia transferida como será mostrado adiante.

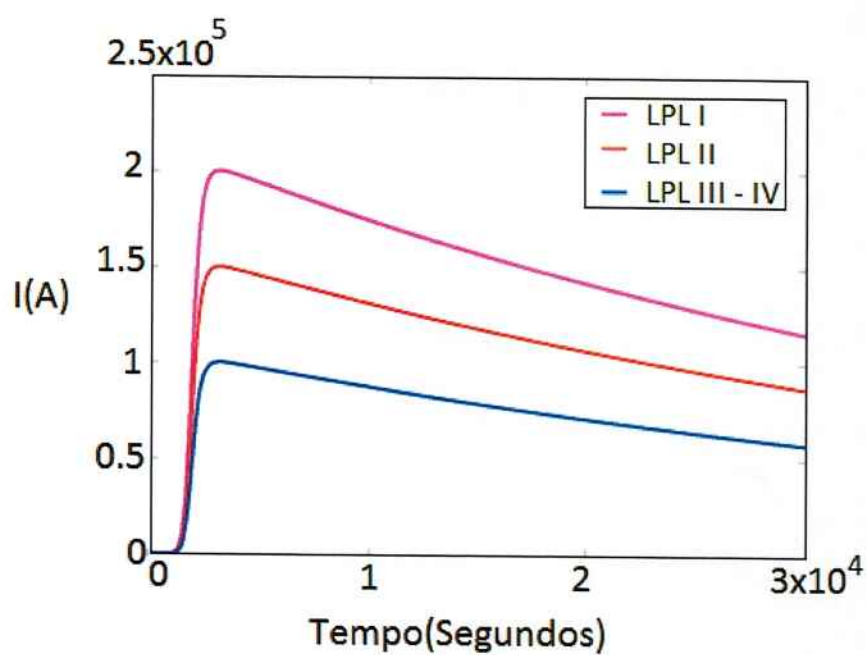


Figura 19 – Impulsos associados aos 4 níveis de proteção

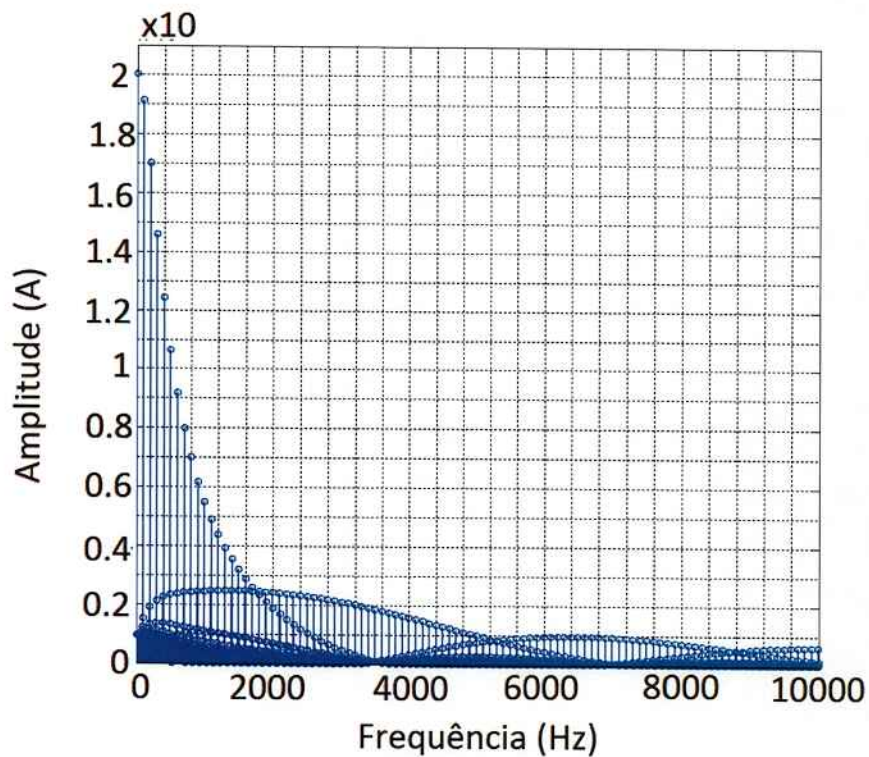


Figura 20 – Decomposição na frequência do impulso para o nível de proteção I.

## **6. CÁLCULO DOS VALORES DE ENERGIA TRANSFERIDA**

Inicialmente foi feita a decomposição na frequência do impulso associado com o nível de proteção I, como foi descrito no parágrafo anterior, selecionando os componentes de frequência com magnitudes superiores a 2% da amplitude do componente de frequência zero. Esta decisão foi motivada pelo equilíbrio aceitável que oferece esse percentagem entre o número de simulações necessárias e a precisão do valor estimado da energia transmitida como será demonstrado na análise dos resultados. Como se esperava, esses componentes estão associados a baixas frequências, tendo um valor máximo de 25kHz para o componente selecionado de menor amplitude.

Para cada uma das componentes selecionadas foi realizada uma simulação no software desenvolvido pelo LMAG para encontrar assim os valores correspondentes de impedância, tensão de passo e de contato em cada uma das três configurações de aterramento selecionadas.

Para identificar os pontos entre os quais se apresenta a maior tensão de passo, foram extraídos perfis de tensão em várias direções ao nível do solo sempre através do centro da fundação, e se procuraram os dois pontos que tendo 1 m de separação apresentam o maior gradiente de potencial e, portanto, a maior diferença de potencial. A figura 21 apresenta o perfil de tensão sobre o qual se realizou a seleção dos pontos ( $x$  e  $x + 1$  m) para o caso 1 e a Figura 22 apresenta a gráfica de diferença de potencial entre o ponto  $x$  e  $x + 1$  m.

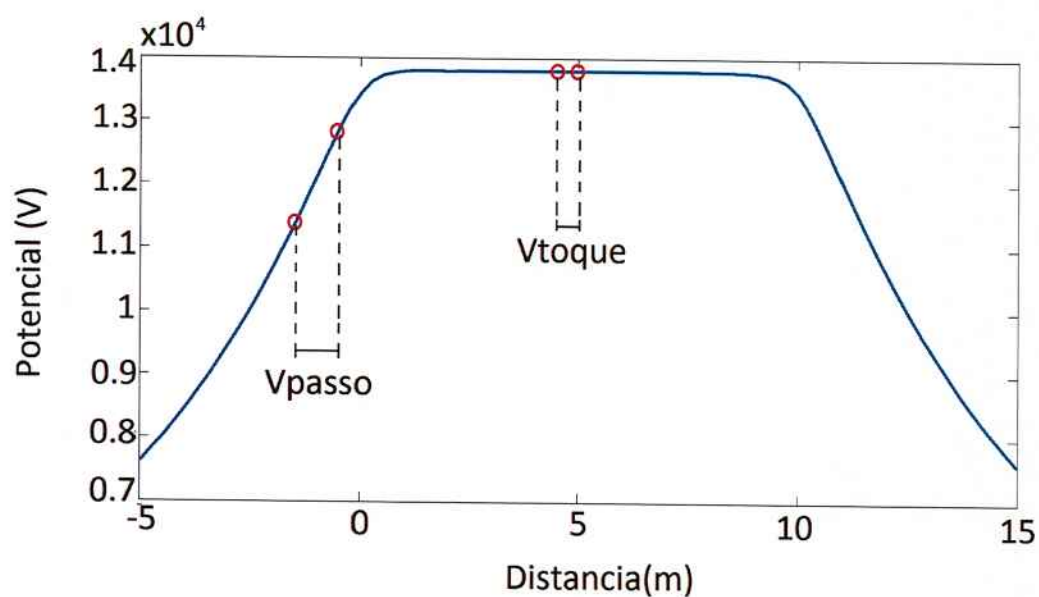


Figura 21 – Perfil de potencial medido sobre a trajetória A

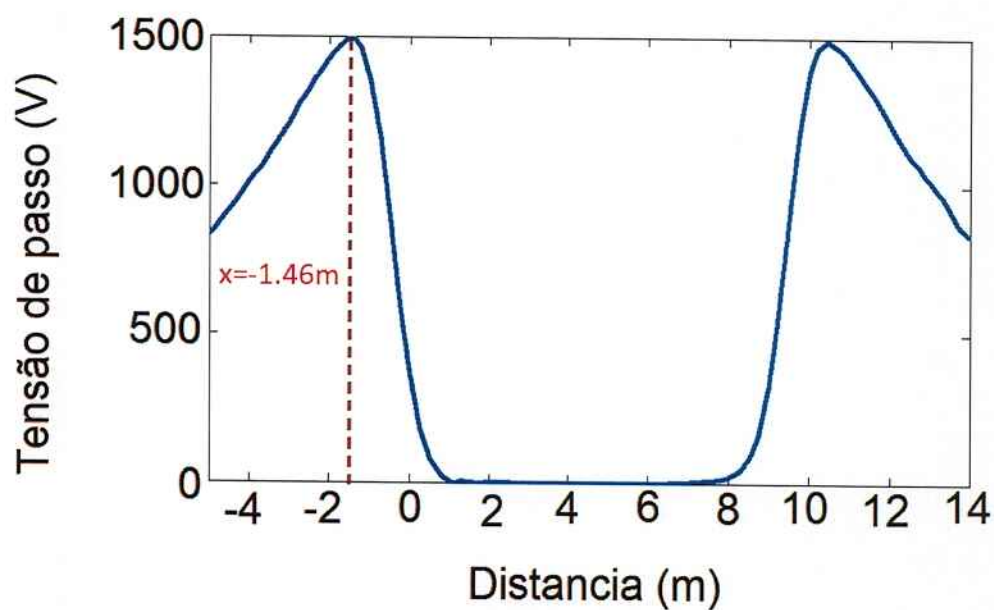


Figura 22 – tensão de passo medida entre os pontos  $x$  e  $x+1m$

A tensão decontato esta definida como a diferença de potencial existente entre o ponto de maior potencial do sistema e o lugar onde se encontrariam os pés de uma pessoa que estivesse em contacto com dito ponto de potencial



Máximo. Assim, se definiu a tensão de passo como a diferença de potencial medida entre o ponto de injeção de corrente e um ponto qualquer à 70 cm de distância sobre a superfície do solo.

Depois de realizar o processo de simulação para os componentes de frequência selecionados e de utilizar a transformada inversa de Fourier foi possível obter a forma de onda da tensão de passo no tempo, a qual apesar de ter uma aparência um pouco distorcida com respeito ao que se esperaria, permite realizar uma avaliação aproximada da energia que seria transmitida a uma pessoa no caso de uma descarga atmosférica no nível de proteção I para os três casos de simulação. Em quanto à tensão de contato, somente foi possível realizar a sua medição no caso 2 já que para os casos 1 e 3 se apresentava um valor tão baixo que com a resolução do programa utilizado não foi possível identificá-lo.

Antes de intentar realizar algum cálculo de energia a partir das tensões de passo e de contato, é necessário realizar um circuito equivalente do sistema, no qual ditas tensões representariam a tensão de circuito aberto ou tensão Thevenin. Nas figura 25 e 26 se mostram ditos circuitos equivalentes.

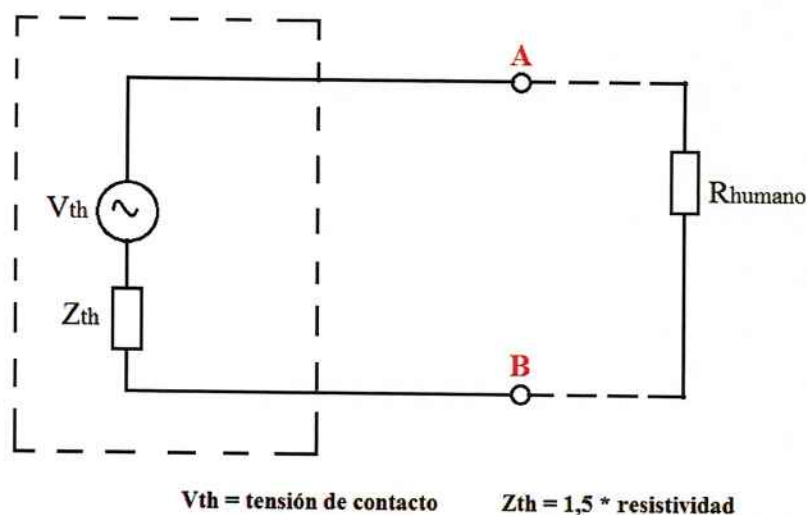
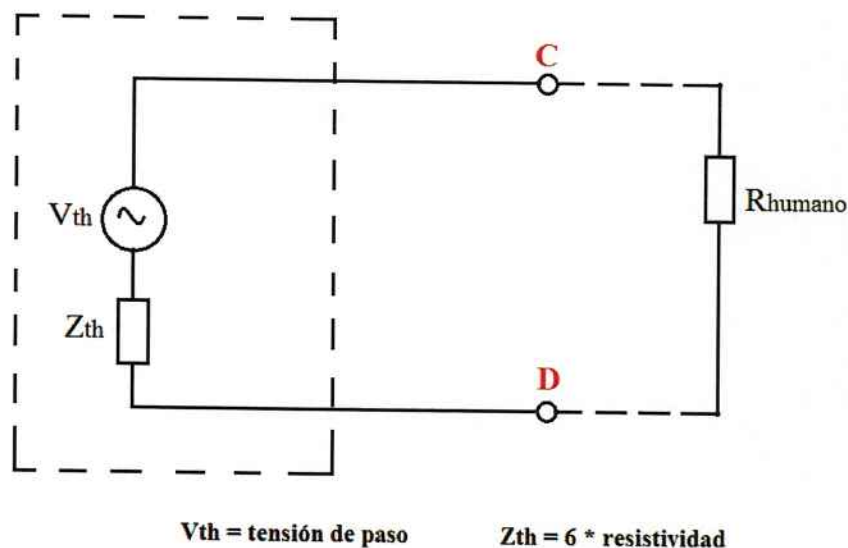


Figura 25 – Circuito equivalente Thevenin para a tensão de contato





**Figura 26** – Circuito equivalente Thevenin para a tensão de passo

Segundo esta definido no standard IEEE 80 a impedância thevenin Del circuito equivalente dependerá do valor de resistividade do terreno, assumindo um valor de 1,5 vezes a resistividade para o caso da tensão de contato e 6 vezes a resistividade para o caso da tensão de passo. O ultimo componente do circuito é a resistência que representa a presença de uma pessoa entre os pontos A e B para a tensão de contacto e os pontos C e D para a tensão de passo, a qual por sugestão do standard IEEE tem um valor  $R=1000\Omega$  para os dois casos.

Tendo claro o circuito equivalente do sistema e os valores de seus componentes foi possível realizar o cálculo da energia transferida à resistência R utilizando a equação (2) a qual depende da tensão entre os terminais A-B, C-D e do valor da resistência R anteriormente definido. Como janela de tempo para realizar a integração se utilizou o intervalo de 10 ms, tempo suficiente para realizar um estudo completo do fenômeno.

## 7. RESULTADOS OBTIDOS

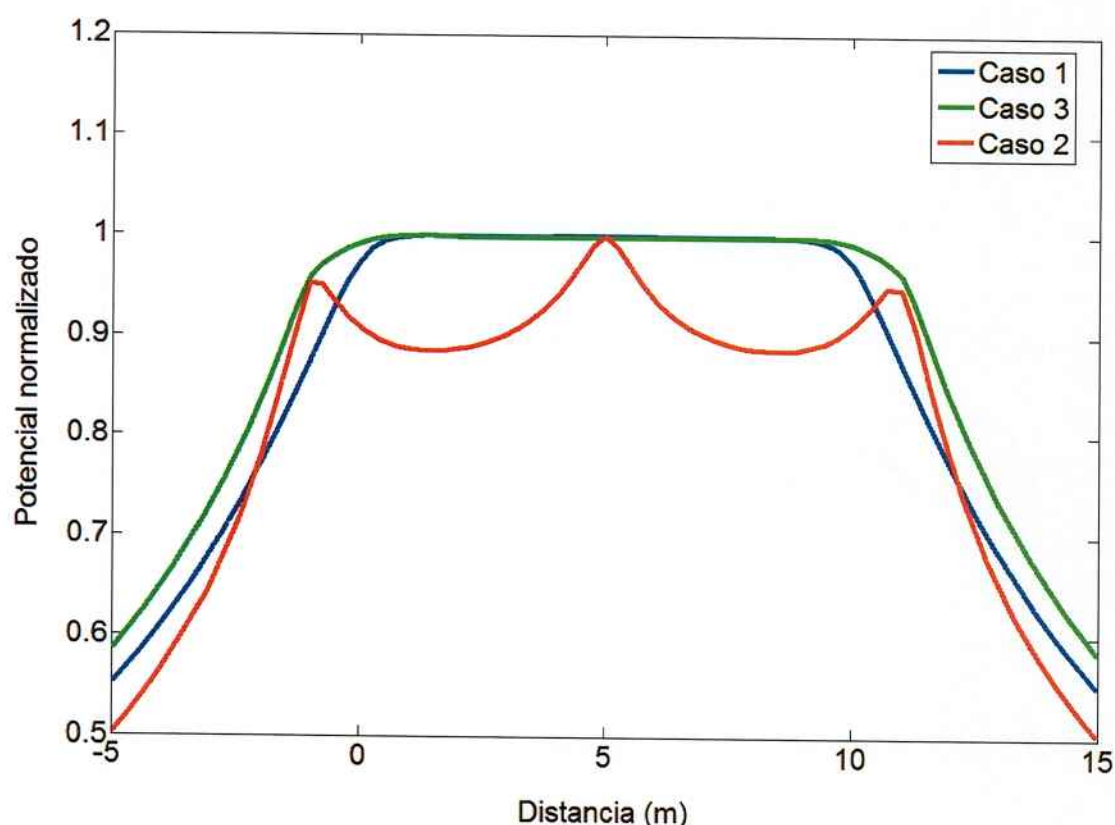
Como resultado do processo de integração foi obtido o valor de energia transferida a uma pessoa em caso de uma descarga atmosférica com características tais que alcance o limite máximo do nível de proteção I para cada um dos sistemas de aterramento selecionados. Na tabela 3 são apresentados os valores obtidos.

Caso teste	Energia transmitida a um ser humano com $R=1000 \Omega$ (kJ)
1	0.65
2	2.43
3	0.808

**Tabela 3** – Circuito equivalente Thevenin para a tensão de passo

Podemos ver nos resultados da tabela 3 que para todos os níveis de proteção estudados se supera o valor de energia de 20J, definido em diversas publicações internacionais LIBRO E RETIE como máxima energia suportável por uma pessoa para uma descarga tipo impulso.

Outro fenômeno destacável é a grande influência que tem o tipo de configuração no valor de energia transferida. Ao compararmos valores de energia associados à tensão de passo para os casos 1 e 2 vemos que se apresenta uma diferença de 1,78 kJ a qual pode ser atribuída ao incremento no gradiente de tensão causado pela distribuição menos uniforme dos condutores dispostos para a dispersão de corrente. Na figura 27 são mostrados os perfis de tensão normalizados para cada um dos casos.



**Figura 27** – Perfis de tensão normalizados para os 3 casos de simulação

Ali é possível ver o mencionado anteriormente, estando isto representado pela existência de zonas para o caso 2 nas quais a inclinação tem um valor muito maior que em qualquer zona dos outros casos. Comparando agora os casos 1 e 3 vemos que contrário ao que se esperaria, a inclusão de um anel exterior à estrutura de cimentação deteriora as condições de segurança que pode oferecer esta trabalhando independentemente, já que em vez de apresentar-se uma diminuição do valor de energia transferida, se apresenta um aumento de 0,15kJ. Isto pode ser atribuído ao que a presença do anel ocasiona uma distribuição menos uniforme do potencial na região exterior do sistema como se pode ver na figura 27.

Ao realizar um análise mais detalhada dos resultados obtidos do processo de simulação, é possível notar que tanto a magnitude quanto o ângulo da impedância que se mantém praticamente num valor constante até uma

freqüência de aproximadamente 100kHz. Por isto, é possível a partir de esta impedância constante e da corrente, encontrar o valor de GPR para cada componente de freqüência através de um simples processo de multiplicação, evitando assim o consumo elevado de tempo que representam as simulações. Por outro lado, também foi possível notar que existe uma relação constante entre o GPR e o potencial em qualquer ponto do domínio. Assim, conhecendo os valores das relações entre o GPR e os pontos  $x$  e  $x+1$  (que foram extraídos das simulações), é possível reconstruir a tensão de passo simplesmente à partir da corrente de raio inicial e as constantes mencionadas, usando assim um número maior de componentes de freqüência (até 100kHz), incrementando de uma forma considerável o nível de precisão e reduzindo o tempo de cálculo. É importante ressaltar que isto somente pode ser feito devido à impedância que mantém um valor constante por um intervalo considerável de freqüências. Ao realizar o procedimento mencionado para todos os componentes de freqüência do impulso de nível I até um valor de 100kHz, se chegou a um valor de energia de 0.626kJ para o caso 1, sendo este próximo ao valor já obtido com os componentes selecionados. Isto demonstra a efetividade do método para estabelecer um estimado da ordem de magnitude da máxima energia transferida a um ser humano em caso de uma descarga atmosférica para o nível de proteção I. Para o caso dos níveis de proteção II, III e IV se constatou que o conteúdo harmônico principal se encontrasse na faixa dos 100kHz e se realizou o mesmo procedimento, obtendo os resultados conteúdos na tabela 4.

Nível de proteção	Energia transmitida a um ser humano com $R=1000 \Omega$ (kJ) – caso 1
I	0.62
II	0.49
III e IV	0.21

**Tabela 4** - Energia transmitida a um ser humano nos diferentes níveis de proteção para o caso 1.

A partir das informações contidas na tabela, vemos que as condições estabelecidas para a avaliação da segurança das pessoas não é cumprida para qualquer um dos níveis de proteção. Para os casos 2 e 3, apresentam um comportamento semelhante como pode ser visto na tabela 5, levando isso para impedir a utilização de tais sistemas de aterramento sem o uso de medidas de proteção adicionais para a segurança das pessoas.

Energia transmitida a um ser humano com $R=1000 \, \Omega$ (kJ) – casos 2 e 3		
Nível de proteção	Caso 2	Caso 3
I	2.32	0.77
II	1.78	0.59
III e IV	0.79	0.26

**Tabela 5** - Energia transmitida a um ser humano nos diferentes níveis de proteção para os casos 2 e 3

Uma dessas medidas de proteção adicionais é a adição de uma capa de um material de alta resistividade na região próxima à torre da turbina aumentando assim a impedância Thevenin do circuito equivalente, o que diminuirá a energia transferida a uma pessoa. Outra opção é a construção de restrições físicas ou a montagem de sinais de alerta para restringir o acesso de pessoas às áreas de risco identificadas, diminuindo assim a probabilidade de um choque elétrico letal.

## 8. Conclusões

O uso do método dos elementos finitos permite a avaliação do desempenho de diferentes configurações de sistema de aterramento na sua função de garantir a segurança das pessoas na região próxima à turbina, permitindo concluir que para os casos discutidos neste documento não é recomendável a presença de seres humanos

Ao redor da torre, já que no caso de uma descarga atmosférica existe a possibilidade que seja superado o valor Máximo de energia suportável por um ser humano sugerido por publicações internacionais e que foi utilizado como critério de avaliação.

Já que os sistemas simulados cumprem com as condições estabelecidas no relatório técnico 61024-24 da IEC, são evidentes as deficiências que se apresentam ao querer garantir a segurança das pessoas baseando-se exclusivamente nas recomendações contidas em dita norma. Por esta razão é imprescindível tomar medidas adicionais para reduzir a probabilidade de exposição ao choque elétrico causado por uma descarga atmosférica. Ao comparar os resultados dos três casos, foi possível demonstrar a grande influência que tem a parte metálica da estrutura de cimentação no comportamento elétrico do sistema, ocorrendo erros significativos ao ignorar a sua presença, como foi feito no caso 2. Por outro lado ao realizar a comparação dos resultados dos casos 1 e 3, vemos que a inclusão de um anel externo pode prejudicar o desempenho da estrutura de cimentação trabalhando independentemente, na sua missão de garantir a segurança das pessoas. Por este motivo se faz necessário realizar um estudo da distribuição de potencial sobre a superfície causada pela presença do sistema, modificando se for necessário, a profundidade de aterramento do anel ou a proximidade com o sistema de cimentação.





## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] TINGFANG ,Y, "Lightning Protection of Wind Turbines", Changsha, 2010. Changsha University of science and technology.
- [2] DODD, C., MCCALLA, "How to Protect A Wind Turbine From Lightning", National Aeronautics and Space Administration, 1983.
- [3] DURSTEWITZ, M., ENSSLIN, C "External Conditions For Wind Turbine Operation – results from the German '250 MW Wind Programme", 1996.
- [4] MCNIFF, B. "Wind Turbine Lightning Protection Project 1999-2001", 2002. National Renewable Energy Laboratory.
- [5] GLUSHAKOW, B. "Wind Turbine Generators Effective Lightning Protection," 2006.
- [6] COTTON, I., "Lightning Protection of Wind Turbines - A Designers Guide to Best Practices" Manchester, 1999.
- [7] DEFU. "Recommendation No. 25, Lightning Protection of Wind Turbines". Lyngby, Denmark: Research Institute for Danish Electric Utilities, 1999.
- [8] IEC 61400-24: Wind turbine generator systems – Part 24: Lightning protection.
- [9] MULJADI, E. "Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Types". Minneapolis, 2010. National Renewable Energy Laboratory.
- [10] COORAY, V. "Lightning Protection", The Institution of Engineering and Technology, London, 2010.
- [11] CARDOSO, J, R, "[Introdução ao método dos elementos finitos : para engenheiros eletricitas.](#)", São Paulo , Universidade de São Paulo.
- [12] CARDOSO, J, R, "[Introdução ao método dos elementos finitos : para engenheiros eletricitas.](#)", São Paulo , Universidade de São Paulo.
- [13] JIANMING, J. "The finite element method in electromagnetics". Wiley-interscience, 2002.
- [14] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. "Reglamento técnico para instalaciones eléctricas RETIE, artículo 42", 2004.