



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FLÁVIO DE PAIVA LOPES

**APLICAÇÃO EM PYTHON PARA CONFIGURAÇÃO COMPUTACIONAL
DE MALHAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA MODELAGEM
ELETROMAGNÉTICA 3D FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Recife
2024

FLÁVIO DE PAIVA LOPES

**APLICAÇÃO EM PYTHON PARA CONFIGURAÇÃO COMPUTACIONAL
DE MALHAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA MODELAGEM
ELETROMAGNÉTICA 3D FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Coorientador: Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lopes, Flávio de Paiva.

Aplicação em Python para configuração computacional de malhas de aterramento elétrico para modelagem eletromagnética 3D frente às descargas atmosféricas / Flávio de Paiva Lopes. - Recife, 2024.

119 : il., tab.

Orientador(a): Alexander Barros Lima

Coorientador(a): Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Malhas de aterramento. 2. Descargas atmosféricas. 3. Modelagem Computacional. 4. Simulação eletromagnética 3D. 5. Aplicação em Python. I. Lima, Alexander Barros . (Orientação). II. Silva Lourenço Novo, Lauro Rodrigo Gomes da. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

FLÁVIO DE PAIVA LOPES

**APLICAÇÃO EM PYTHON PARA CONFIGURAÇÃO COMPUTACIONAL
DE MALHAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA MODELAGEM
ELETROMAGNÉTICA 3D FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 21/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcio Rodrigo Santos de Carvalho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Ercles Mauricio Barbosa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todas as
pessoas que de alguma forma contribuíram
para esta construção.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão primeiramente a Deus, que me concedeu ciência, sabedoria e saúde para trilhar todo o árduo caminho da graduação em Engenharia de Controle e Automação. Agradeço profundamente aos meus pais, Marcos Alves e Rogelma Coelho, por todo o apoio e carinho que sempre me ofereceram em todos os momentos da minha vida, especialmente durante esses anos de graduação. Também quero agradecer ao meu irmão, Fábio Lopes, pelo companheirismo e amizade fraterna.

Aos meus amigos, sejam eles da Igreja, da graduação ou de outros círculos sociais, minha gratidão é imensa. Agradeço também a todos os professores que contribuíram na minha jornada, desde a educação infantil até este momento, com especial destaque aos professores do DEE e DES, que tiveram um papel direto na minha formação.

Meu sincero agradecimento ao Prof. Dr. Lauro Novo, por confiar em mim como seu orientando, e por todo o tempo e dedicação dispensados na realização deste trabalho e em outros projetos de iniciação científica no decorrer da graduação.

Estendo meus agradecimentos a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha formação acadêmica. Desejo que Deus abençoe a todos.

Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos! Por que quem compreendeu a mente do Senhor? ou quem foi seu conselheiro? Ou quem lhe deu primeiro a ele, para que lhe seja recompensado? Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém (Rm 11: 33-36) [1]

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem por finalidade desenvolver uma aplicação na linguagem de programação Python para a geração de configurações de malhas de aterramento elétrico para sua modelagem computacional a ser desenvolvida no *software* de simulação eletromagnética 3D “Ansys HFSS (High-Frequency Structure Simulator)”, para análise do comportamento destas malhas frente às descargas atmosféricas que atingem seu sistema de captação. Para isso, computadores de alto desempenho são utilizados. Nesta perspectiva, são apresentados: os códigos desenvolvidos em Python, eixo principal do trabalho; a metodologia adotada para a modelagem de configurações de malhas; e testes de validação das simulações de modelos previstos na teoria eletromagnética disponível na literatura concernente, e de trabalhos correlatos com a participação do autor.

A ferramenta desenvolvida acelera, portanto, a atividade de geração de configurações computacionais de malhas de aterramento elétrico para fins de modelagem eletromagnética, substituindo os esforços de projetistas, reduzindo o tempo de projeto de cada malha, conferindo-lhe maior confiabilidade e mitigando possíveis erros humanos durante a configuração da malha no *software* HFSS. A referida aplicação em Python exige a inserção dos parâmetros elétricos e geométricos da malha e do ambiente circundante, além da definição do tipo de simulação, dada a análise pretendida, e parametrização do sinal de corrente impulsiva considerado.

Palavras-chave: Malhas de aterramento; Descargas atmosféricas; Modelagem Computacional; Simulação eletromagnética 3D; Aplicação em Python.

ABSTRACT

This current undergraduate completion work aims to develop an application in the programming language Python for generating electrical grounding grid configurations for their computational modeling to be developed in the 3D electromagnetic simulation software “Ansys HFSS (High-Frequency Structure Simulator)”, to analyze their behavior in relation to lightning discharges that strike its capture system. For this, computers with high performance are employed. From this perspective, the following are presented: the codes developed in Python, the main axis of this work; the methodology adopted for modeling the grid configurations of interest; and validation tests of model simulations predicted in the electromagnetic theory available in the relevant literature.

Therefore, a computational tool is developed to speed up the process of generating electrical grounding grid configurations in computational environments intended for several modeling possibilities of these, essentially aiming to replace the designer's efforts, and thus reducing the design time for each grid, and making it more reliable by mitigating possible human errors during grid configuration in the HFSS software. This application in Python requires insertion of the electrical and geometric parameters of the grid and surrounding environment, in addition to the definition for these analyzes of the type of simulation and the parameterization of the electrical signal to be applied.

Keywords: Grounding grids; Lightning discharges; Computational Modeling; 3D electromagnetic simulation; Python application.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo T de representação de segmento de eletrodo e suas correntes ..	21
Figura 2 - Circuito equivalente de segmento de eletrodo para baixas frequências ...	22
Figura 3 - Impedância harmônica de eletrodo (L=30 m;r=7 mm) em solo 2,4 kΩ.m .	23
Figura 4 - Ilustração da tensão de passo.	24
Figura 5 - Curvas de potencial em malha reticulada. Vistas: a) superior; b) 3D.....	25
Figura 6 - Distribuição de potencial em relação à dimensão dos retículos	25
Figura 7 - Tensões de passo e de toque e continuidade elétrica em uma SE.	26
Figura 8 - Distribuição das cargas geradoras de descargas nas nuvens.....	27
Figura 9 - Foto real de uma descarga atmosférica	27
Figura 10 - Forma de onda da descarga atmosférica destacando o T_{cauda}	28
Figura 11 - Forma de onda da descarga atmosférica com destaque no T_{frente} e I_{pico} ..	28
Figura 12 - Obtenção de linhas de código em Python com as alterações no HFSS.	32
Figura 13 - Arquivo .py escrito pelo HFSS para criação de uma linha.	32
Figura 14 - Ilustração do Método dos Elementos Finitos	35
Figura 15 - Ilustração de uma malha de aterramento tradicional.	35
Figura 16 - Modelo de solo hemisférico com o cabo de descida	36
Figura 17 - Exemplo de configuração de simulação de malhas de aterramento.....	36
Figura 18 - Tela inicial do <i>software</i>	37
Figura 19 - Criação de um novo projeto.	38
Figura 20 - Novo projeto criado.	38
Figura 21 - Criar um design HFSS.	38
Figura 22 - Novo design HFSS criado.	39
Figura 23 - Esboço da malha a ser construída.	39
Figura 24 - Criar linhas no HFSS.	40
Figura 25 - Escolha dos pontos iniciais e finais da linha.....	40
Figura 26 - Confirmação da criação da linha em <i>done</i>	41
Figura 27-Linha criada.	41
Figura 28 - Alterar coordenadas manualmente em <i>createLine</i>	42
Figura 29 - Criação do modelo da malha de aterramento.	43
Figura 30 - Agrupar todas as linhas em um grupo.....	43
Figura 31 - Alterar nome do grupo. a) Criação b) Renomear em <i>Properties</i>	44

Figura 32 - Alteração do nome do grupo. a) Alteração b) Grupo renomeado.	44
Figura 33 - Seleção dos “ <i>CreatePolyline</i> ” para alteração da geometria simultânea. .	46
Figura 34 - Propriedades geométricas da linha.	46
Figura 35 - Propriedades geométricas alteradas. (a) Parâmetros. b) Esboço.	47
Figura 36 - Alteração para <i>solids</i> e atribuição automática das hastes como vácuo. .	48
Figura 37 - Escolha e alteração do material.	49
Figura 38 - Hastes alteradas para o material cobre.	49
Figura 39 - Cabo de descida.	50
Figura 40 - Haste condutora perfeita acoplada ao cabo de descida.	51
Figura 41 - Alteração para geometria retangular.	51
Figura 42 - Retângulo desenhado.	52
Figura 43 - Associar o retângulo a uma porta para a corrente de entrada.	53
Figura 44 - Janela referente a corrente.	53
Figura 45 - Direção da corrente definida.	54
Figura 46 - Caminho para adicionar a análise transiente.	54
Figura 47 - Alterações em <i>solution type</i>	55
Figura 48 - Janela para importação da forma de onda da corrente.	56
Figura 49 - Exemplo de forma de onda importada	56
Figura 50 - Associação da corrente importada ao retângulo.	57
Figura 51 - Criação de um plano cartesiano auxiliar.	58
Figura 52 - Novo plano criado.	58
Figura 53 - Janela <i>Properties</i> do novo plano.	58
Figura 54 - Criação da esfera.	59
Figura 55 - Janela <i>Properties</i> da esfera.	59
Figura 56 - Nova esfera criada.	60
Figura 57 - Opção <i>split</i> para corte da esfera.	60
Figura 58 - Janela referente aos parâmetros de corte da esfera.	61
Figura 59 - Semiesfera criada.	61
Figura 60 - Criando um material referente ao solo.	62
Figura 61 - Criação de um objeto relacionado a superfície inferior da semiesfera.	63
Figura 62 - Definição da superfície inferior da semiesfera como <i>ground</i>	64
Figura 63 – Vista da superfície inferior da semiesfera definida como <i>ground</i>	64
Figura 64 - Criação do plano de análise na superfície do solo.	65

Figura 65 - Desenhar caixa.	66
Figura 66 - Ajustes da dimensão da caixa de ar na sua janela de <i>properties</i>	66
Figura 67 - Definição da superfície da caixa de ar como absorvedor da radiação.	67
Figura 68 - Caixa limitadora da simulação.	67
Figura 69 - Adicionar <i>setup</i>	68
Figura 70 - Parâmetros gerais da simulação	68
Figura 71 - Configuração do tempo de simulação.	69
Figura 72 - Configuração dos planos que armazenarão os campos.	69
Figura 73 - Ativação do <i>Enable material override</i>	70
Figura 74 - Validação do modelo desenhado	71
Figura 75 - Forma de onda da corrente 8/25us.	71
Figura 76 - Campo magnético em torno do cabo de descida.	72
Figura 77 - Campo magnético em função do tempo nos pontos em análise.	72
Figura 78 - Criação de um plano de análise ZY	73
Figura 79 - Plano de análise ZY criado	74
Figura 80 - Atribuição dos pontos sobre os quais foi obtido o campo magnético.	74
Figura 81 - Atribuição da linha sobre o plano de análise do solo.	75
Figura 82 - Campo elétrico para pontos distantes do centro do solo.	76
Figura 83 - Potencial elétrico em função do tempo para cada distância.	77
Figura 84 - Intensidade do campo elétrico no instante do pico da descarga.	77
Figura 85 - Intensidade do campo elétrico no instante do pico da descarga.	78
Figura 86 - Intensidade do potencial elétrico no instante do pico da descarga.	78
Figura 87 - Fluxograma explicativo da aplicação.	81
Figura 88 - Criação de novos projetos no HFSS.	82
Figura 89 - Inicialização do HFSS.	82
Figura 90 - Abertura de novo projeto.	82
Figura 91 - Salvamento automático no diretório designado.	83
Figura 92 - Pseudocódigo para criação de um projeto no HFSS.	84
Figura 93-Fluxograma para abertura projeto existente	85
Figura 94 - Pseudocódigo para abertura de projeto já existente.	85
Figura 95- Fluxograma para criação de novo projeto no HFSS	86
Figura 96 - Hastes de cobre. (a) Esboços; (b) Dimensões (ponto inicial e final)	87
Figura 97 - Solicitação de informações para modificar o comprimento da haste.	87

Figura 98 - Mudança nos parâmetros automática.	87
Figura 99 - Pseudocódigo para modificação de haste existente.....	88
Figura 100- Fluxograma explicativo para alteração do comprimento da haste.	89
Figura 101 - <i>Interface</i> da aplicação da malha unitária.	90
Figura 102 - Alterações na malha, antes e após a modificação	90
Figura 103 - Exemplo de implementação variáveis internas no HFSS	91
Figura 104 - Comprimento da malha. (a) Antes (b) Depois	91
Figura 105 - Resistividade do solo	92
Figura 106 - Resistividade do solo, após da mudança do usuário.....	92
Figura 107 - Pseudocódigo para alterações na malha de aterramento unitária.	93
Figura 108 - Fluxograma referente à alterações na malha unitária.....	94
Figura 109-Modelo 1 da malha de aterramento.....	95
Figura 110 - Modelo 2 da malha de aterramento.....	95
Figura 111 - Modelo 3 da malha de aterramento.....	95
Figura 112 - Requisições iniciais feitas ao usuário.	96
Figura 113 - Atribuição dos parâmetros.	97
Figura 114 - Modelo 2 gerado.	97
Figura 115 - Alterações dos parâmetros observados pelas variáveis internas.	97
Figura 116 - Pseudocódigo para escolha dos tipos de malha e seus parâmetros. ...	98
Figura 117 - Fluxograma relativo a escolha do modelo de malha.....	100
Figura 118 - Escolha da entrada da simulação.	101
Figura 119 - Entrada de uma forma de onda personalizada do usuário.	101
Figura 120 - Descarga personalizada gerada.....	102
Figura 121 - Atualização automática da forma de onda no HFSS.	102
Figura 122 - Pseudocódigo da escolha da entrada.	103
Figura 123- Fluxograma referente à escolha da descarga atmosférica.	104
Figura 124 - Informações requisitadas ao usuário na aplicação completa com o retorno da quantidade de retículos e seus comprimentos.	105
Figura 125 - Malha 30x30m gerada automaticamente no HFSS.	106
Figura 126 - A simulação inicia automaticamente.	107
Figura 127 - Pseudocódigo da aplicação completa.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Campo magnético no momento de pico simulado e calculado.75

Tabela 2 - Amplitudes teórica e simulada do campo elétrico e da tensão de passo. 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ESSS	<i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
HFSS	High-Frequency Structure Simulator
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
MEF	Método dos elementos finitos
SE	Subestação

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator de correção da corrente de pico
α	Constante 1 do método iterativo
β	Constante 2 do método iterativo
d	Distância entre o ponto de contato do raio no solo e o ponto em análise
$E(t)$	Intensidade do campo elétrico em função do tempo
I_{pico}	Valor de pico da corrente
$H(t)$	Intensidade do campo magnético em função do tempo
$I(t)$	Intensidade da corrente em função do tempo
T_{frente}	Tempo de frente de onda
T_{cauda}	Tempo de cauda de onda
r	Distância radial entre o condutor e o ponto calculado
ρ	Resistividade
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Geral	18
1.1.2	Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM ATERRAMENTO SUBMETIDO A CORRENTES ELÉTRICAS	21
2.2	A IMPORTÂNCIA DO ATERRAMENTO.....	23
2.3	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SUAS FORMAS DE ONDA.....	27
2.4	MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA INCIDÊNCIA DE DESCARGA DIRETAMENTE AO SOLO.....	29
2.5	UTILIZAÇÃO DO HFSS EM CONJUNTO COM UMA APLICAÇÃO EM <i>PYTHON</i>	30
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	34
3.1	FUNDAMENTOS PARA A SIMULAÇÃO	34
3.1.1	Ansys HFSS e modelo de simulação.....	34
3.1.2	Configuração tradicional do modelo 3D da malha de aterramento e solo	37
3.2	MODELO DO CABO DE DESCIDA E SUA VALIDAÇÃO	71
3.3	APLICAÇÃO <i>PYTHON</i> PARA MODELAGEM DE MALHAS DE ATERRAMENTO.....	79
3.3.1	Abertura de projetos no HFSS utilizando Python.	81
3.3.2	Modificação de parâmetros no HFSS	86
3.3.3	Alteração de um modelo de malha unitária e solo hemisférico	89
3.3.4	Escolha entre 3 modelos de malhas de aterramento pelo usuário	94
3.3.5	Escolha da forma de onda da descarga atmosférica de entrada da simulação.....	100
3.3.6	Aplicação completa	105
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	110
	REFERÊNCIAS.....	112
	APÊNDICES	115

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), descargas atmosféricas são descargas elétricas que atingem grandes áreas com alta intensidade, na faixa de quiloampères, provenientes do acúmulo de cargas elétricas localizadas na atmosfera, sobretudo, durante chuvas fortes e tempestades. Esse recorrente fenômeno da natureza traz inúmeros transtornos, principalmente no Brasil, visto que, segundo dados do INPE, é o país com o maior número de incidências de raios por ano, ultrapassando a marca de 77 milhões de raios por ano. Tamanha frequência acarreta inúmeros transtornos e riscos, tanto para vidas humanas, em média 100 pessoas morrem no Brasil por ano devido a descargas atmosféricas, como também prejuízos financeiros que chegam a mais de 100 milhões por ano, isso apenas no setor elétrico [2,3].

Adicionalmente, tais prejuízos se distribuem em vários setores da sociedade, a saber: na região rural, em que centenas de animais morrem por anos pela incidência de raios; além de incêndios florestais e em edificações, sobretudo em instalações de combustível; e à interrupção de serviços essenciais, como a distribuição de energia elétrica, cuja falta leva à interrupção da cadeia produtiva de indústrias, atendimento em hospitais, serviços de telecomunicações dentre outros [4].

Diante desse contexto, é fundamental o estudo de modelos de malhas de aterramento a fim de projetar novos modelos para mitigar os efeitos danosos das descargas atmosféricas e proporcionar segurança às pessoas e a equipamentos elétricos e eletrônicos sensíveis a surtos de corrente e tensão, haja vista que os sistemas de aterramento devem oferecer um caminho seguro de baixa impedância para a corrente oriunda de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e cargas carregadas na superfície de materiais metálicos [5].

Vista a pertinência do estudo referente à malha de aterramento, sobretudo na realidade da sociedade brasileira, a abordagem dessa temática deve continuar em expansão, de maneira que o *Ansys HFSS* se coloca como uma ferramenta importante para tais análises. Com isso, a metodologia desenvolvida de simulação nesse *software* contribui para pesquisa e estudo do comportamento das malhas de aterramen-

to frente às descargas atmosféricas, bem como um ponto de partida para tornar o projeto de aterramento mais eficiente.

Em concordância com o já exposto, a fim de tornar mais acessível e intuitivo para interessados como pesquisadores, alunos e professores, da área de estudo de malhas de aterramento e sua modelagem computacional dada sua demanda, desenvolveu-se uma aplicação em *Python* aliada ao HFSS. Essa aplicação permite ao usuário fornecer parâmetros elétricos e geométricos do solo, da malha de aterramento, e a forma de onda da descarga atmosférica, em que o próprio *software* seja capaz de gerar automaticamente o modelo eletro-geométrico da malha, incluindo o solo, preparando-os para simulação e subsequente obtenção dos dados e resultados. Consequentemente, por intermédio dessa aplicação, afasta-se a necessidade de conhecimento prévio do *software* HFSS pelo usuário, quanto à modelagem 3D.

1.1 Objetivos

Aqui serão apresentados o objetivo geral e os específicos deste trabalho de conclusão de curso, os quais nortearam todo o seu desenvolvimento, e conclusões.

1.1.1 Geral

Preparar e gerar malhas de aterramento utilizando uma aplicação desenvolvida em Python para a inserção automatizada no software HFSS.

1.1.2 Específicos

- Modelagem automática de malhas de aterramento: Elaboração de uma aplicação em Python em conjunto com o *software* HFSS a fim de automatizar a modelagem de malhas de aterramentos, inclusive do solo, de forma a auxiliar os usuários na construção do modelo 3D para simulações no HFSS sem a necessidade de prévia experiência de uso desse software.

- Validação da aplicação desenvolvida: Comparar o modelo gerado a partir da aplicação desenvolvida, com as leis do eletromagnetismo disponível na literatura, especialmente no que diz respeito ao campo magnético gerado por um condutor percorrido por corrente, a distribuição de campo elétrico em um solo atingido por uma descarga atmosférica, bem como o cálculo da tensão de passo em pontos específicos do solo.

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em quatro seções primárias. Na seção 2 é apresentada a fundamentação teórica, sendo na seção 2.1 apresentadas as características de um aterramento submetido a correntes elétricas. Na seção 2.2 são apresentados conceitos relacionados a importância de um aterramento na perspectiva da segurança. Em 2.3 são introduzidos conceitos sobre as descargas atmosféricas e a sua forma de onda. Em 2.4 é apresentado o modelo basilar do cabo de descida e do solo hemisférico, a partir dos quais será possível validar o modelo de simulação desenvolvido e a aplicação desenvolvida. Na subseção 2.5, é feita uma rápida introdução acerca do conceito da linguagem de programação *Python* e suas aplicações, bem como discorre sobre a possibilidade do uso de tal linguagem associado ao *software* de simulação HFSS.

Na seção 3 são apresentados os resultados obtidos. Inicialmente na seção 3.1, são apresentados os fundamentos que baseiam a simulação eletromagnética 3D no HFSS, bem como o modelo de simulação já desenvolvido em trabalho anterior de Iniciação Científica, além de ser apresentado o passo a passo para a construção de uma malha unitária com dimensões 3m x 3m no HFSS em solo hemisférico. Em 3.2, é realizada uma comparação dos resultados obtidos a partir do modelo simulado com os produzidos utilizando-se as equações eletromagnéticas disponíveis na literatura. As comparações são relativas aos parâmetros campo magnético, campo elétrico e tensão de passo. Em 3.3, é apresentada gradativa e sequencialmente a aplicação desenvolvida em *Python*, aliada ao HFSS, para a criação automática do modelo de simulação de malhas de aterramento quadradas em solo hemisférico.

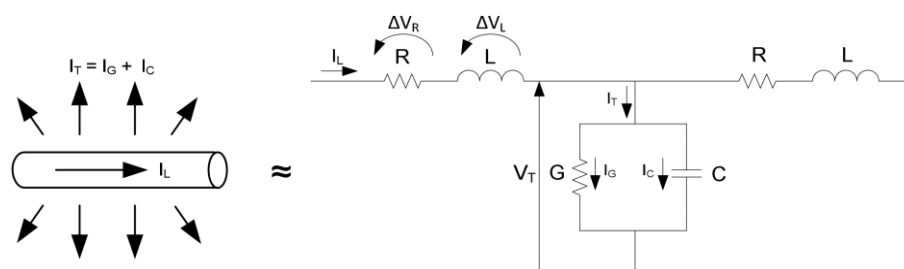
Na seção 4, são apresentadas as conclusões do presente trabalho, bem como sugestões para contribuições futuras correlatas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características gerais de um aterramento submetido a correntes elétricas

O aterramento é composto por elementos condutores enterrados no solo (eletrodo), que podem assumir diferentes configurações, dependendo das especificidades da aplicação na qual serão utilizados. Para analisar o comportamento de um aterramento submetido a correntes elétricas, pode-se utilizar um modelo simplificado baseado na teoria de circuitos. Nesse modelo, consideram-se efeitos de natureza resistiva, indutiva e capacitiva [6], como apresentado na Figura 1. A partir desse modelo, assume-se que a corrente que entra no aterramento tem duas componentes: a transversal (I_T) que se dispersa no solo e a longitudinal (I_L), que se propaga ao longo do eletrodo. A Figura 1 mostra o circuito equivalente de um trecho de eletrodo, ilustrando essas componentes. Na parte longitudinal, ocorrem perdas internas no condutor, além da formação de um campo magnético ao redor dos trajetos da corrente. Esses efeitos são representados por uma resistência (R) e uma indutância (L), as quais causam uma queda de potencial ao longo do eletrodo à medida que a corrente avança. A componente transversal está associada a correntes condutivas (I_G) e capacitivas (I_C) que se dispersam efetivamente no solo. É importante destacar que, segundo Alípio [7], a frequência da corrente e as propriedades do solo, como condutividade e permissividade elétrica, são fatores determinantes para essa dispersão. A modelagem desse comportamento é feita através de uma condutância (G) e de uma capacitância (C) dispostas em paralelo no circuito (ver Figura 1).

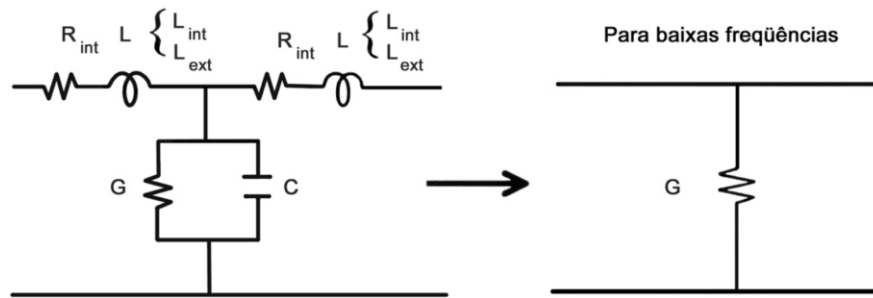
Figura 1 - Modelo T de representação de segmento de eletrodo e suas correntes



Fonte: adaptado de [7].

Em baixas frequências, como a da rede elétrica, os componentes reativos não exercem influência significativa na dispersão de corrente no solo. Além disso, as perdas associadas à resistência em série (R) são pequenas, sendo, também, desconsideradas. Neste contexto, o modelo é simplificado de modo que o aterramento pode ser representado apenas por uma condutância, conforme ilustrado na Figura 2. Assim, essa condutância é quem de fato determina a resistência de aterramento. Segundo Visacro [6], a resistência é determinada pela combinação de condutâncias em paralelo e varia de acordo com a geometria dos eletrodos e resistividade do solo.

Figura 2 - Circuito equivalente de segmento de eletrodo para baixas frequências



Fonte: retirado de [6].

A despeito de tal condição, quando o aterramento é submetido a uma corrente impulsiva, como a de uma descarga atmosférica, torna-se necessário avaliar a resposta do aterramento a partir do modelo completo. Neste caso, o aterramento apresenta uma impedância para cada frequência do espectro associado à forma de onda da corrente de uma descarga atmosférica, de modo que [8,9]

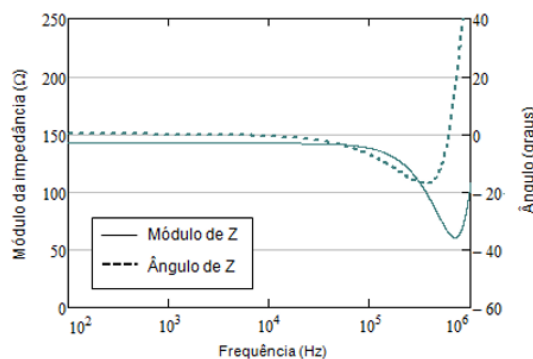
$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.1)$$

em que, Z é a impedância “vista” a partir do ponto de injeção da corrente [Ω], V é a tensão desenvolvida [V], I é a corrente injetada [A] e ω é a frequência angular da corrente [rad/s].

A impedância de aterramento caracteriza a oposição oferecida à entrada e dispersão de corrente no solo, sendo determinada para cada componente de frequência de uma onda impulsiva, definida pela equação (2.1). Neste caso, é também

chamada impedância harmônica [10,11,12,13]. Para evidenciar a variação da impedância com a frequência, a Figura 3 apresenta o gráfico da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 30 m de comprimento e raio de 0.7 cm, enterrado a 0.5 m de profundidade em um solo de $2400 \Omega.m$. O gráfico mostra que, para frequências de até aproximadamente 50 kHz, o módulo da impedância é aproximadamente constante e o ângulo é próximo de $\sim 0^\circ$, condição essa que está associada a uma resistência de aterramento. No entanto, em frequências mais altas, superiores a 50 kHz neste exemplo, essa condição muda, de modo que a impedância passa a apresentar características tanto capacitivas quanto indutivas, como evidenciado pela variação do ângulo. Portanto, caracterizar o aterramento apenas por meio de uma resistência é inadequado quando o fenômeno em questão é de natureza impulsiva, como ocorre em situações envolvendo descargas atmosféricas [7,9].

Figura 3 - Impedância harmônica de eletrodo ($L=30$ m; $r=7$ mm) em solo $2,4$ k $\Omega.m$



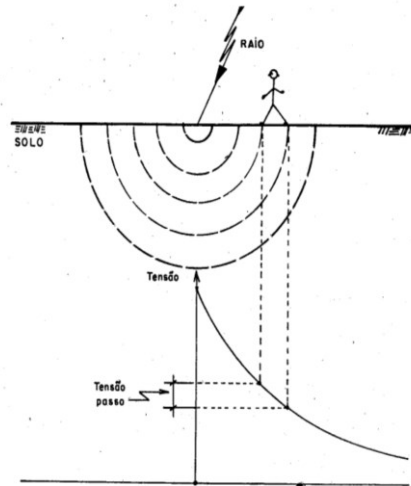
Fonte: retirado de [9].

2.2 A importância do aterramento

Quando uma corrente elétrica incide sobre o solo em um ponto específico, a região no entorno desse ponto fica sujeita à dispersão da corrente e, consequentemente, a uma distribuição de potencial. Consequentemente, há, também, uma distribuição de campo elétrico, cuja magnitude diminui conforme aumenta-se a sua distância do ponto de incidência. O conceito de tensão de passo surge dessa condição, de maneira que a diferença de potencial entre dois pontos do solo afastados por 1

metro (distância aproximada de um passo) é, por definição, denominada tensão de passo (ver Figura 4) [14].

Figura 4 - Ilustração da tensão de passo.

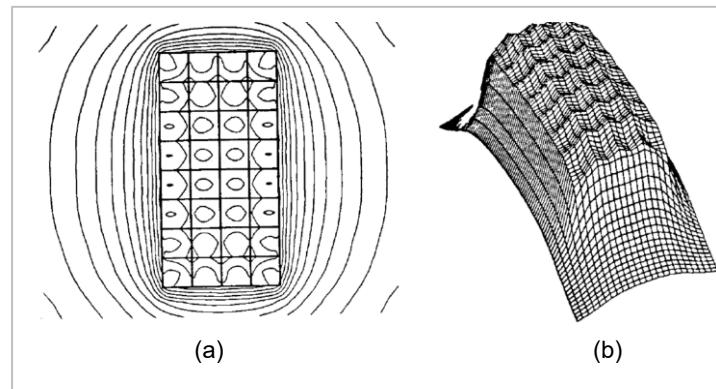


Fonte: retirado de [14].

A estrutura do aterramento elétrico é comumente desenvolvida por meio da utilização de condutores enterrados no solo. Dependendo da aplicação, podem ser constituídos por hastes de aço/cobre, cabos de aço cobrado com uma geometria reticulada (subestações), cabos contrapeso (estruturas de linhas de transmissão). A capacidade de esses aterramentos desempenharem suas funções está diretamente relacionada a fatores como, o tipo de solo no qual o eletrodo está enterrado, o formato do conjunto de hastes, suas dimensões, a conformação geométrica, a dimensão dos eletrodos, seus posicionamentos e o espaçamento entre eles [5,15].

Em uma subestação (SE), as malhas de aterramento são projetadas com o objetivo de equilibrar os potenciais desenvolvidos na superfície do solo por ocasião de uma falta [16,17]. No entanto, é importante destacar que, na prática, sempre haverá um certo gradiente de potencial ao longo da superfície. Ainda assim, desde que a malha seja devidamente dimensionada, as tensões máximas admissíveis não serão ultrapassadas [18]. A Figura 5 exibe a distribuição de potencial em uma malha típica.

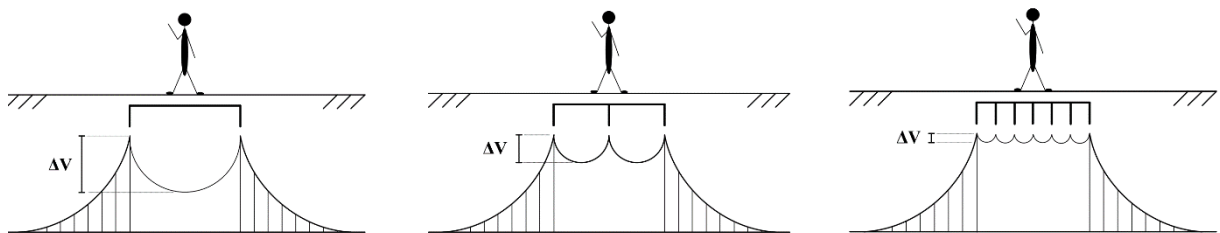
Figura 5 - Curvas de potencial em malha reticulada. Vistas: a) superior; b) 3D.



Fonte: adaptado de [17].

No interior da malha, onde circulam pessoas e estão instalados os equipamentos, a distribuição do potencial deve estar dentro dos limites aceitáveis, conforme definido em normas. Esse controle é garantido pelo correto dimensionamento dos retículos, pois, quanto maior for o retículo, maior será a variação do potencial em seu interior [17]. A Figura 6 apresenta uma ilustração que mostra a variação do potencial em função do tamanho dos retículos, evidenciando que a diferença de potencial entre dois pontos diminui, à medida que, os retículos se tornam menores.

Figura 6 - Distribuição de potencial em relação à dimensão dos retículos



Fonte: retirado de [19].

O fato de as partes metálicas internas, de uma subestação, estarem aterradas torna essencial avaliar os riscos relacionados à diferença de potencial desenvolvida entre essas partes e a superfície do solo durante o escoamento de correntes elétricas para o aterramento local. Esse cenário está relacionado ao conceito de tensão de toque, sendo definida como a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto na superfície do solo, separado por uma distância horizontal

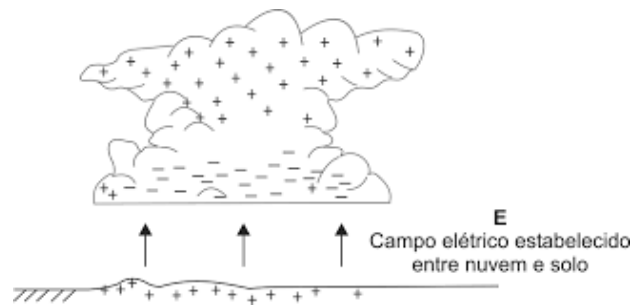
2.3 Descargas atmosféricas e suas formas de onda

Definem-se descargas atmosféricas como descargas elétricas de grande extensão e intensidade, de maneira a ser visível por um clarão azul denominado relâmpago, o qual pode vir acompanhado por uma intensa onda sonora, denominada de trovão. Elas são provenientes da elevada diferença de potencial entre as nuvens e o solo, de maneira que a concentração e distribuição de cargas geram o gradiente elétrico, que, por sua vez, pode romper a isolamento do ar, e subsequentemente, gerar um alto fluxo de corrente elétrica entre a nuvem e o solo (ou vice e versa) [3,24].

Os resultados de simulações no *software* HFSS, sobre o desempenho de malhas de aterramento, requerem entender a curva característica de uma descarga atmosférica, e seus parâmetros, a qual será o sinal de *input* nas referidas simulações.

A Figura 8 ilustra a distribuição das cargas na nuvem e solo, e na Figura 9 tem-se uma imagem real de uma extensa descarga atmosférica.

Figura 8 - Distribuição das cargas geradoras de descargas nas nuvens



Fonte: retirado de [15].

Figura 9 - Foto real de uma descarga atmosférica



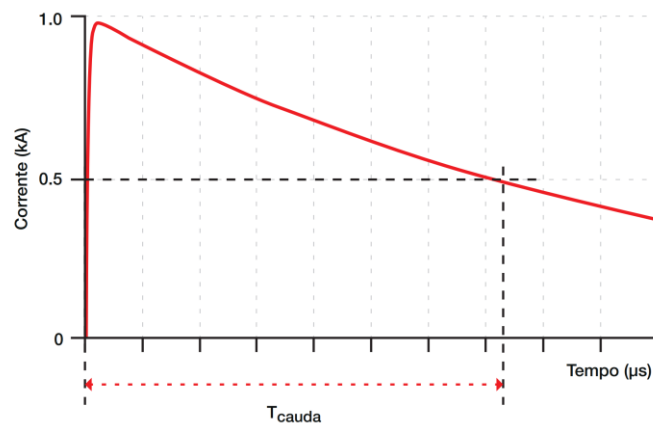
Fonte: retirado de [24]

Dentre os parâmetros que caracterizam uma descarga atmosférica estão:

- o valor de pico de corrente (I_{pico}), que pode variar entre 1 kA até 200 kA;
- o tempo de frente de onda (T_{frente}), que consiste no espaço de tempo entre o início da onda até quando ela atingir entre 90-100% do I_{pico} . Essa porcentagem varia na literatura;
- o tempo de meia onda ou o tempo de cauda da onda (T_{cauda}), referindo-se ao tempo necessário para da onda atingir 50% de I_{pico} .

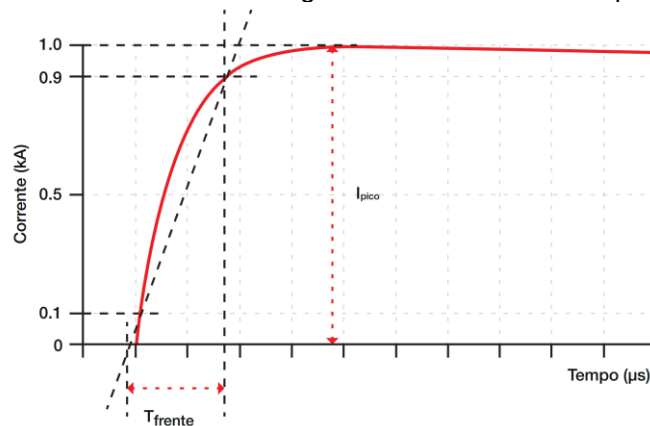
Esses parâmetros podem ser observados nas Figura 10 e Figura 11, as quais destacam o T_{cauda} e T_{frente} juntamente com o I_{pico} , respectivamente [24,4].

Figura 10 - Forma de onda da descarga atmosférica destacando o T_{cauda}



Fonte: retirado de [4]

Figura 11 - Forma de onda da descarga atmosférica com destaque no T_{frente} e I_{pico}



Fonte: retirado de [4]

Adicionalmente, pode-se modelar, de maneira aproximada, a forma de onda de uma descarga atmosférica por meio de uma dupla exponencial, como mostra a Equação (2.1). Vale ressaltar que a forma de onda, utilizada como *input* nas simulações que serão apresentadas no desenvolvimento, foi modelada mediante o modo iterativo de [25], em cujo trabalho têm-se mais detalhes [26,27].

$$I(t) = AI_{pico}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2)$$

$$\beta \cong \frac{1}{T_{frente}} \quad (2.3)$$

$$\alpha \cong \frac{1}{T_{cauda}} \quad (2.4)$$

em que, A é um fator de correção para o valor da corrente de pico; α e β são obtidos iterativamente com o valor inicial aproximado, dados pelos valores de T_{frente} e T_{cauda} respectivamente, conforme as equações (2.3) e (2.4).

2.4 Modelagem eletromagnética para incidência de descarga diretamente ao solo

Para os propósitos deste trabalho, é necessário utilizar um modelo de referência já validado na literatura para que possa ser utilizado os resultados obtidos no *software* HFSS. Para este propósito, optou-se por utilizar um modelo que consiste em um cabo de descida de cobre conectado a um bloco de solo hemisférico, conforme já ilustrado na Figura 16 [28]. Por meio deste modelo, será possível avaliar a consistência dos resultados obtidos nas simulações que serão realizadas.

Primeiramente, tem-se que pela Lei de Ampère, um fio retilíneo percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético com direção e sentido definidos pela regra da mão direita, e módulo, aproximando-o para um fio infinito, dado pela Equação (2.5) [29].

$$H(t) = \frac{I(t)}{2\pi r} \quad (2.5)$$

Em que: $I(t)$ e $H(t)$ são, respectivamente, as intensidades de corrente e campo magnético em função do tempo; r é a distância radial entre o condutor e o ponto calculado.

Quando o solo é atingido pela descarga atmosférica, gera-se em cada ponto do solo um valor de campo elétrico, que pode ser calculado pela Equação (2.6) [28].

$$E(t) = \frac{I(t)\rho}{2\pi d^2} \quad (2.6)$$

em que, $E(t)$ é o campo elétrico, $I(t)$ é a corrente da descarga; ρ é a resistividade do solo, e d é a distância entre o ponto de contato do raio no solo e o ponto específico no qual se quer determinar o valor do campo elétrico. Ressalta-se que, para o cálculo do campo elétrico, considera-se o cabo de descida um condutor ideal. Por fim, utilizando-se a Equação (2.7), pode-se calcular a tensão entre dois pontos da superfície do solo, o que consiste em uma simplificação da equação do potencial na forma integral (equação (2.8)), visto que a resistividade do solo é constante [14,28,29,30].

$$U(t) = \frac{I(t)\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) = E_1(t)d_1 - E_2(t)d_2 \quad (2.7)$$

$$U(l) = - \int_{d_1}^{d_2} E(l) dl \quad (2.8)$$

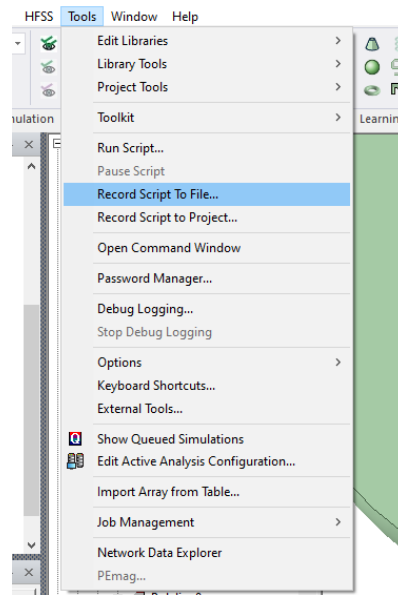
2.5 Utilização do HFSS em conjunto com uma aplicação em *Python*

Python é uma linguagem de programação orientada a objetos de alto nível, caracterizada por sua simplicidade e facilidade de uso ao não exigir uma sintaxe altamente complexa para o desenvolvimento de projetos. Suas aplicações são amplamente variadas, destacando-se pela facilidade de aprendizado em comparação com linguagens de baixo nível. Sua capacidade multiplataforma e a extensa disponibilidade de módulos de extensão e bibliotecas permitem otimizar e flexibilizar seu uso

para diferentes tipos de aplicações. Exemplos da relevância de seu uso incluem aplicativos internacionais como *Dropbox*, *Reddit* e *Instagram*, sendo amplamente reconhecida e difundida na comunidade científica [30,31,32].

A utilização do software HFSS em conjunto com uma aplicação Python para modelagem automática de malhas de aterramento é uma técnica bastante interessante, sendo possível seu uso em diversas outras abordagens e aplicações relacionadas ao tema. Outrossim, o HFSS, por sua vez, permite que todos os seus comandos executados em sua interface gráfica sejam gravados e convertidos em linhas de código *Python*, o que potencializa a ferramenta de simulação eletromagnética para diversas aplicações. Observa-se tal funcionalidade em sua *interface* gráfica, clicando em *Tools* → *Record Script to File*. Esse comando é apresentado na Figura 12, de maneira que abre-se uma janela para o usuário escolher o diretório para salvar um arquivo *.py* referente a gravação em linhas de código de todas as ações que forem efetuadas a partir do momento em que se inicia a gravação na *interface* gráfica do HFSS, ou seja, é salvo desde o desenho da geometria do modelo, até as alterações nos parâmetros de simulação, bem como o comando de fato para que a compilação seja efetuada. Ressalta-se que o arquivo *.py* terminará de ser escrito quando o usuário clicar na opção *Tools* → *Stop Script Recording*. Na Figura 13, é apresentado o exemplo de um simples código escrito pelo próprio HFSS, para a criação de uma simples linha [33].

Figura 12 - Obtenção de linhas de código em Python com as alterações no HFSS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 13 - Arquivo .py escrito pelo HFSS para criação de uma linha.

```
# Script Recorded by Ansys Electronics Desktop Student Version 2023.2.0
# 14:38:42 jun 10, 2024
import ScriptEnv
ScriptEnv.Initialize("Ansoft.ElectronicsDesktop")
oDesktop.RestoreWindow()
oProject = oDesktop.SetActiveProject("Project4")
oDesign = oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign1")
oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
oEditor.CreatePolyline(
[
  "NAME:PolylineParameters",
  "IsPolylineCovered:=", True,
  "IsPolylineClosed:=", False,
  [
    "NAME:PolylinePoints",
    [
      "NAME:PLPoint",
      "X:=", "0meter",
      "Y:=", "0meter",
      "Z:=", "0meter"
    ],
    [
      "NAME:PLPoint",
      "X:=", "0meter",
      "Y:=", "6meter",
      "Z:=", "0meter"
    ]
  ],
  [
    "NAME:PolylineSegments",
    [
      "NAME:PLSegment",
      "SegmentType:=", "Line",
      "StartIndex:=", 0,
      "NoOfPoints:=", 2
    ]
  ]
],
[
```

```

        "NAME:PolylineXSection",
        "XSectionType:="      , "None",
        "XSectionOrient:="    , "Auto",
        "XSectionWidth:="     , "0meter",
        "XSectionTopWidth:="  , "0meter",
        "XSectionHeight:="    , "0meter",
        "XSectionNumSegments:=" , "0",
        "XSectionBendType:="   , "Corner"
    ]
],
[
    "NAME:Attributes",
    "Name:="      , "Polyline10",
    "Flags:="     , "",
    "Color:="     , "(143 175 143)",
    "Transparency:=" , 0,
    "PartCoordinateSystem:=" , "Global",
    "UDMId:="     , "",
    "MaterialValue:=" , "\"vacuum\"",
    "SurfaceMaterialValue:=" , "\"\"",
    "SolveInside:=" , True,
    "ShellElement:=" , False,
    "ShellElementThickness:=" , "0meter",
    "ReferenceTemperature:=" , "20cel",
    "IsMaterialEditable:=" , True,
    "UseMaterialAppearance:=" , False,
    "IsLightweight:=" , False
])
oProject.Save()

```

Fonte: Próprio autor (2024).

Analogamente, assim como se tem a possibilidade de gravar em linhas de código todas as ações executadas na interface gráfica do HFSS em arquivos *.py*, é possível também seguir o caminho inverso. Utiliza-se de um arquivo *.py*, conforme os padrões utilizados pelo HFSS, para promover ações na interface do *software*, tais como modelar a geometria, executar comandos, dentre outras possibilidades. Para isso, pode-se seguir o caminho *Tools → Run Script* (ver Figura 12).

Em suma, através de uma aplicação *Python* no HFSS, é possível gerar novos arquivos, alterar parâmetros de arquivos existentes, modelar e obter resultados, sem a necessidade de interagir com a interface gráfica do HFSS. Portanto, o seu uso proporciona eficiência auxiliando aos usuários no desenvolvimento de pesquisas e estudos na área de aterramento elétrico. Entretanto, esta ferramenta pode ser amplamente aplicada a diversos outros tipos de modelos de simulação em diferentes áreas.

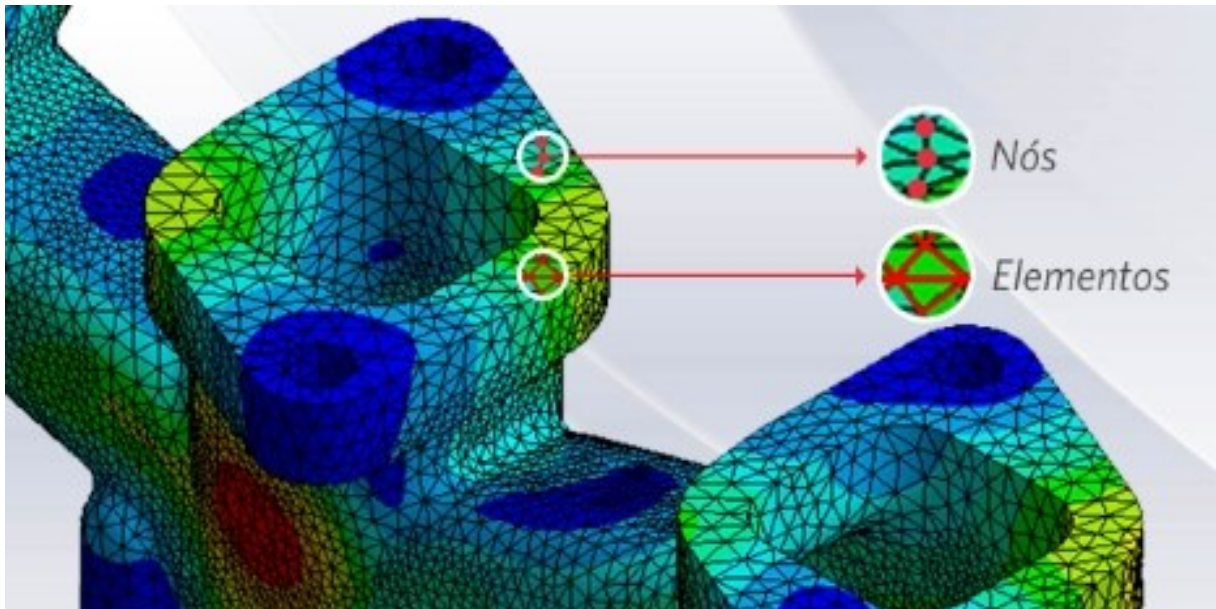
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 Fundamentos para a simulação

3.1.1 Ansys HFSS e modelo de simulação

A ferramenta utilizada para as simulações eletromagnéticas 3D, como já adiantada na introdução, é o *software* Ansys HFSS, de modo que entender os conceitos que fundamentam a ferramenta é uma condição necessária para guiar a estratégia de modelagem e simulação. Nessa perspectiva, a estratégia de simulação empregada pelo *software* baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF), conforme descrito pela empresa *Engineering Simulation and Scientific Software* (ESSS). Essa técnica consiste na subdivisão da geometria a ser analisada em partes menores, chamadas elementos, subdividindo assim, um problema complexo em várias partes mais simples. Esses elementos são conectados uns com os outros mediante nós, e o conjunto é denominado de malha. Cada elemento é modelado por equações que descrevem seu comportamento eletromagnético, cujas soluções são determinadas mediante método numérico, de maneira que quanto mais elementos existirem no modelo de simulação, mais precisa será o cálculo computacional. Entretanto, isso implica em maior esforço computacional. Em outras palavras, por intermédio do MEF, discretiza-se todo o modelo em pequenas regiões, as quais, mediante determinadas condições de contorno, são modeladas através de equações diferenciais e integrais que são simplificadas em uma matriz de equações polinomiais, cujas soluções, são obtidas computacionalmente. Na Figura 14, pode-se observar de maneira ilustrativa a técnica, MEF [34,25,35].

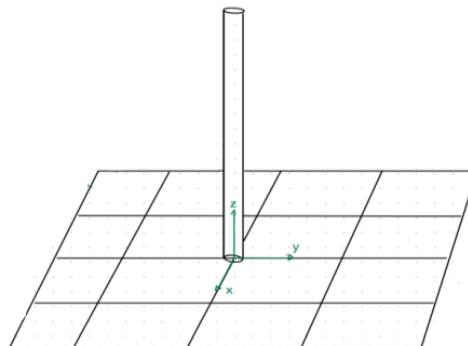
Figura 14 - Ilustração do Método dos Elementos Finitos



Fonte: retirado de [34]

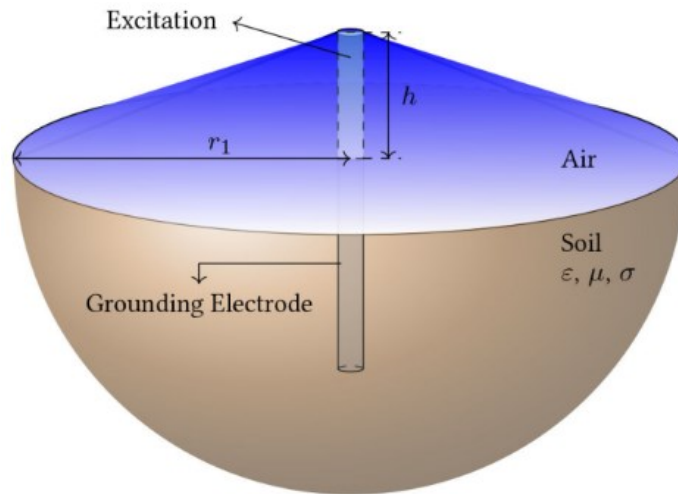
Na Figura 15 é apresentada a representação esquemática de um aterramento utilizado em subestações, caracterizado pelo cabo de descida conectado à malha. Adicionalmente, para a modelagem no *software* HFSS, é importante estabelecer o modelo de solo no qual os eletrodos serão enterrados. Em concordância com [28], utiliza-se um modelo que considera um solo hemisférico no entorno do eletrodo, conforme ilustrado na Figura 16, tal escolha se dar pelo fato desse modelo de solo ser modelado na literatura, conforme observado na fundamentação, de forma a possibilitar a sua validação.

Figura 15 - Ilustração de uma malha de aterramento tradicional.



Fonte: Próprio autor (2023).

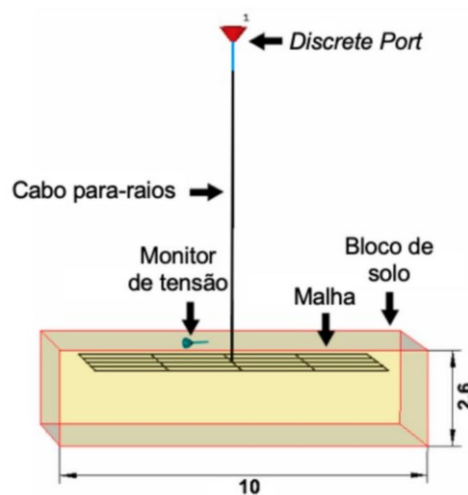
Figura 16 - Modelo de solo hemisférico com o cabo de descida



Fonte: retirado de [28].

Introduzido o modelo da malha de aterramento e solo, parte-se para a construção do modelo no *software* de simulação HFSS. Dessa forma, é apresentada na Figura 17 uma configuração de simulação genérica de uma malha de aterramento conectada a um cabo por onde desce uma corrente elétrica. Neste exemplo, a *discrete port* diz respeito à porta para a injeção da corrente e o monitor de tensão obtém as tensões nos pontos a serem analisados. Baseada nessa configuração genérica, é construído o modelo 3D no *software* [25].

Figura 17 - Exemplo de configuração de simulação de malhas de aterramento.



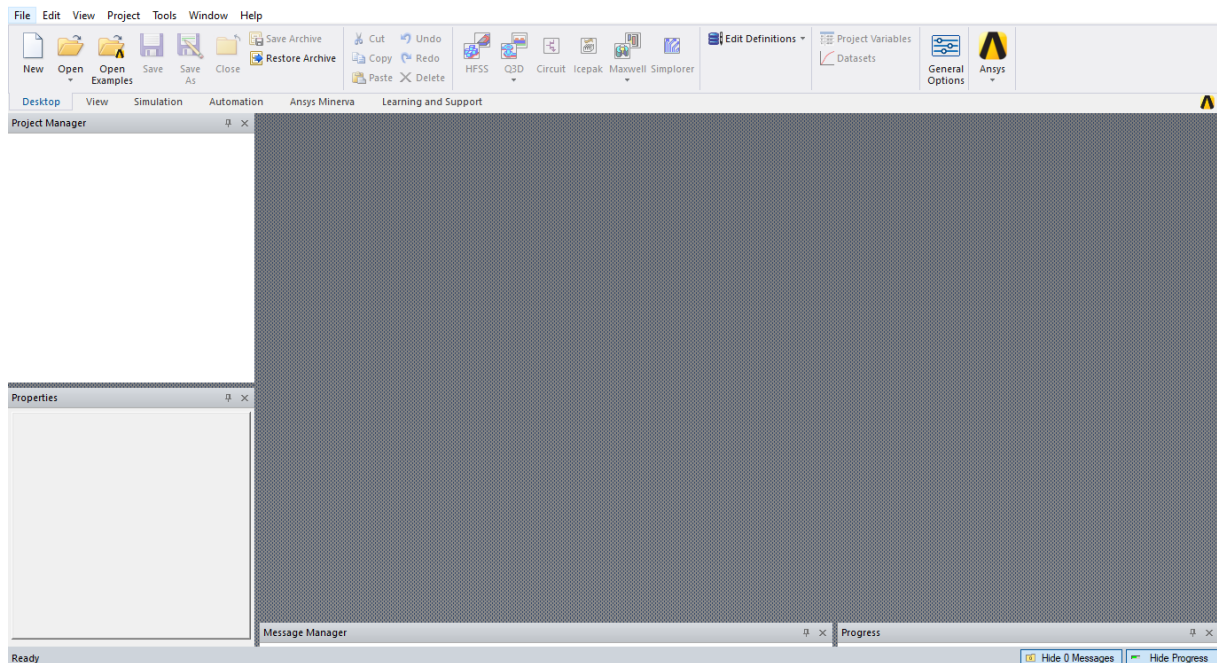
Fonte: retirado de [25]

3.1.2 Configuração tradicional do modelo 3D da malha de aterramento e solo

Nessa etapa será apresentado todo o passo a passo para a construção do modelo de uma malha de aterramento tradicional no HFSS. Ressalta-se que esse modelo foi utilizado para o projeto de Iniciação Científica do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) 2022/2023.

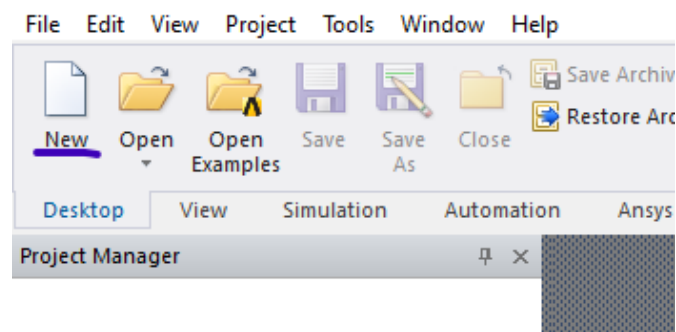
Inicialmente, tem-se a abertura do *software* *Ansys Electronics* (ver Figura 18). Posteriormente, cria-se um projeto clicando em 'new' (Figura 19), e imediatamente o novo projeto é criado (Figura 20). Entretanto, o *software* com o qual será feito o modelo é o HFSS. Dessa maneira, clica-se no seu símbolo na parte superior da tela (Figura 21) e automaticamente é criado um design HFSS (Figura 22).

Figura 18 - Tela inicial do *software*.



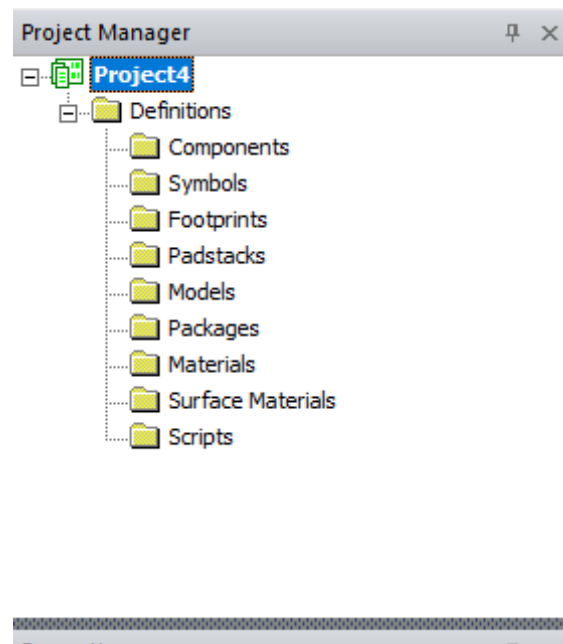
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 19 - Criação de um novo projeto.



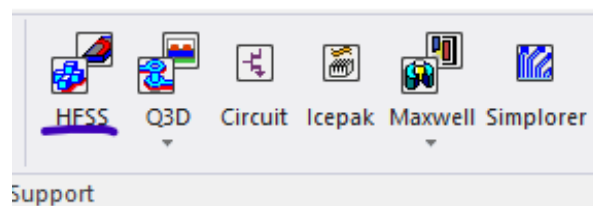
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 20 - Novo projeto criado.



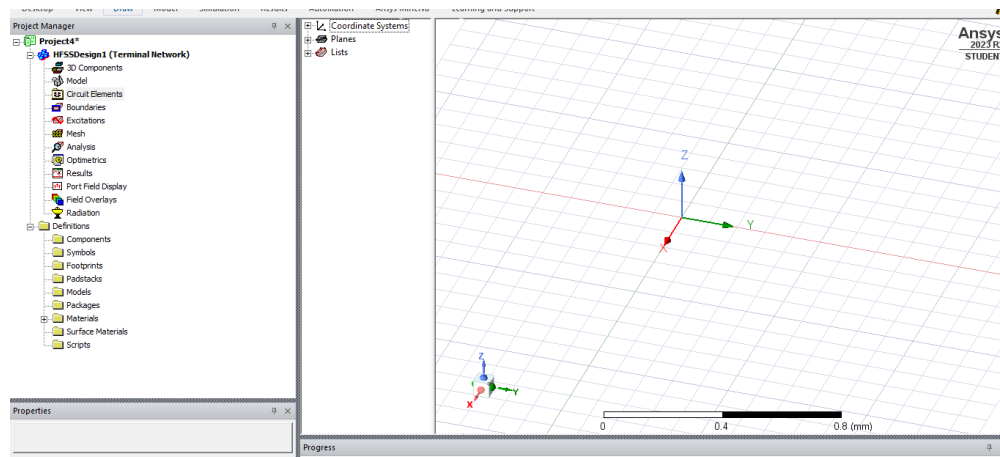
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 21 - Criar um design HFSS.



Fonte: Próprio autor (2024).

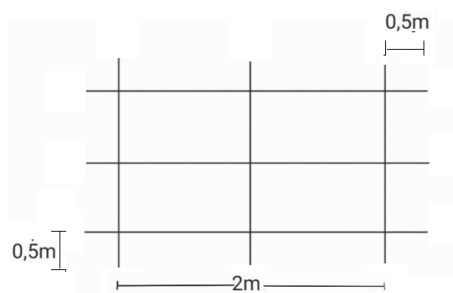
Figura 22 - Novo design HFSS criado.



Fonte: Próprio autor (2024).

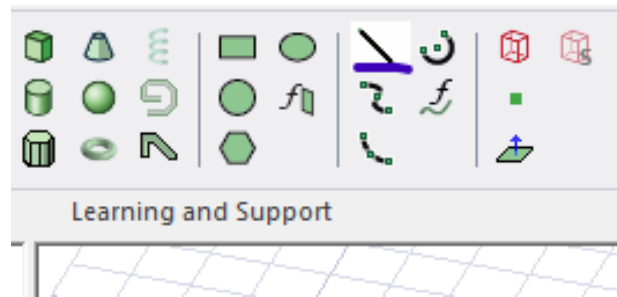
Nesta etapa, apresenta-se a construção da malha de aterramento no *software*. Para tanto, são criadas linhas que representam os condutores, levando-se em conta uma malha de aterramento unitária 3x3m, como mostrado na Figura 23. As sobras das malhas de 0,5m têm o intuito de tornar o modelo replicável espacialmente. Dessa forma, serão feitas 6 linhas referentes às 6 hastes da malha unitária, as quais são criadas clicando em *draw line* (Figura 24), podendo ser inseridas manualmente clicando-se nos pontos de início e fim desta. Para confirmar a linha gerada, clica-se no botão direito do *mouse* e escolhe-se a opção *done*, conforme Figura 25 e Figura 26. Outra maneira de inserir as coordenadas dos pontos de início e fim da linha é após a sua criação. Seguindo o passo anterior, clica-se duas vezes em *create line* e assim será aberta uma janela na qual será possível alterar manualmente, tal como mostrado na Figura 27 e Figura 28.

Figura 23 - Esboço da malha a ser construída.



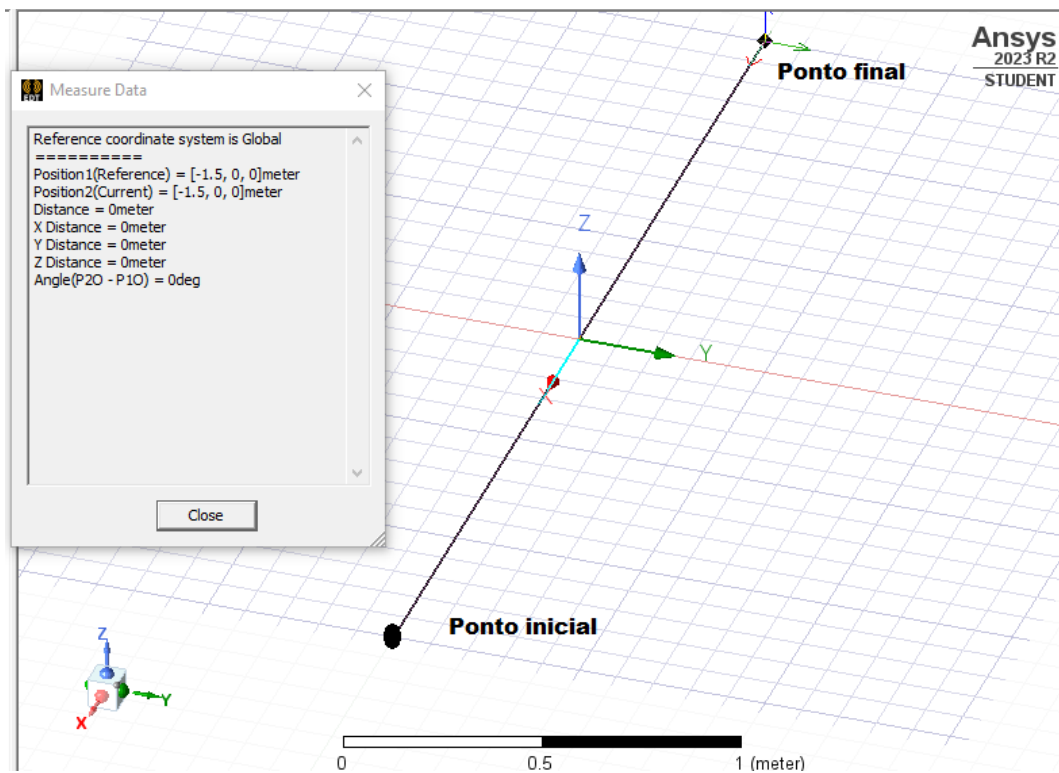
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 24 - Criar linhas no HFSS.



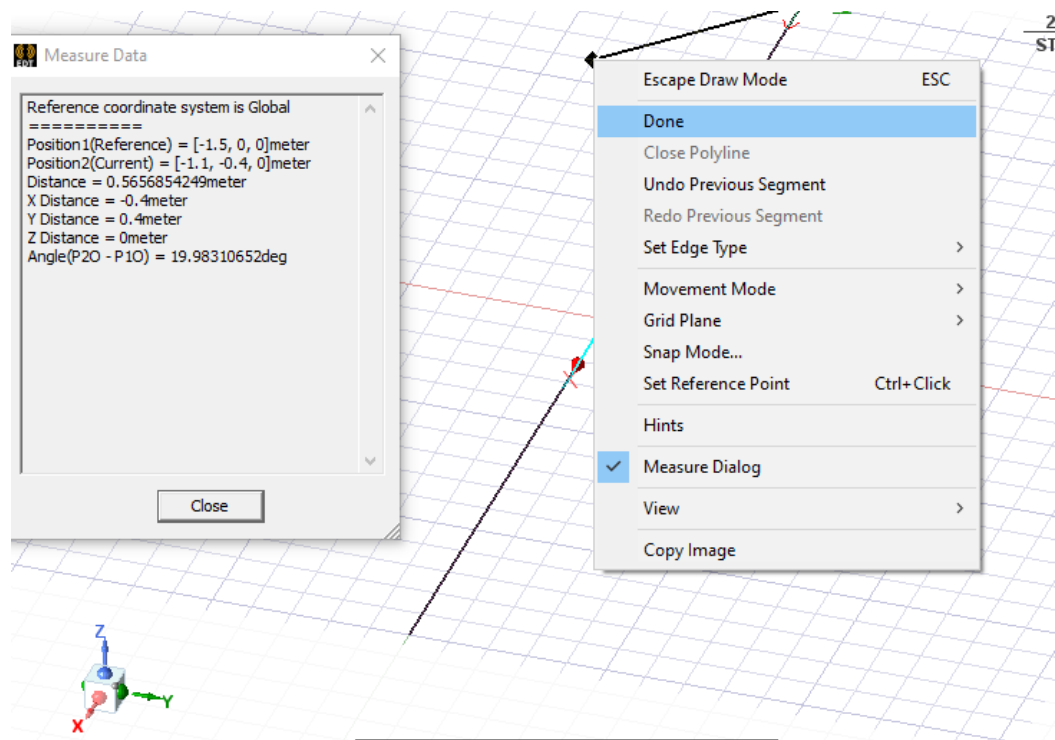
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 25 - Escolha dos pontos iniciais e finais da linha.



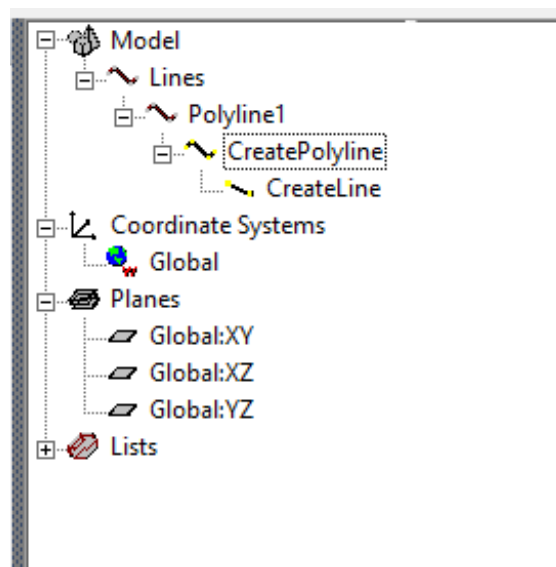
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 26 - Confirmação da criação da linha em *done*.



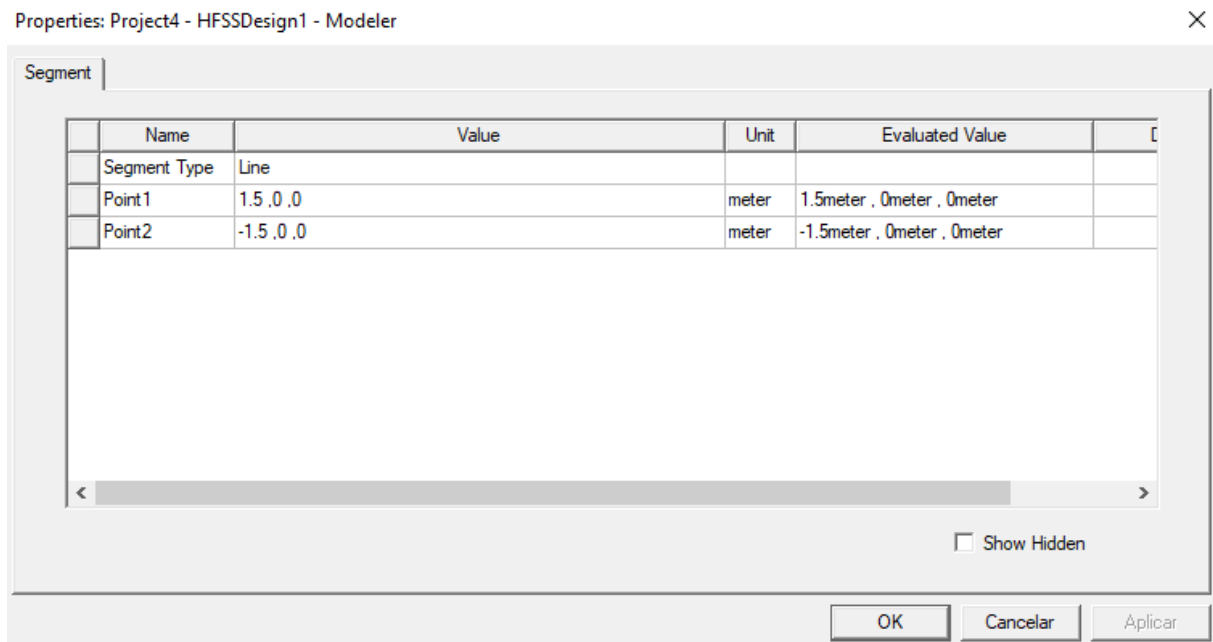
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 27-Linha criada.



Fonte: Próprio autor (2024).

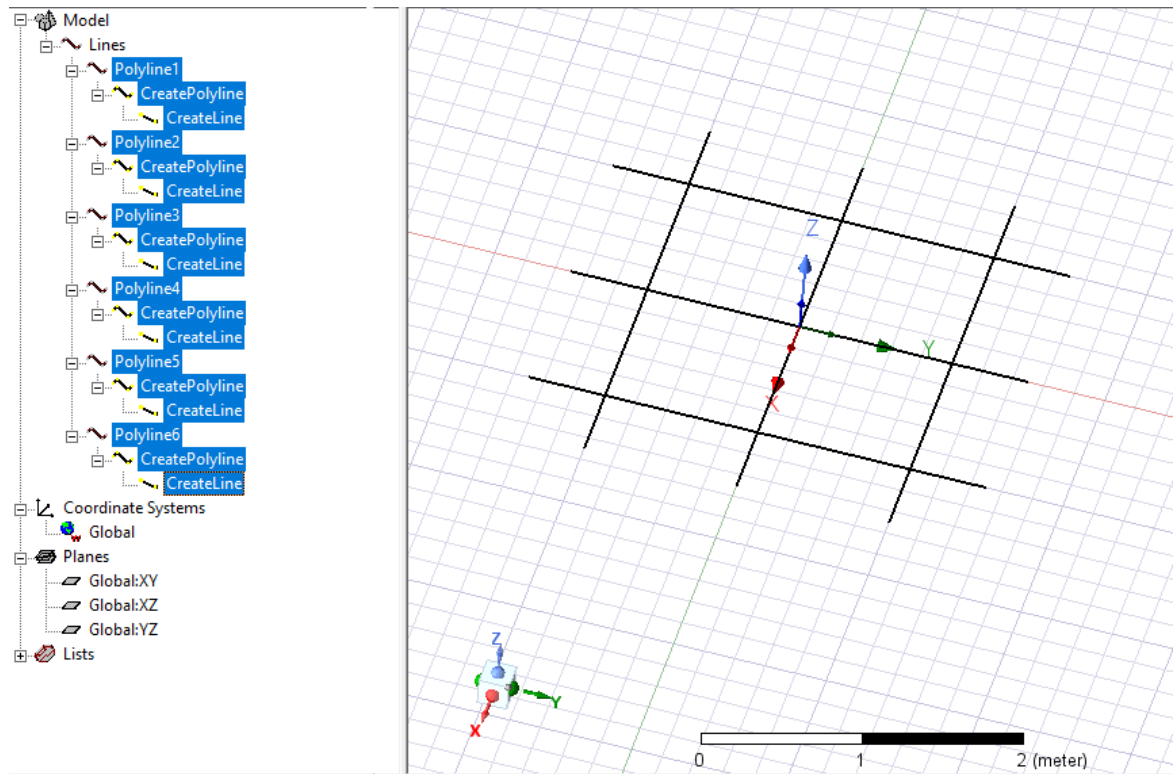
Figura 28 - Alterar coordenadas manualmente em *createLine*.



Fonte: Próprio autor (2024).

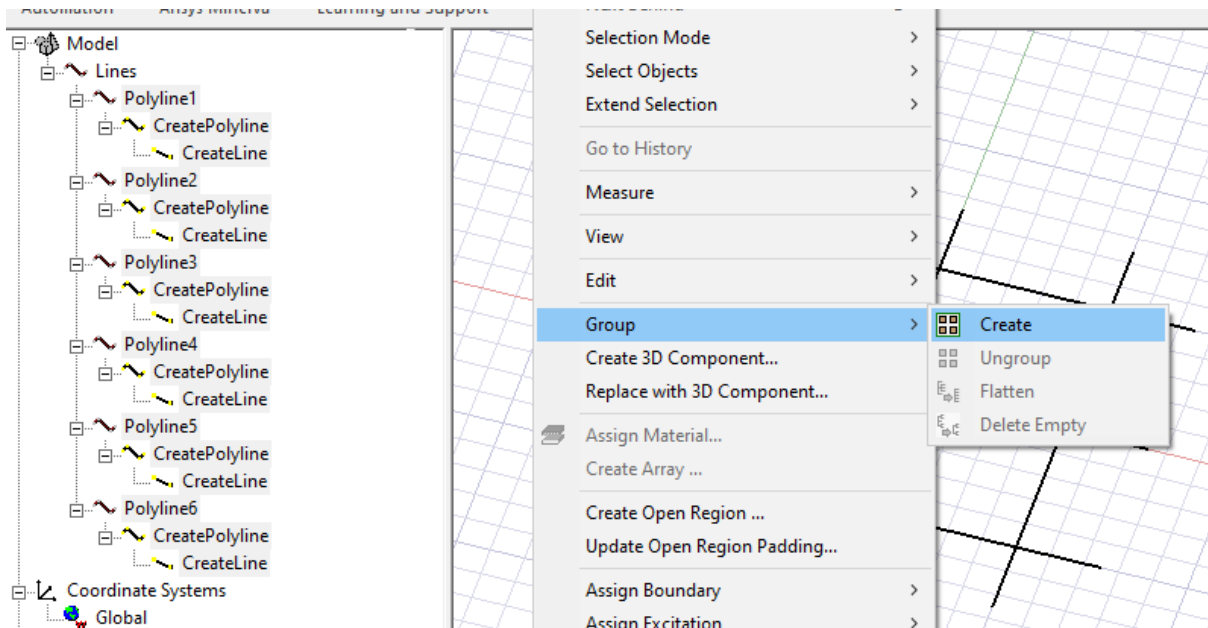
Aplicando esses métodos para todas as 6 hastes, tem-se o modelo construído, assim como evidenciado na Figura 29. Pode-se ainda agrupar todas as hastes criadas em um grupo chamado “Malha”, mediante o caminho exposto nas Figura 30, Figura 31a e Figura 31b, Figura 32a e Figura 32b. Sempre será possível renomear os elementos clicando com o botão direito no elemento e posteriormente clicando em *Properties*, de maneira que se abre uma janela na qual se pode alterar o nome.

Figura 29 - Criação do modelo da malha de aterramento.



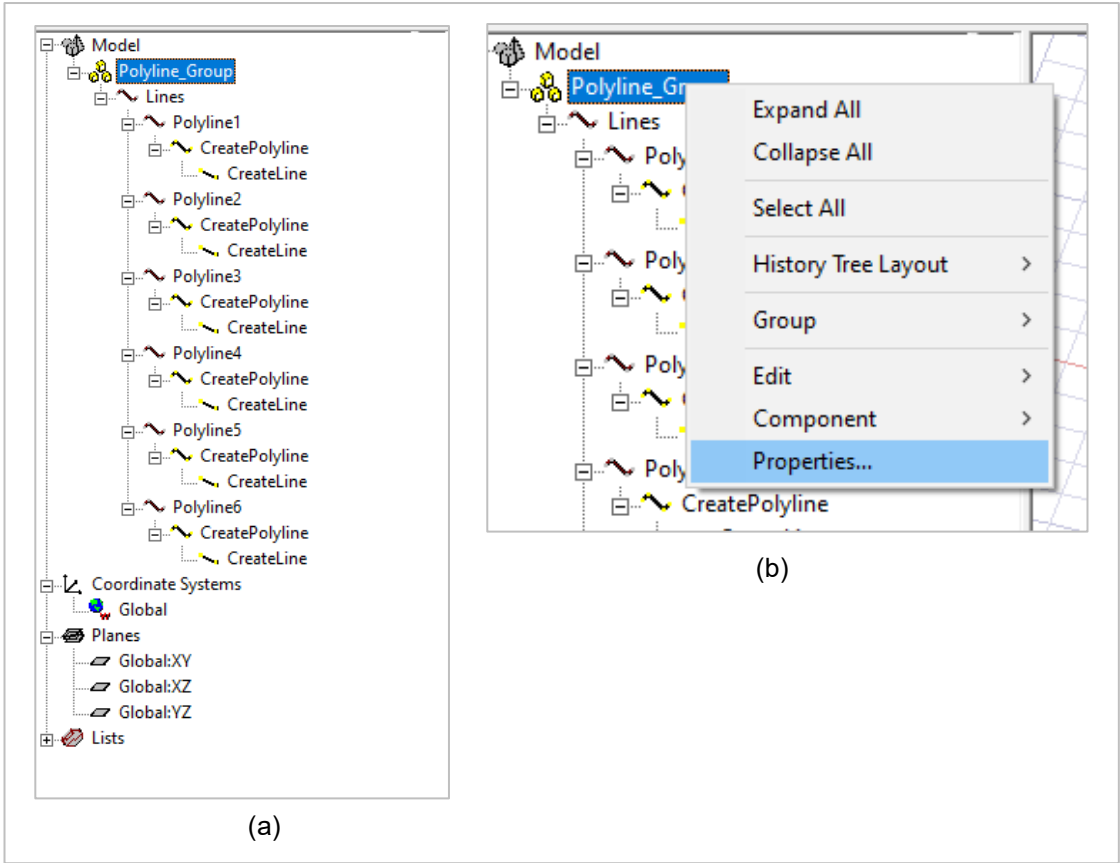
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 30 - Agrupar todas as linhas em um grupo.



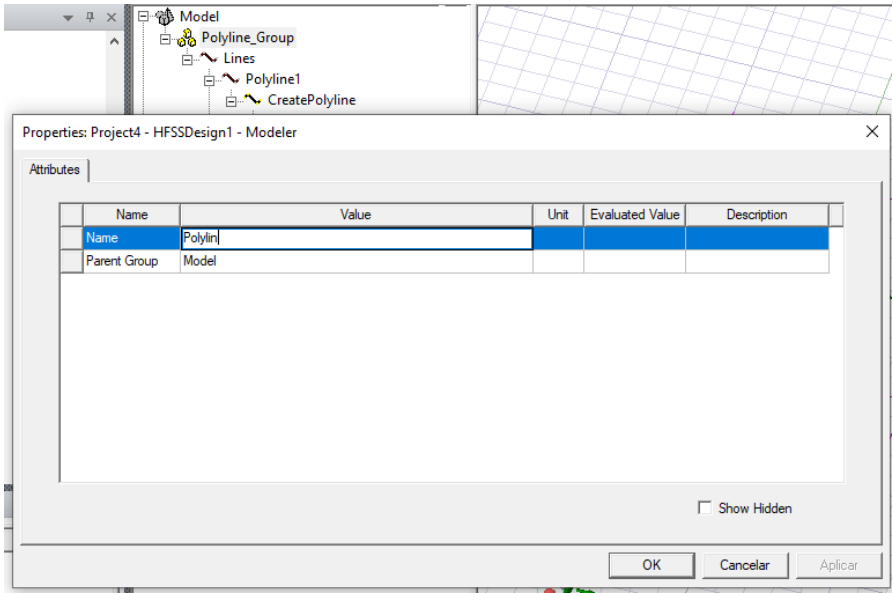
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 31 - Alterar nome do grupo. a) Criação b) Renomear em *Properties*.

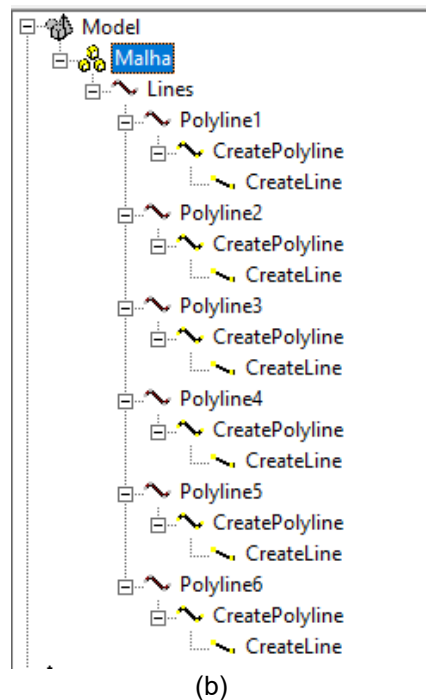


Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 32 - Alteração do nome do grupo. a) Alteração b) Grupo renomeado.



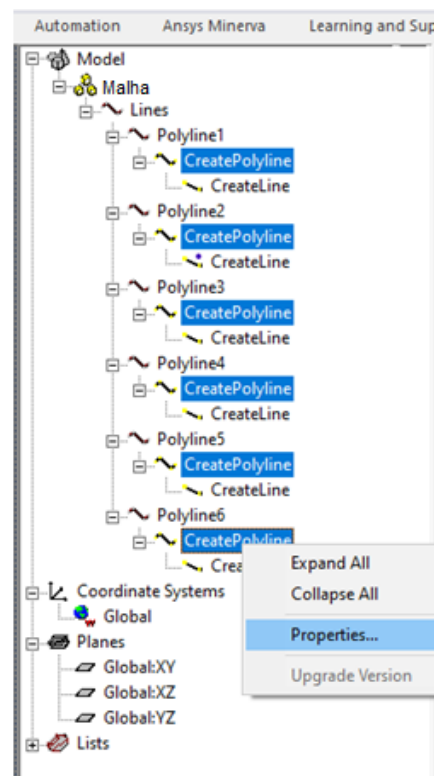
(a)



Fonte: Próprio autor (2024).

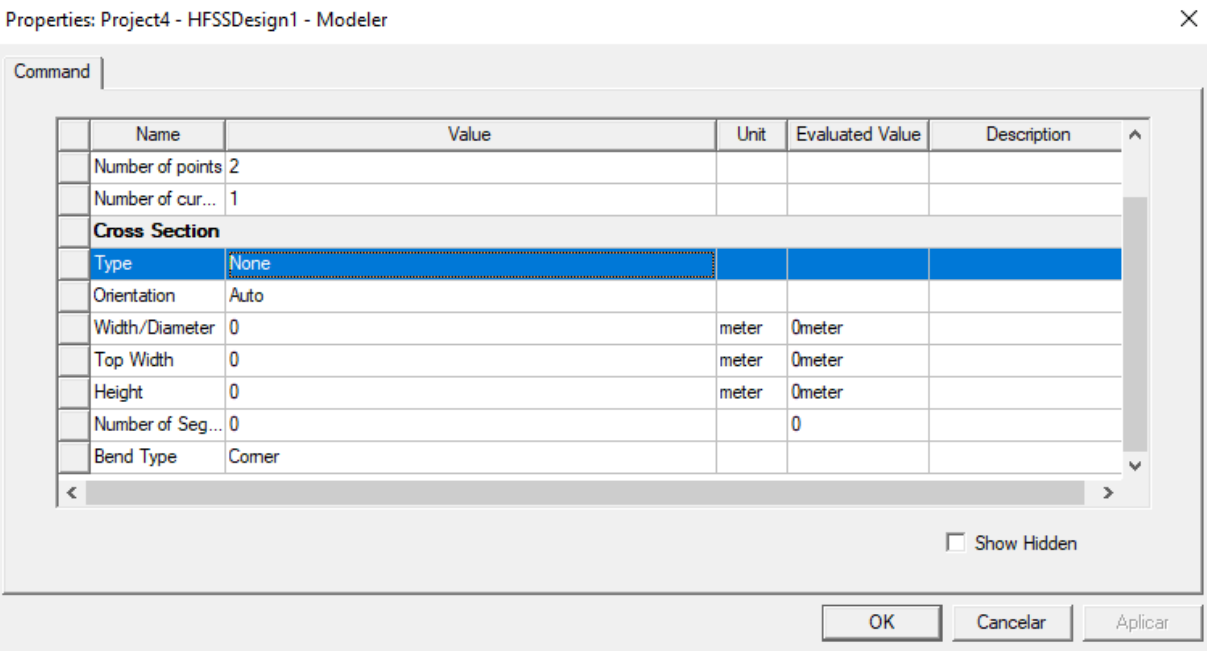
Até a presente etapa, há apenas linhas para designar a malha, como exibido na Figura 29. As hastes que presentes na malha de aterramento, entretanto, são cilíndricas, exigindo, portanto, a inserção do valor do raio da seção transversal dos condutores. Para tanto, pode-se inicialmente selecionar de cada *Polyline*, a opção *CreatePolyline*. Mais especificamente, isso é feito em suas *properties* (propriedades), que para serem acessadas, basta apenas clicar no botão direito do *mouse* do elemento em questão. Na diretiva “*properties*”, podem-se alterar vários parâmetros na geometria da linha, conforme evidenciado na Figura 33, em que se seleciona todas as “*CreatePolyline*” ao mesmo tempo, e são acessadas suas propriedades. Na Figura 34, há os parâmetros que podem ser alterados referentes às suas propriedades geométricas. Assim, na seção “*Cross Section*”, pode-se alterar em “*type*” a área transversal da linha para *circle*, e em *width/diameter*, é possível alterar o diâmetro do círculo, ajustando, assim, a geometria da haste em um cilindro. Ajustou-se inicialmente o diâmetro para 12 mm, conforme Figura 35 (a), e na Figura 35 (b), evidencia-se o formato cilíndrico em uma das hastes.

Figura 33 - Seleção dos “CreatePolyline” para alteração da geometria simultânea.



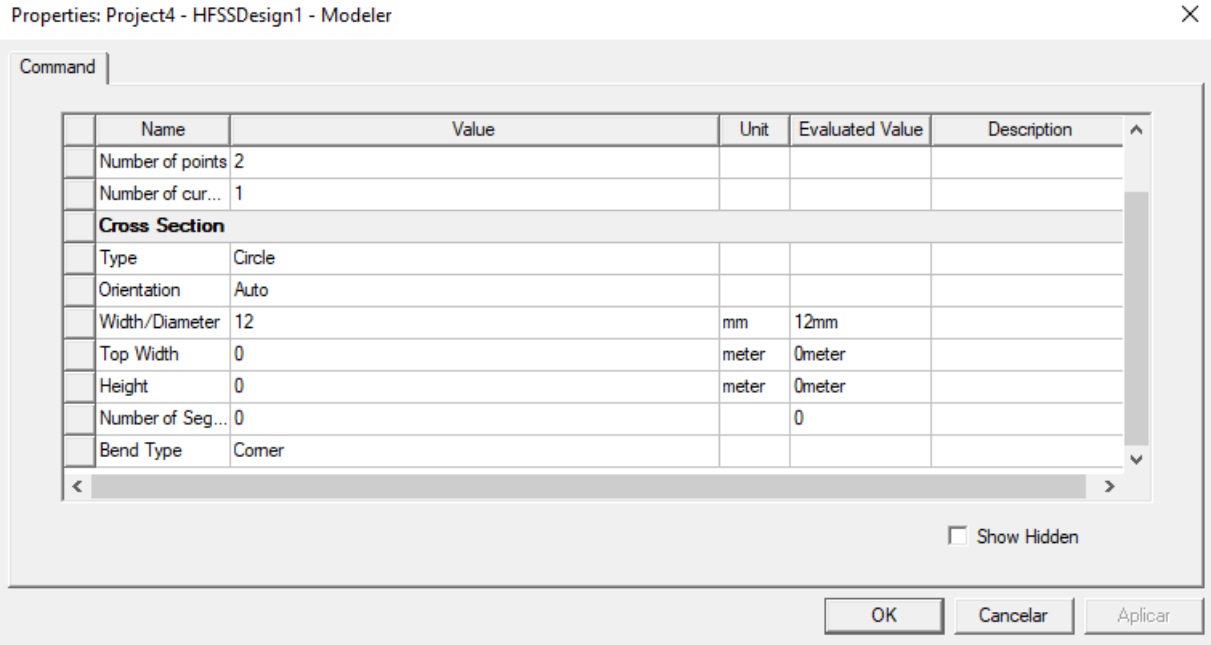
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 34 - Propriedades geométricas da linha.

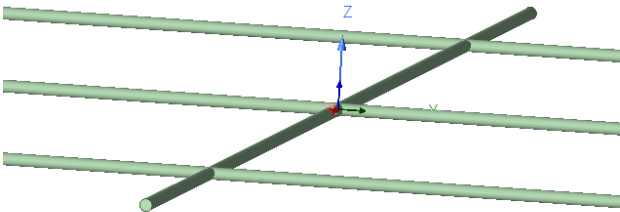


Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 35 - Propriedades geométricas alteradas. (a) Parâmetros. b) Esboço.



(a)



(b)

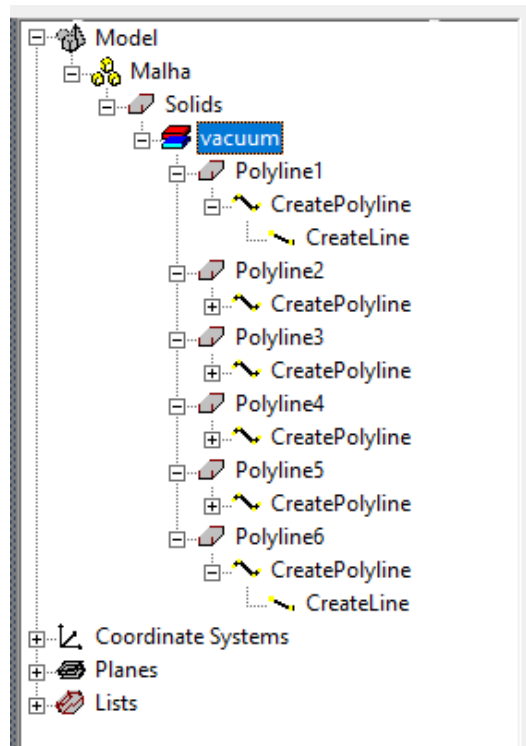
Fonte: Próprio autor (2024).

Ajustada a geometria, deve-se atribuir a composição do material condutor referente às hastes. Ressalta-se que, conforme presente na Figura 36, ao criar um sólido cilíndrico para cada linha, elas deixam de ser agrupadas em *lines*, como já observado na Figura 32b, para serem agrupadas em *solids*, de maneira que as hastes são automaticamente definidas com as propriedades físicas do vácuo. Para alterar isso, pode-se novamente clicar com o botão direito em *Vaccum*, e em seguida *Properties*, de maneira que abrirá uma janela com diversos materiais, dos quais se pode escolher a opção *Cooper*, para que as hastes sejam constituídas pelo material de cobre.

Observam-se, também, os inúmeros materiais pré-cadastrados no HFSS (Figura 37), assim com a escolha do material cobre. Dessa forma, todas as hastes passarão a ser de cobre (Figura 38).

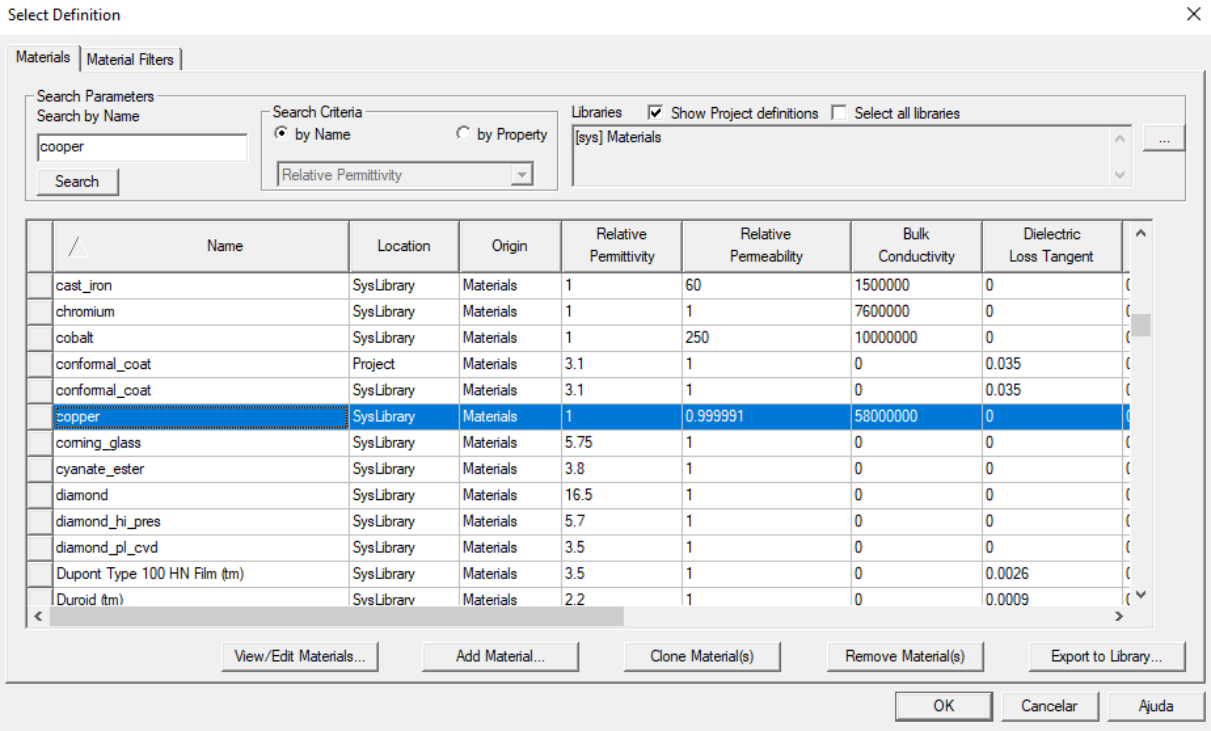
Desenvolvido o modelo da malha de aterramento, pode-se criar o cabo de descida sobre o qual percorrerá a descarga atmosférica. Para isto, seguem-se os mesmos passos anteriores: cria-se a linha com ponto inicial na origem do plano cartesiano e o ponto final apenas com o ajuste na coordenada Z referente à altura. Para a presente aplicação, foi considerada uma altura de 4 m, ou seja, a coordenada final do cabo de descida será (0;0;4). Posteriormente, são alteradas as propriedades geométricas, para um cilindro de 12 mm de diâmetro, e, por fim, altera-se o material do cabo de descida para cobre. A Figura 39 apresenta este resultado.

Figura 36 - Alteração para *solids* e atribuição automática das hastes como vácuo.



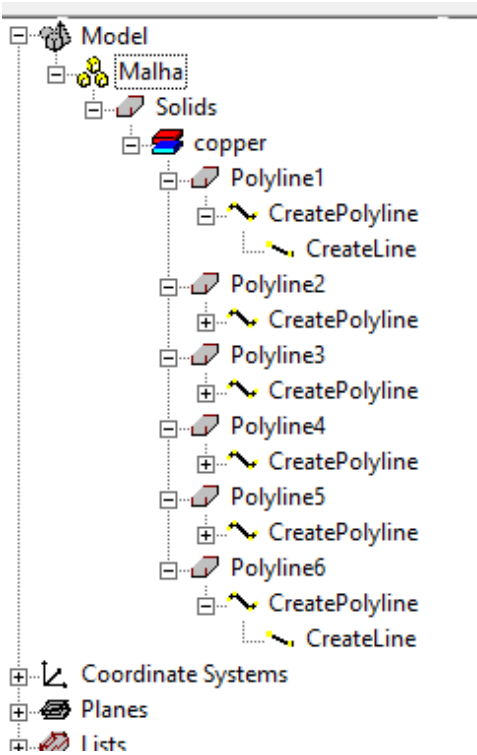
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 37 - Escolha e alteração do material.



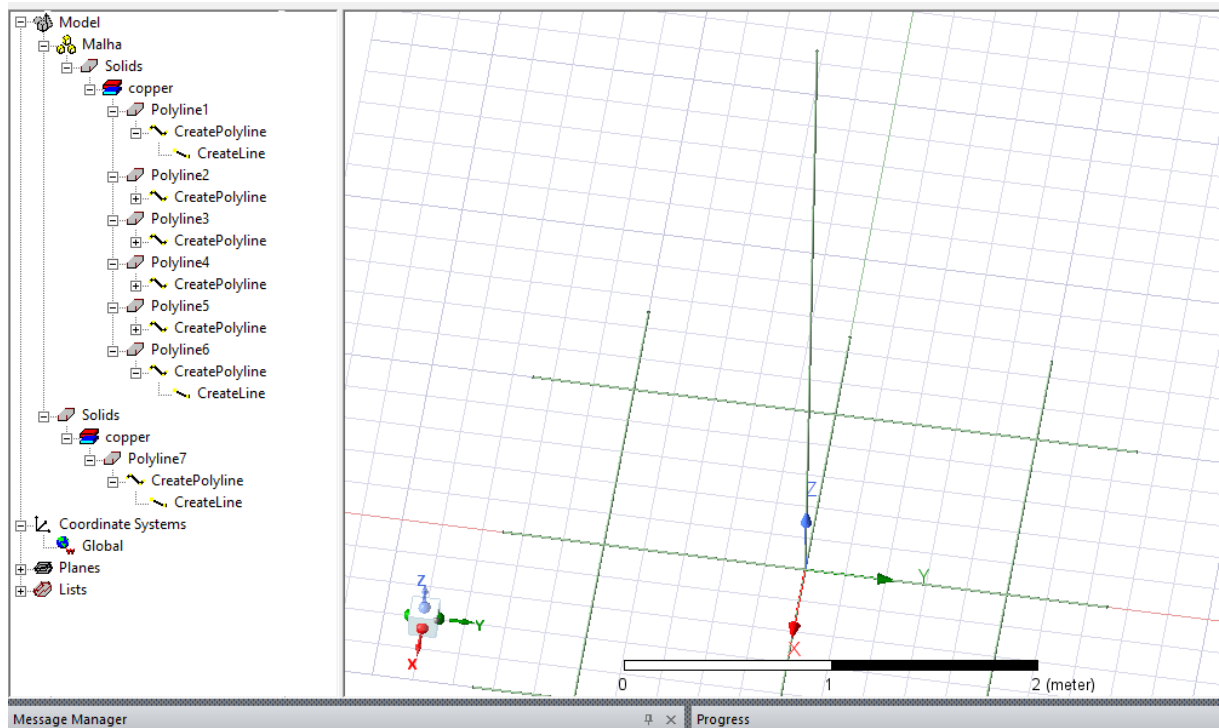
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 38 - Hastes alteradas para o material cobre.



Fonte: Próprio autor (2024).

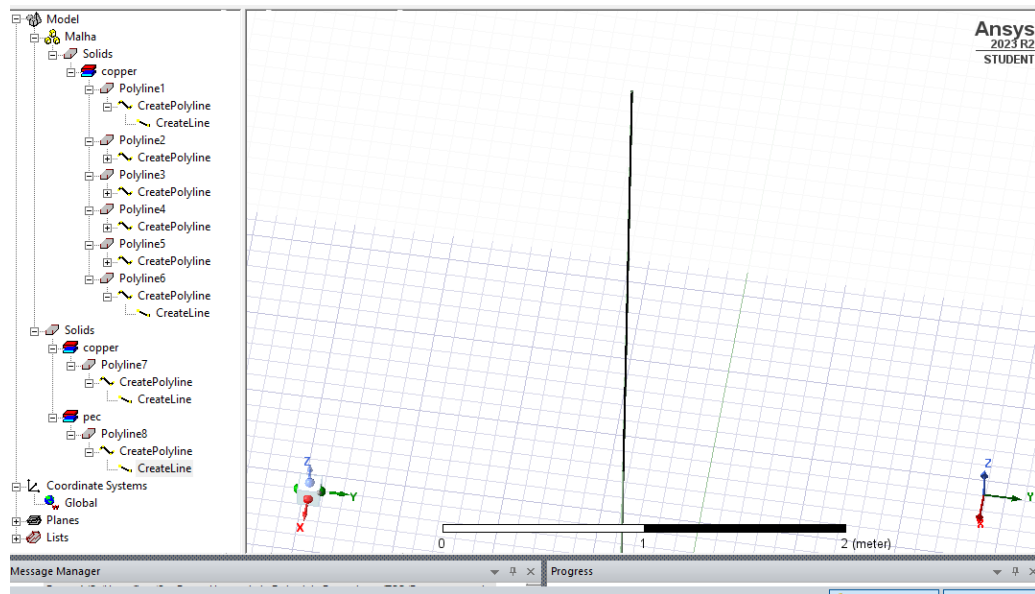
Figura 39 - Cabo de descida.



Fonte: Próprio autor (2024).

Ademais, faz-se necessário criar o *input*, onde será inserida a forma de onda da corrente referente à descarga atmosférica. Para isso, cria-se uma linha que tem início no fim do cabo de descida, ou seja, o ponto inicial será a coordenada (0,0,4), e o ponto final, considerando uma linha de 3 m, resultando em (0,0,7). Criada a linha, sua geometria é alterada para cilindro, com 12 mm de diâmetro, sendo-lhe atribuída o material *pec*, ou seja, um material perfeitamente condutor, pois receberá diretamente a corrente de entrada. Na Figura 40 é apresentada essa nova haste cilíndrica perfeitamente condutora no modelo.

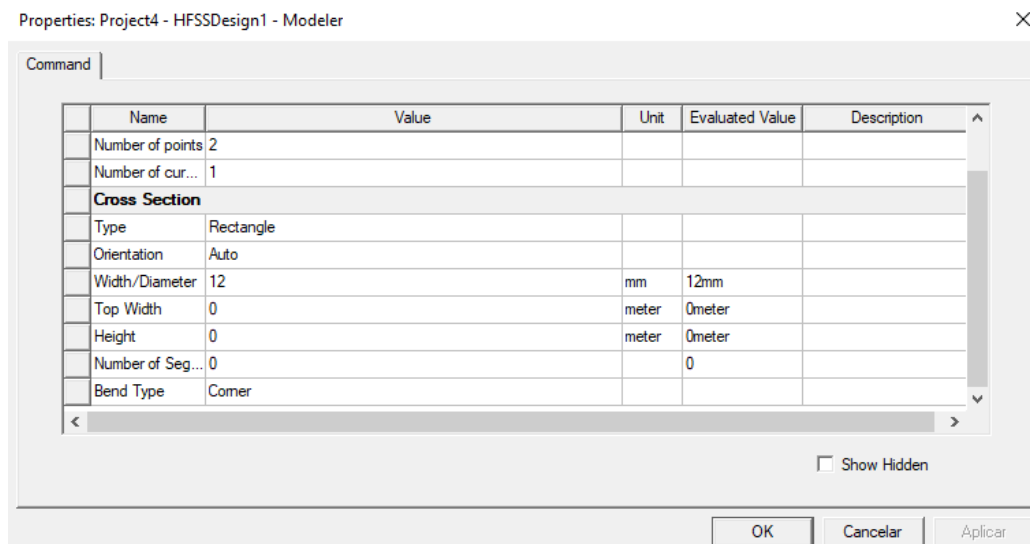
Figura 40 - Haste condutora perfeita acoplada ao cabo de descida.



Fonte: Próprio autor (2024).

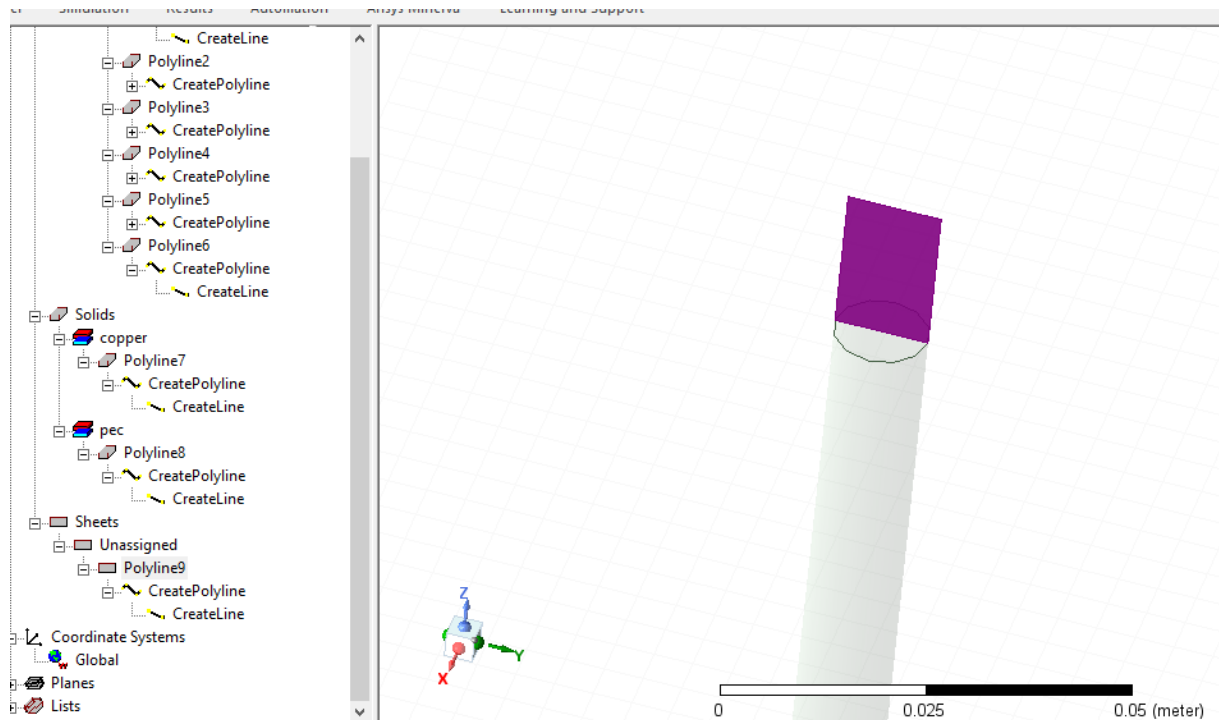
Feita a haste condutora, será adicionada no seu topo uma geometria retangular, a qual será a portadora da corrente da descarga. Para isso, cria-se uma linha, com coordenadas de ponto inicial e final respectivamente em (0;0;7) e (0;0;7,02). Entretanto, em suas propriedades geométricas, o *type*, conforme já visto na Figura 35, não será mais *Circle* e sim *Rectangle*, consoante exibido na Figura 41. Por fim, observa-se essa geometria desenhada na Figura 42.

Figura 41 - Alteração para geometria retangular.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 42 - Retângulo desenhado.



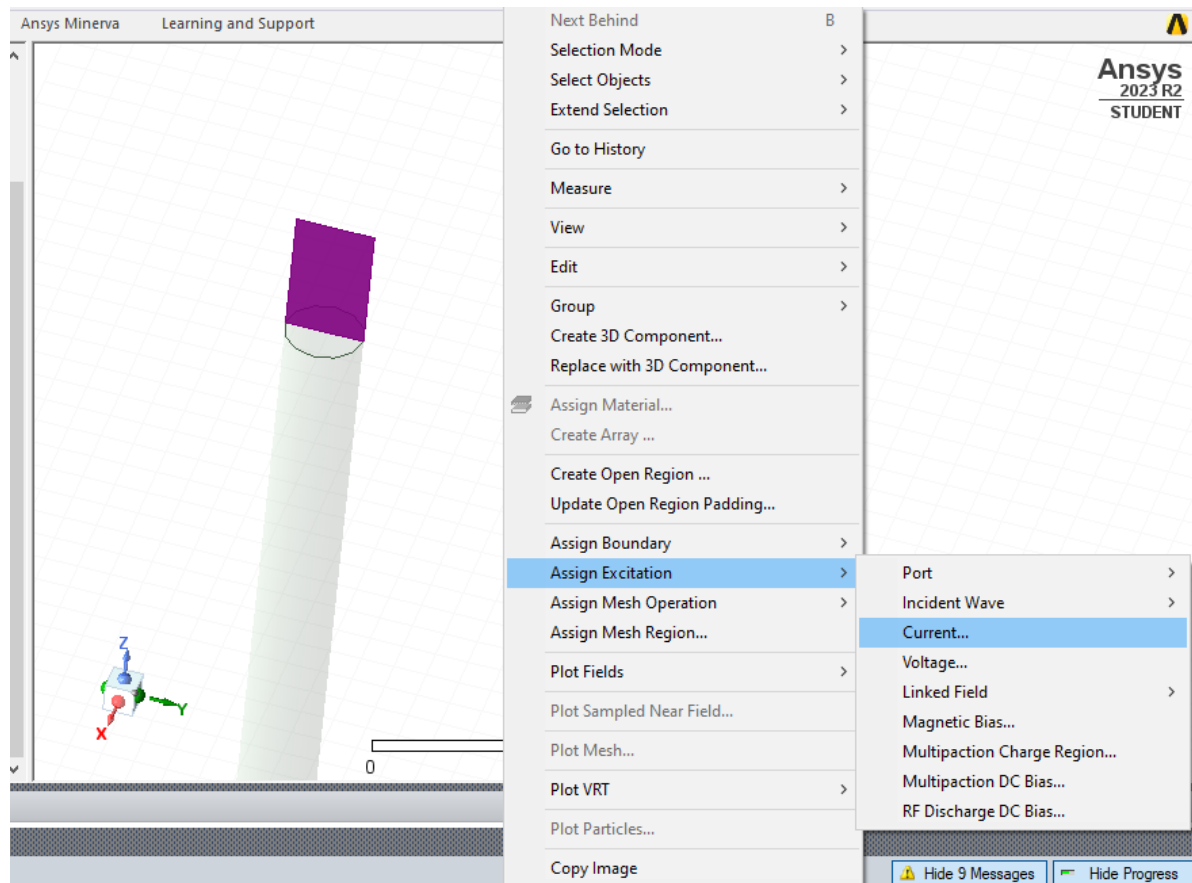
Fonte: Próprio autor (2024).

Associa-se o retângulo à entrada de corrente do sistema em: *Assign Excitation* → *Current* (Figura 43) e ajusta-se a corrente de entrada do sistema (Figura 44).

Deve-se direcionar no retângulo o caminho da corrente escolhendo a opção *New Line* em *Current Flow Direction*, o que permitirá a criação de uma linha sobre o retângulo, de forma que a corrente irá fluir do primeiro ponto da linha, até o ponto final. Coloca-se, portanto, o primeiro ponto na extremidade superior do retângulo, e o último ponto na parte inferior, o que pode ser observado na Figura 45, na qual, observa-se uma seta que define a direção do fluxo da corrente.

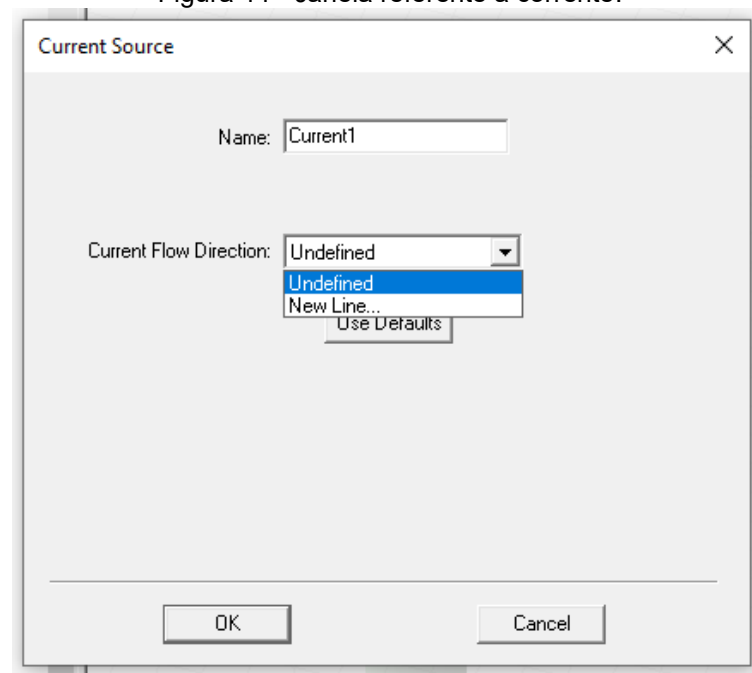
Para importar a forma de onda da descarga atmosférica, a simulação é configurada para análise transiente, pela parte superior da *interface* em: HFSS → *Solution Type* (Figura 46), o que abrirá uma janela (Figura 47), na qual se deve selecionar *Solution Types, Transient*, e em *Options, Composite Excitation*.

Figura 43 - Associar o retângulo a uma porta para a corrente de entrada.



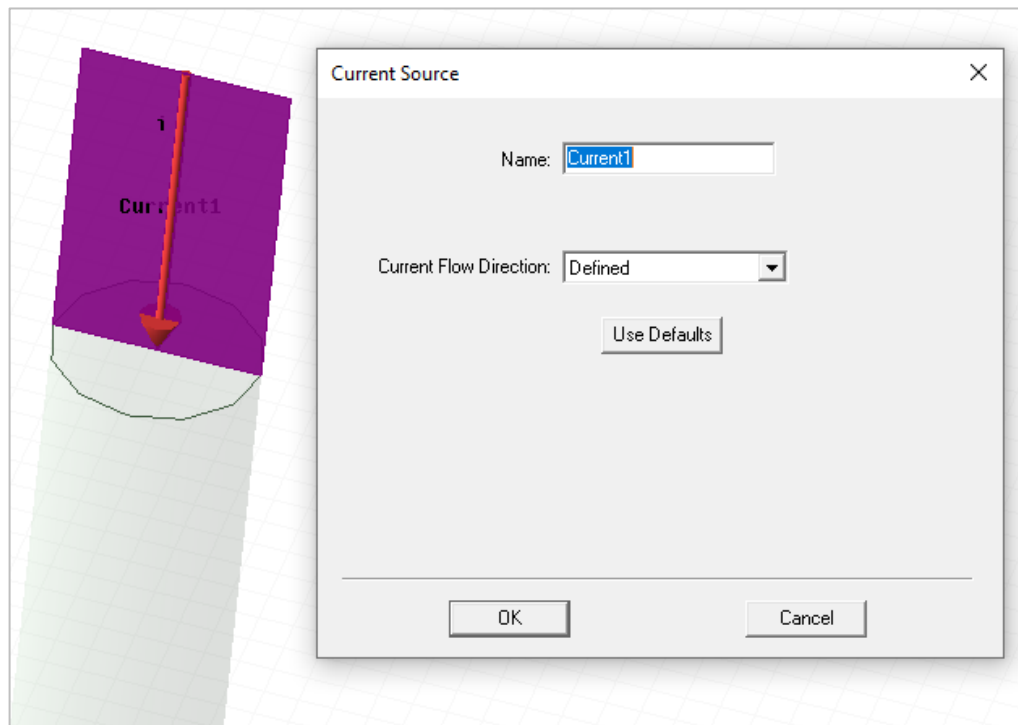
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 44 - Janela referente a corrente.



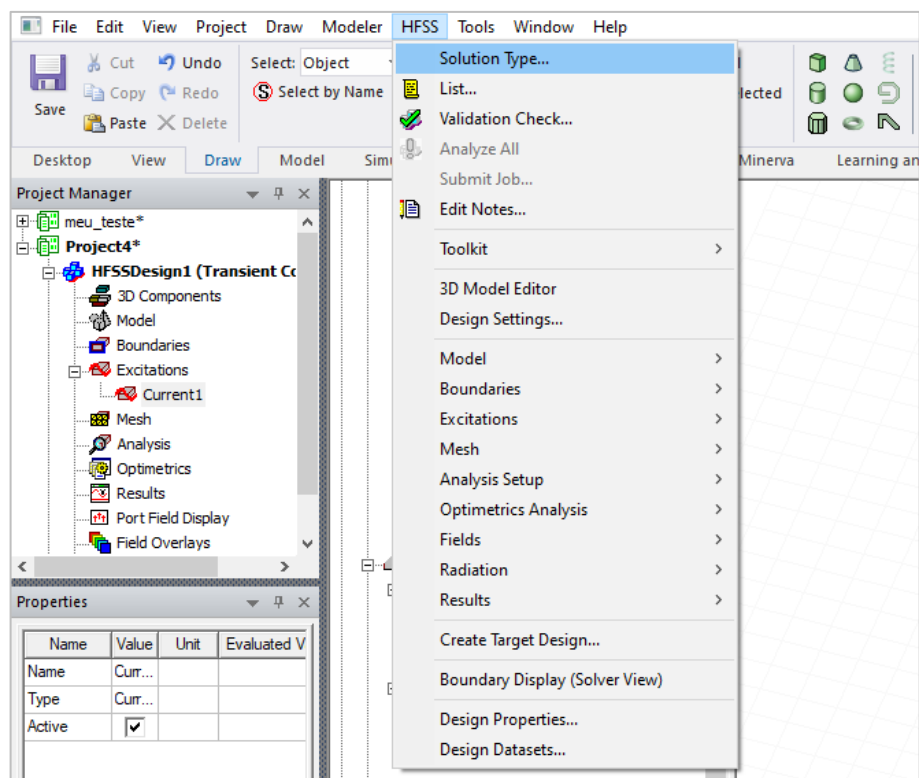
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 45 - Direção da corrente definida.

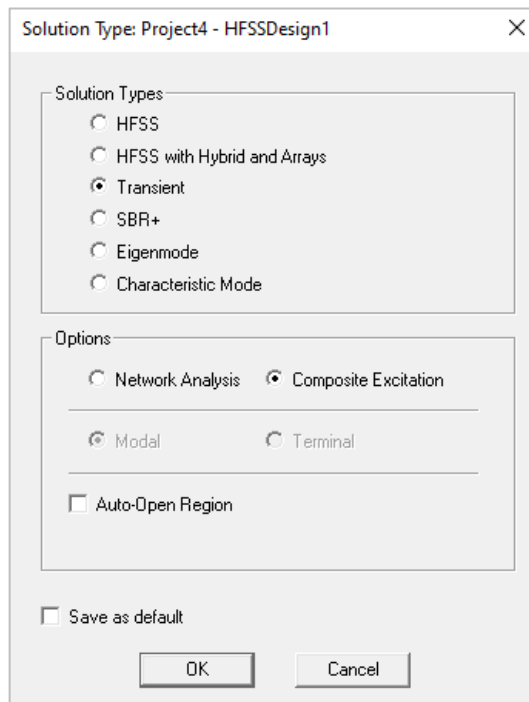


Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 46 - Caminho para adicionar a análise transiente.



Fonte: Próprio autor (2024).

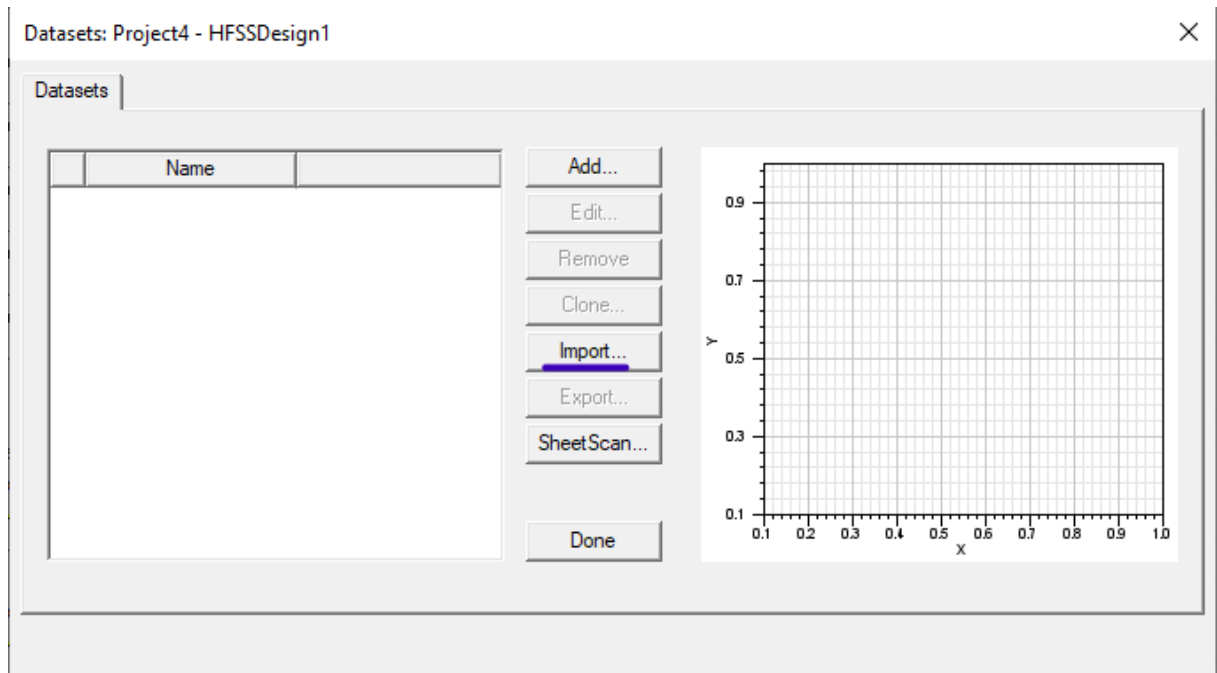
Figura 47 - Alterações em *solution type*.

Fonte: Próprio autor (2024).

Para importar a forma de onda, faz-se necessário ter um arquivo com extensão .tab, no qual deve-se ter uma coluna referente ao valor da corrente, e outra referente ao instante de tempo. Segue-se o mesmo passo mostrado na Figura 46, porém, ao invés de selecionar *Solution Type*, deve-se selecionar *design Datasets*, o que abrirá uma janela (Figura 48) onde, clicando em *Import*, poderá importar a forma de onda que o usuário desejar. Na Figura 49, é apresentada a forma de onda representativa para uma descarga atmosférica, que foi importada para o HFSS.

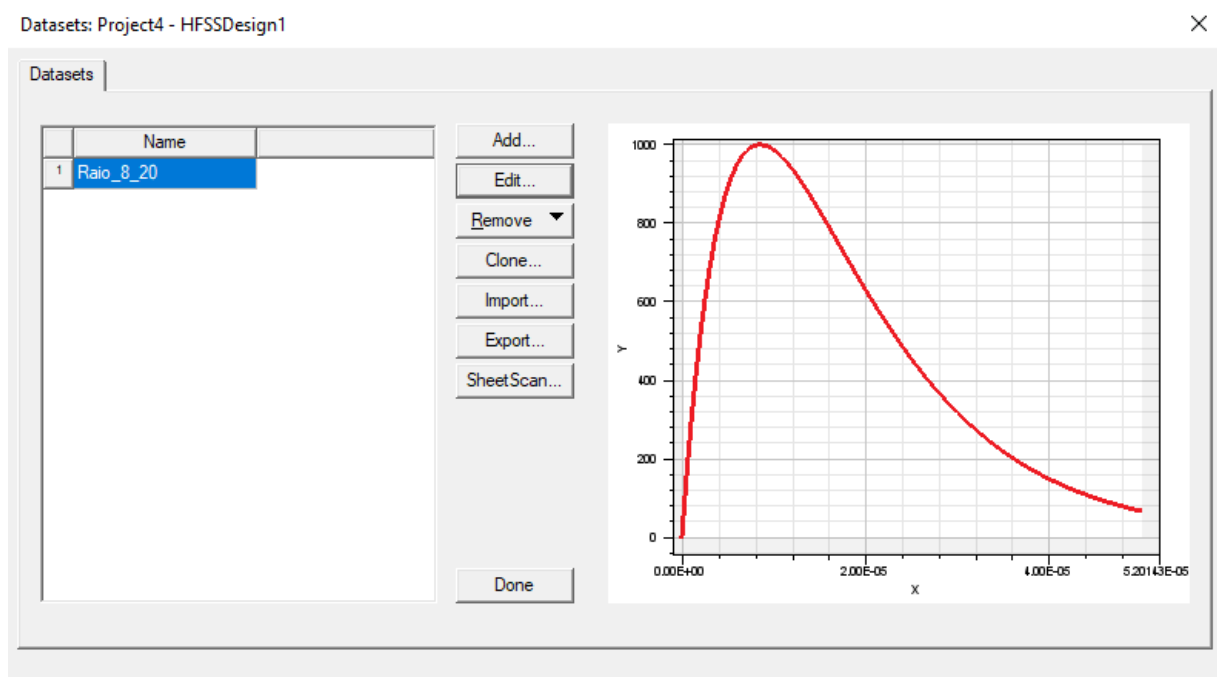
Para aplicar a forma de onda importada ao retângulo construído da Figura 43, direciona-se para *Project Manager* → *Excitations* → *Current1*, de maneira que se abrirá uma janela (Figura 50) na qual, ao clicar em *Transient*, adiciona-se o *Dataset* importado. É importante notar que *Current1* é criada automaticamente na opção *Excitations* quando a linha de fluxo da corrente é criada. Em acréscimo, além da importação, é possível escolher a máxima frequência que a simulação irá varrer, o que é importante, sobretudo, visto as altas frequências que uma descarga atmosférica pode apresentar. A escolha da magnitude da corrente é dada por um fator multiplicador à corrente importada.

Figura 48 - Janela para importação da forma de onda da corrente.



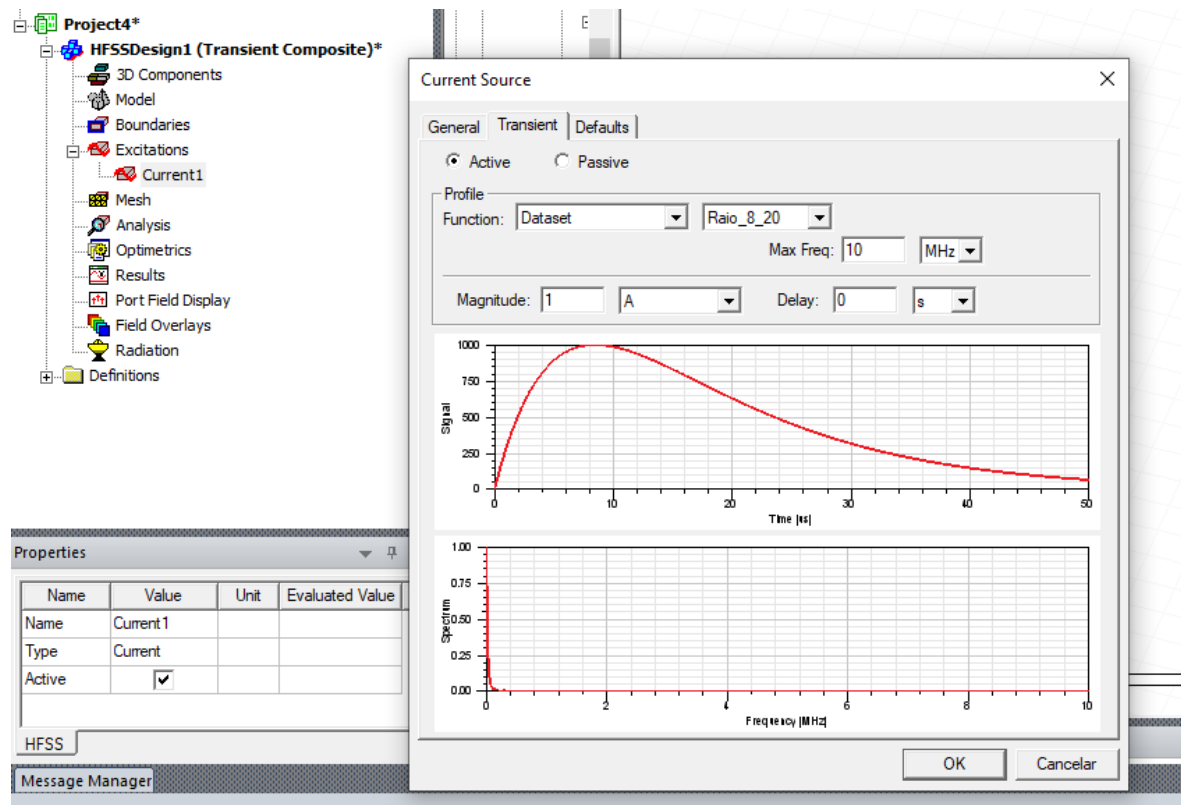
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 49 - Exemplo de forma de onda importada



Fonte: Próprio autor (2024).

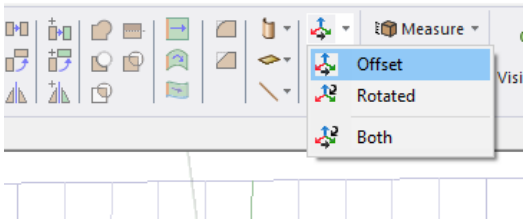
Figura 50 - Associação da corrente importada ao retângulo.



Fonte: Próprio autor (2024).

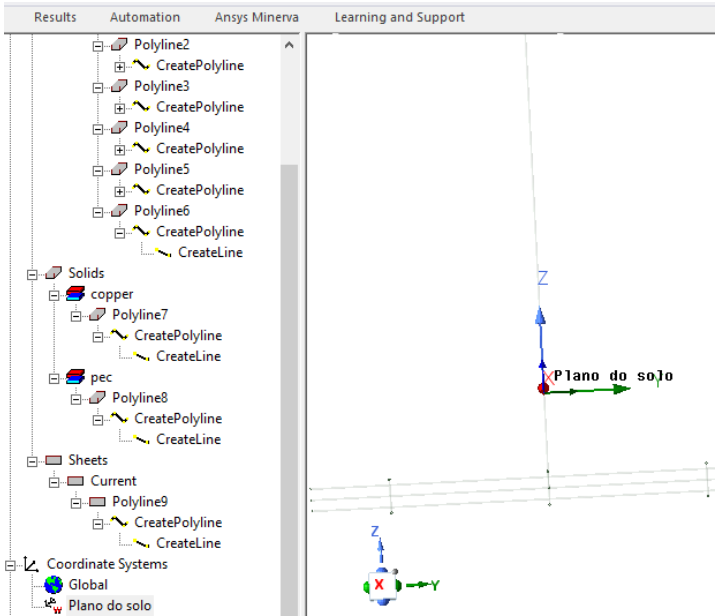
Com o modelo da malha de aterramento desenvolvido, além do cabo de descida e o *input* de corrente, pode-se partir para a construção do solo hemisférico. Para isso, far-se-á outro plano cartesiano de referência que será chamado de plano do solo. Sua posição será 60 cm acima do plano global usado para a construção da malha, visto que se pretende posicionar a malha 60 cm abaixo da superfície do solo. Essa ação pode ser executada clicando na opção *Offset* na parte superior da interface, quando se está em *Draw*, conforme a Figura 51. Na Figura 52, observa-se a criação do novo plano cartesiano, e na Figura 53 tem-se a janela *Properties* desse plano, onde é possível realizar alterações no nome (em *Name*) e, em *Origin*, pode-se colocar a origem desse plano auxiliar a partir do plano global como referência.

Figura 51 - Criação de um plano cartesiano auxiliar.



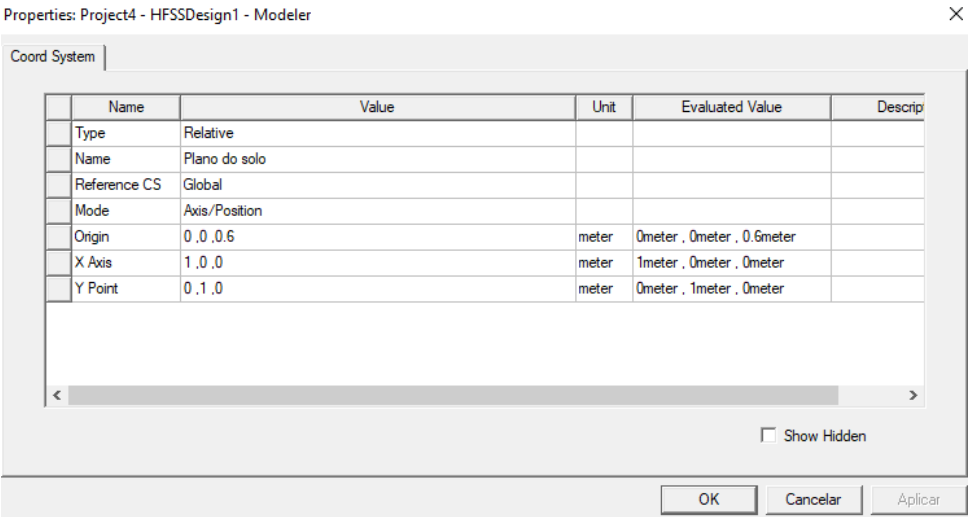
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 52 - Novo plano criado.



Fonte: Próprio autor (2024).

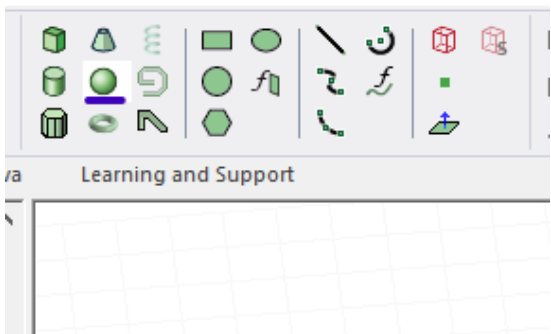
Figura 53 - Janela *Properties* do novo plano.



Fonte: Próprio autor (2024).

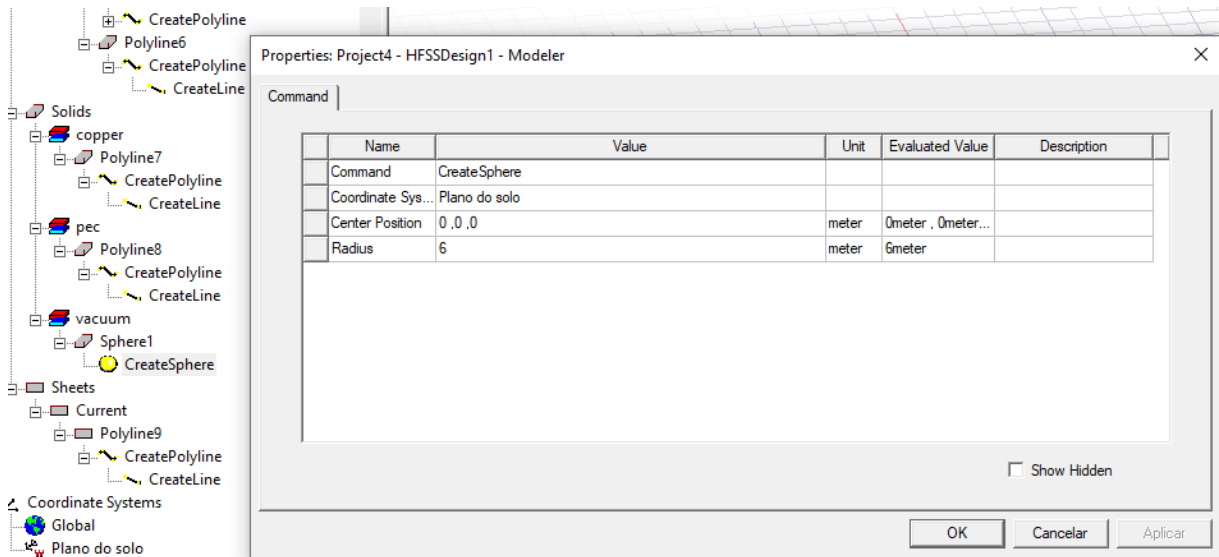
Mediante o plano cartesiano auxiliar, pode-se criar uma esfera, clicando em *Draw Sphere* (ver Figura 54), cujo centro será colocado na origem do plano. O raio será de 6 m, o dobro do comprimento da malha quadrada. Na Figura 55, é apresentada a janela de *Properties* da esfera, e na Figura 56 esfera desenhada.

Figura 54 - Criação da esfera.



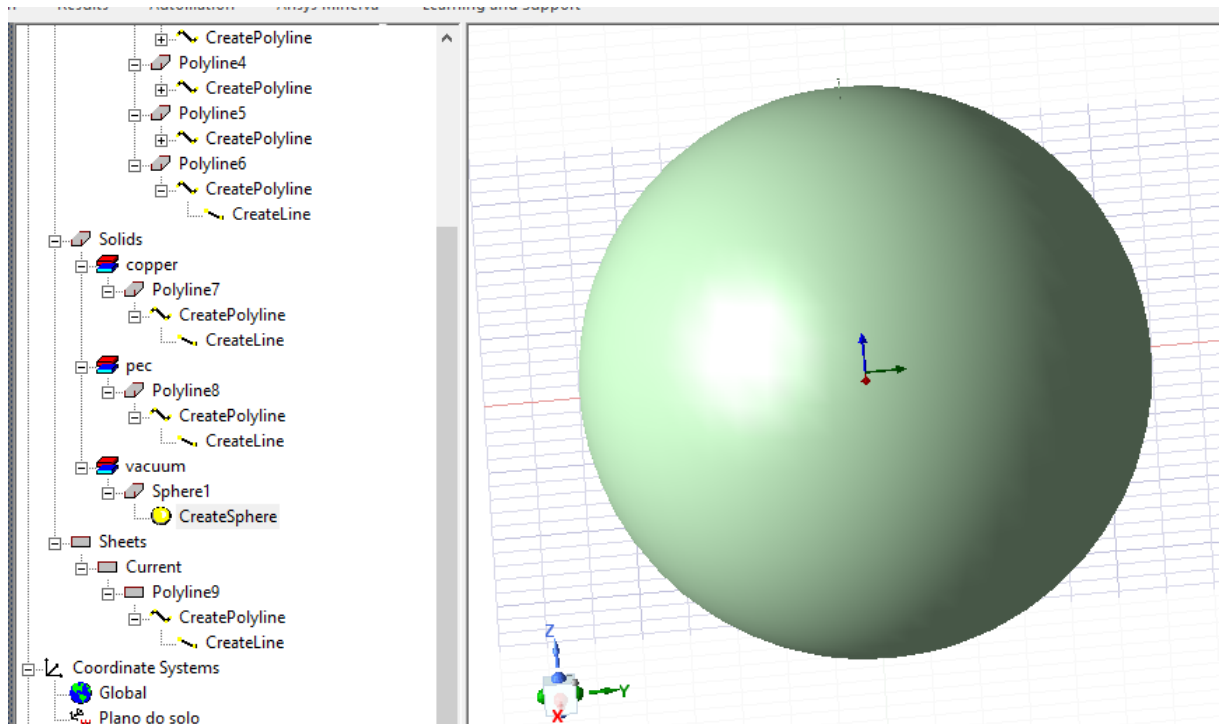
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 55 - Janela *Properties* da esfera.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 56 - Nova esfera criada.



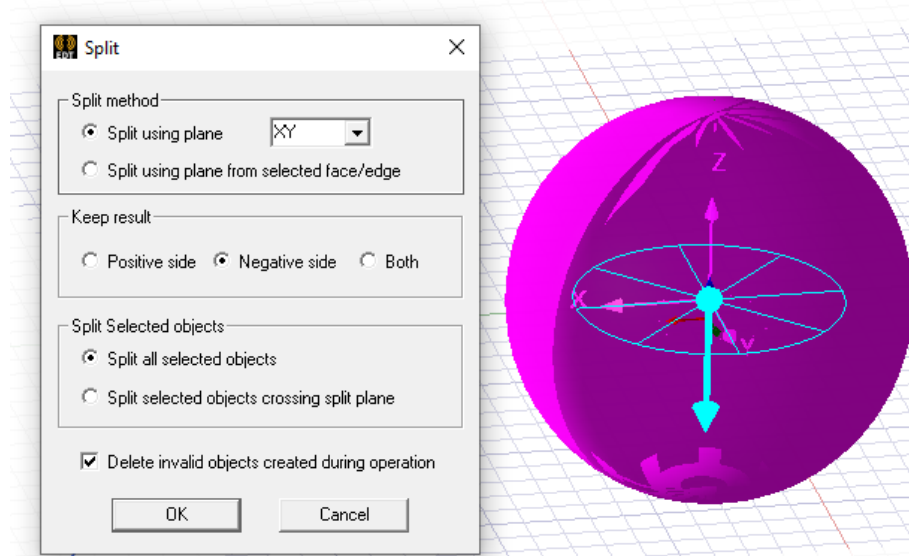
Fonte: Próprio autor (2024).

Para cortar a esfera ao meio a fim de torná-la uma semiesfera, deve-se selecioná-la e clicar em *Split* (Figura 57), de forma que abrirá uma janela que trará os parâmetros importantes do corte como exemplos o eixo de corte e a parte da semiesfera que permanecerá. Essa janela, já devidamente preenchida (Figura 58) e o resultado do corte, com a geração de uma semiesfera é apresentada na Figura 59.

Figura 57 - Opção *split* para corte da esfera.

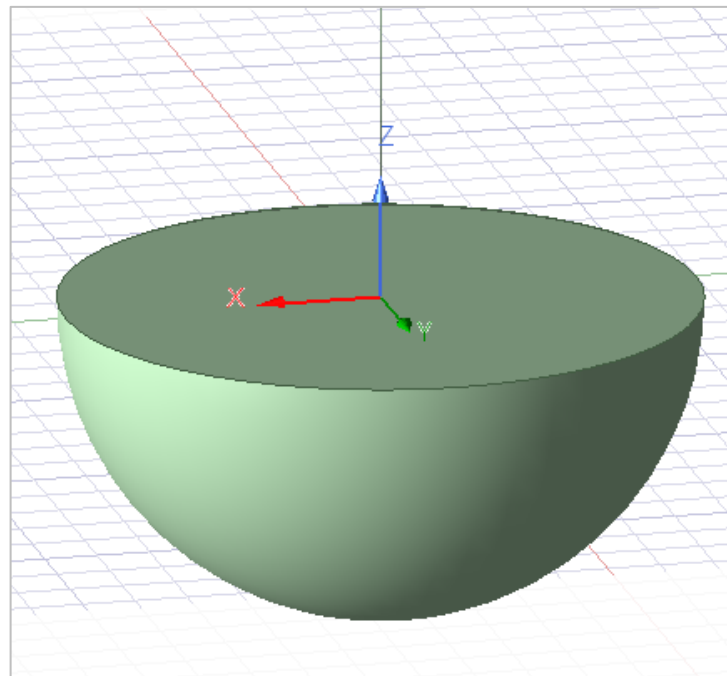
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 58 - Janela referente aos parâmetros de corte da esfera.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 59 - Semiesfera criada.



Fonte: Próprio autor (2024).

É importante observar que, conforme apresentado na Figura 56, a esfera foi criada com as características físicas do vácuo. Assim, faz-se necessário alterar o material para que a semiesfera represente o solo de fato, analogamente ao feito na

linha (Figura 37), ou seja, clica-se com o botão direito em Vacuum→Properties, o que abrirá a janela referente a todos os materiais já salvos no HFSS. Todavia, não existe um material pré-existente no HFSS referente ao solo, por isso, cria-se este em *add material* (Figura 37), e abre-se uma nova janela para efetivar essa caracterização. Os respectivos valores adotados para a condutividade, a permissividade, e a permeabilidade relativas são: 0,001; 10; 1, conforme apresentados na Figura 60.

Figura 60 - Criando um material referente ao solo.

View / Edit Material [X]

Material Name: Solo

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	10	
Relative Permeability	Simple	1	
Bulk Conductivity	Simple	1/1000	
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Mass Density	Simple	2630	kg/m ³
- Measured Frequency	Simple	9.4e+09	Hz

View/Edit Material for:

- ☒ Active Design
- ☐ Active Project
- ☐ All Properties

Physics:

- ☒ Electromagnetic
- ☐ Thermal
- ☐ Structural

View/Edit Modifier for:

- ☐ Thermal Modifier
- ☐ Spatial Modifier

Material Appearance

- ☐ Use Material Appearance

Color:

Transparency:

Validate Material

Notes: [] []

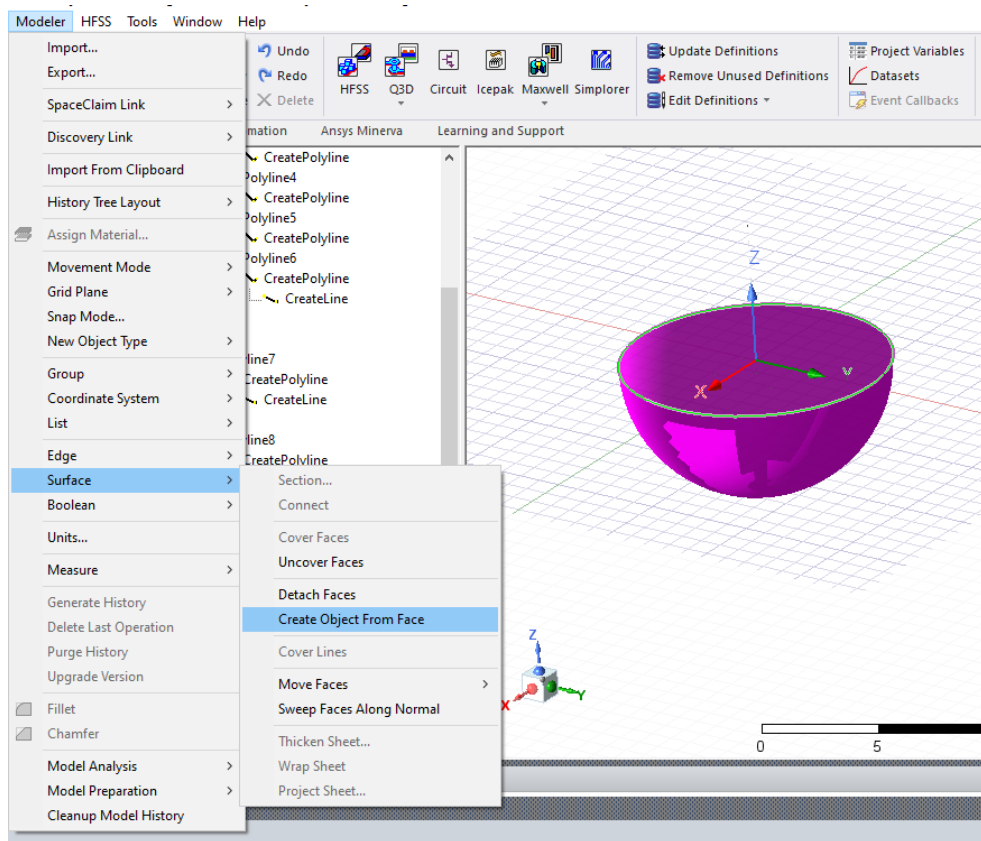
Set Frequency Dependency... [] Calculate Properties for: []

Reset OK Cancel

Fonte: Próprio autor (2024).

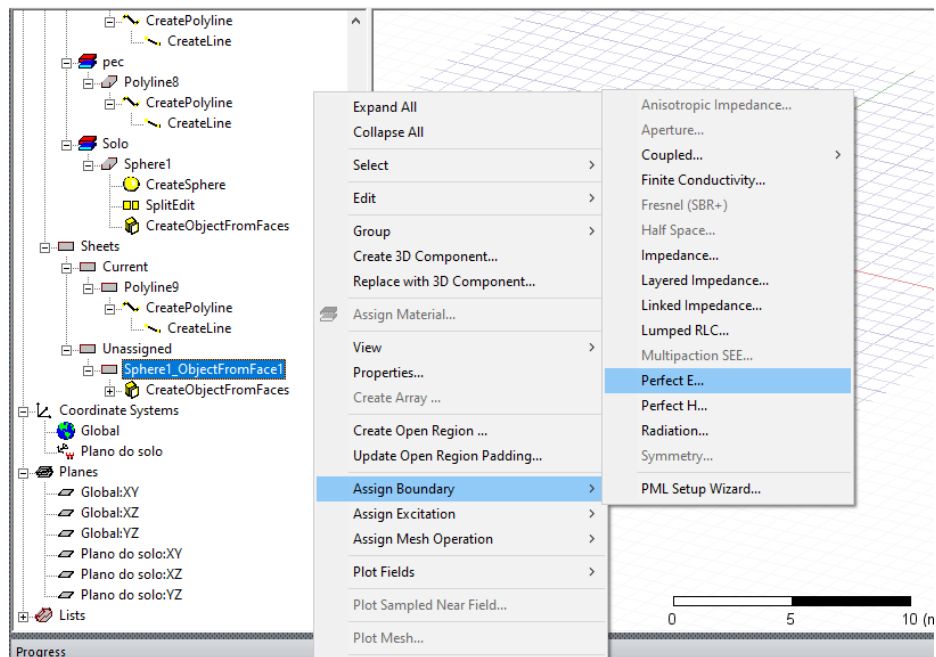
Ademais, clica-se na superfície inferior da semiesfera, a fim de defini-la como *Ground*. Para isso, após ser selecionada, direciona-se para *Modeler* → *Surface* → *Create Object Form Face* (Figura 61). Com a criação desse objeto, pode-se associá-lo ao *Perfect E*, ou seja, ao *Ground* utilizando a opção *Assign Boundary*, tal como apresentado na Figura 62. Na Figura 63, tem-se, visualmente, a definição da superfície inferior do solo como *Ground*.

Figura 61 - Criação de um objeto relacionado a superfície inferior da semiesfera.



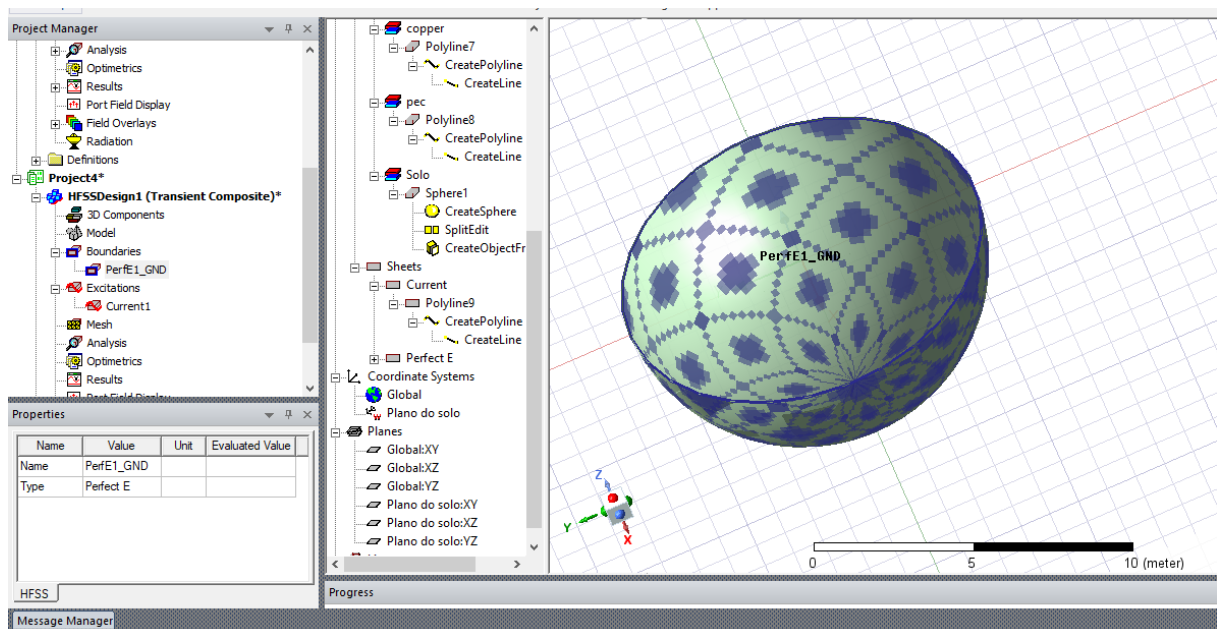
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 62 - Definição da superfície inferior da semiesfera como *ground*.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 63 – Vista da superfície inferior da semiesfera definida como *ground*.

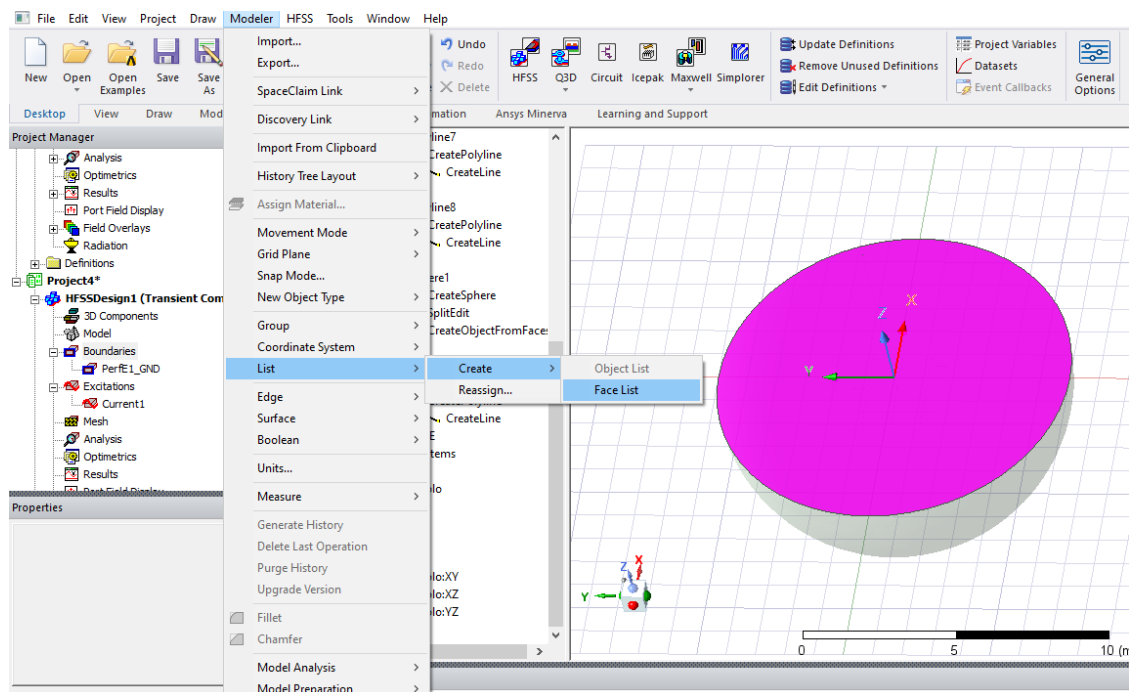


Fonte: Próprio autor (2024).

Pode-se, ainda, definir planos com o intuito de que eles registrem os campos elétricos e magnéticos em sua superfície na análise *transient*. Diante disso, como a região mais crítica a se analisar em uma situação de descarga atmosférica canaliza-

da pelo cabo de descida e escoada por uma malha de aterramento é a própria superfície do solo, é útil defini-la como um plano de análise. Nesse sentido, seleciona-se a face superior da semiesfera, clicando em sua superfície e pressionando simultaneamente a tecla F. Feita a seleção, segue-se o caminho *Modeler* → *List* → *Create* → *Face List*. Confira tais passos na Figura 64.

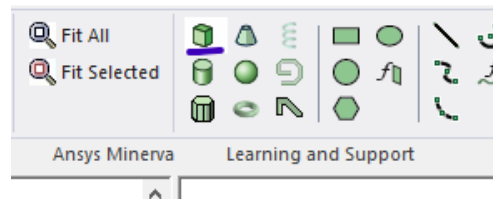
Figura 64 - Criação do plano de análise na superfície do solo.



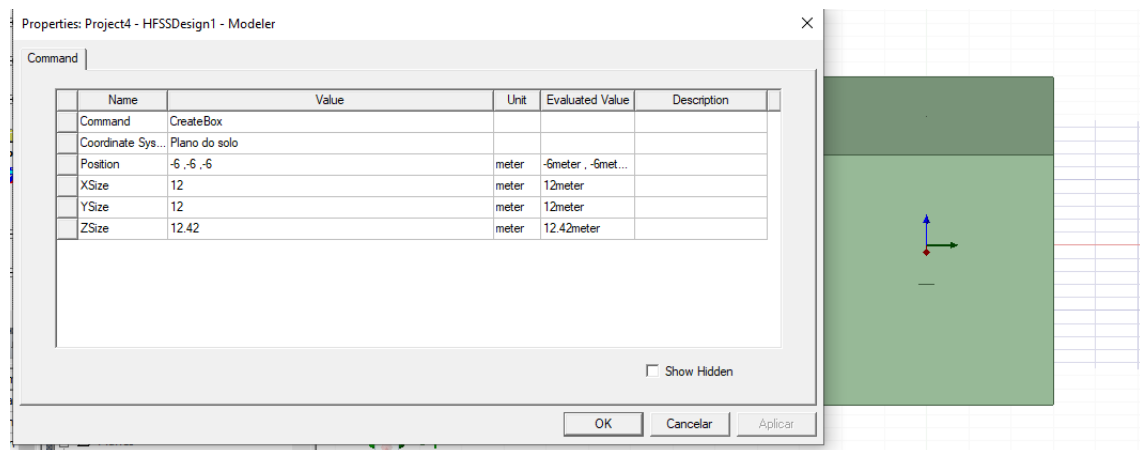
Fonte: Próprio autor (2024).

Por fim, faz-se necessário criar a caixa de ar, que concentrará todos os resultados de simulação no seu interior de maneira a limitar a análise *transient* na região abrangida. Ressalta-se que essa caixa deve tangenciar as extremidades do solo, assim como ser o limitante superior ao retângulo portador da corrente. Para criá-la, escolhe-se a opção *Draw Box* na parte superior da *interface*, conforme apresentado na Figura 65. Posteriormente, na Figura 66, tem-se a janela *Properties* da caixa, na qual pode-se alterar a coordenada da posição da caixa, bem como o quanto que ela irá percorrer nas três direções para atender os requisitos já citados, dada as dimensões do solo, e a altura do retângulo portador.

Figura 65 - Desenhar caixa.



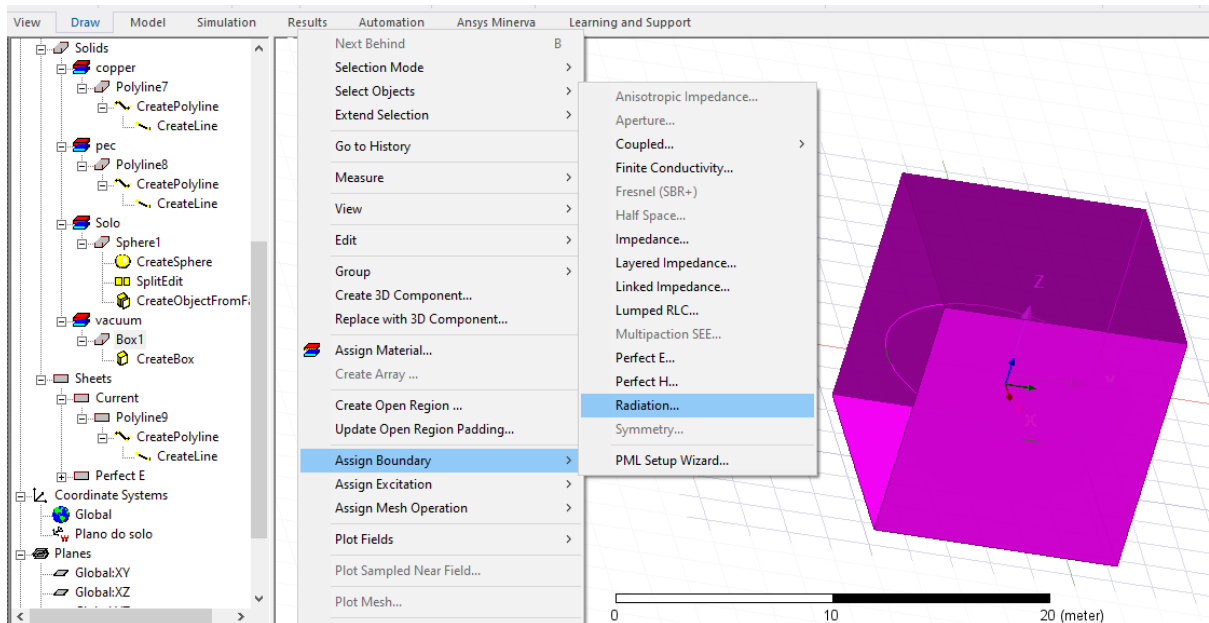
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 66 - Ajustes da dimensão da caixa de ar na sua janela de *properties*.

Fonte: Próprio autor (2024).

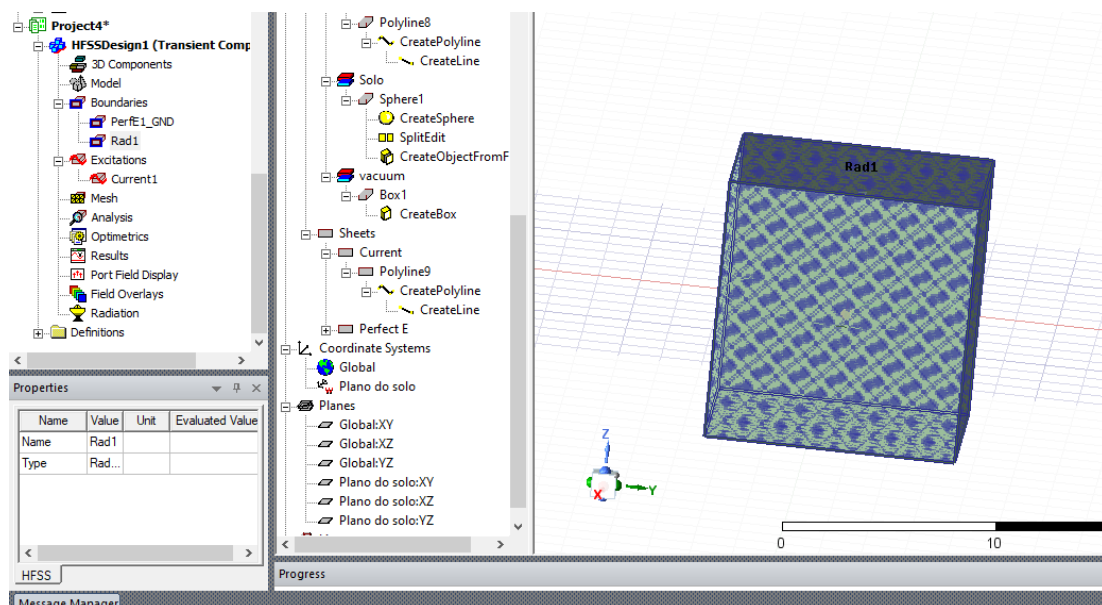
A fim de que a caixa absorva toda interação e não permita refração para o ambiente externo da simulação, pode-se seleccionar a caixa de ar e seguir o caminho *Assign Boundary* → *Radiation* (Figura 67). Assim, toda simulação estará limitada ao espaço da caixa (Figura 68).

Figura 67 - Definição da superfície da caixa de ar como absorvedor da radiação.



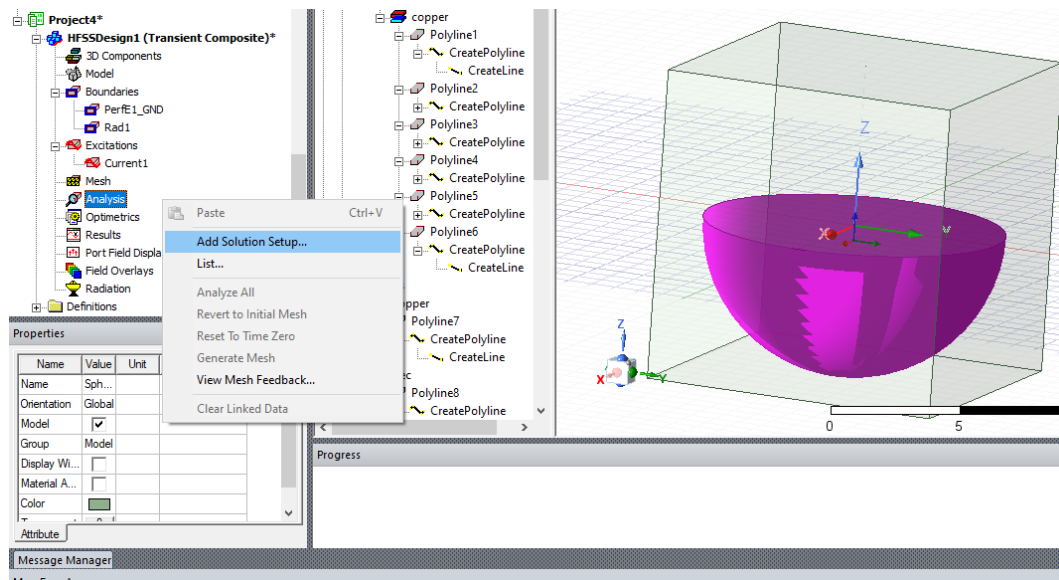
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 68 - Caixa limitadora da simulação.



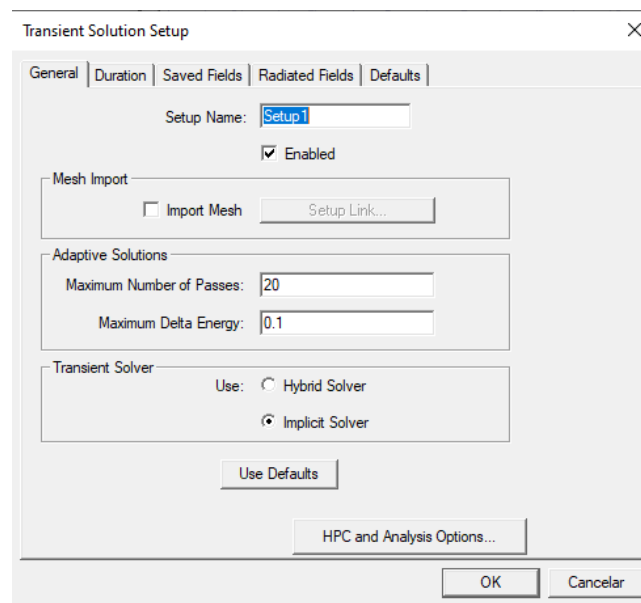
Fonte: Próprio autor (2024).

Neste ponto o modelo está quase concluído, restando apenas definir o *setup* da simulação. Cria-se, então, um *setup* clicando com o botão direito em *Analysis* e posteriormente clica-se em *Add Solution Setup* (Figura 69). Isso abrirá uma janela de configuração geral dos parâmetros de simulação (Figura 70).

Figura 69 - Adicionar *setup*

Fonte: Próprio autor (2024).

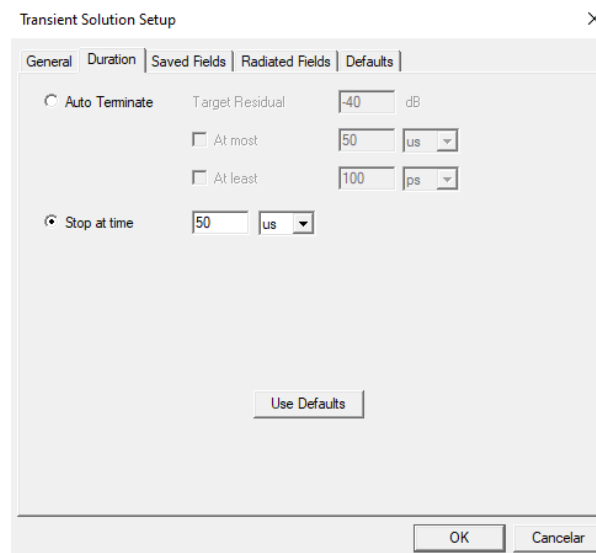
Figura 70 - Parâmetros gerais da simulação



Fonte: Próprio autor (2024).

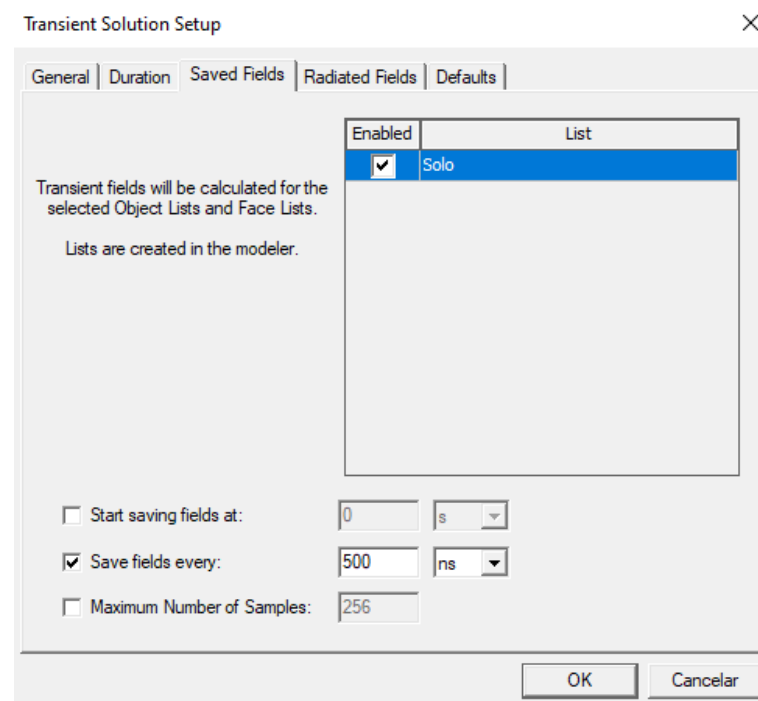
Na Figura 71, tem-se a configuração referente à duração da simulação e na Figura 72 a atribuição do plano em que se deseja armazenar os campos da simulação. Ressalta-se que as opções de plano serão as anteriormente criadas como *facelist*.

Figura 71 - Configuração do tempo de simulação.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 72 - Configuração dos planos que armazenarão os campos.

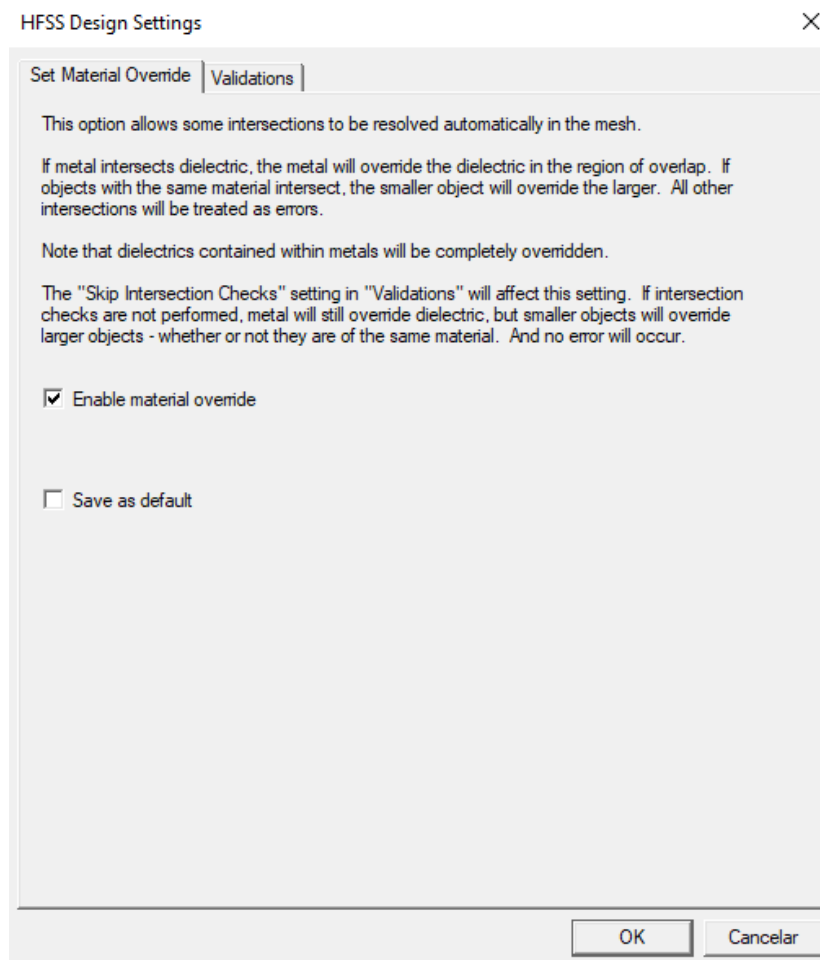


Fonte: Próprio autor (2024).

Uma vez configurado o *Setup*, pode-se iniciar o processo de simulação. Porém, deve-se permitir que o *software* possibilite a sobreposição de materiais, sobretudo nas junções das hastes de aterramento, pelo caminho HFSS → *Design Settings...*

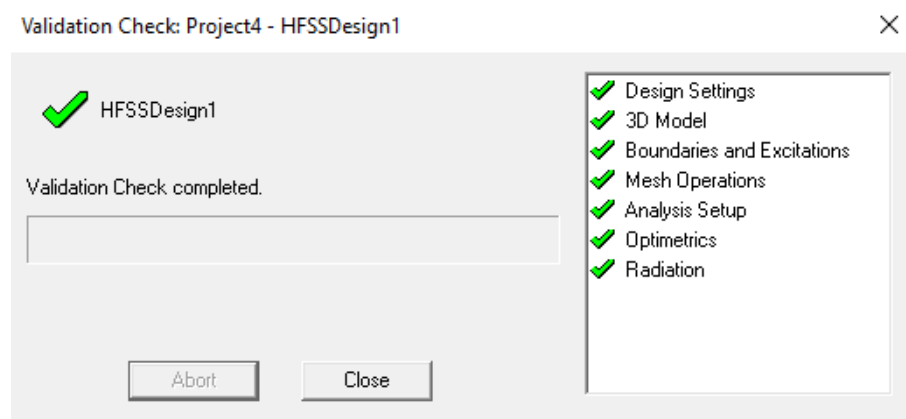
Assim, abrirá uma janela na qual se deve habilitar a opção *Enable Material Override* (Figura 73). Por fim, pode-se validar a geometria do modelo em HFSS → *Validation Check...*, o que retornará a existência ou não de alguma inconsistência no modelo (Figura 74). Na sequência, pode-se seguir o caminho HFSS → *Analyze All* para iniciar o processo de simulação e obtenção de resultados. É importante mencionar que o desenvolvimento apresentado foi apenas para ilustrar as etapas procedimentais. Assim, foi considerada uma malha simples de 3m x 3m. Malhas maiores demandam um esforço significativamente maior, tanto para a inserção/implementação quanto computacional. Neste último caso, ocorre que o aumento da malha leva a necessidade do aumento do raio do solo hemisférico e da caixa de ar, visando-se evitar que haja inconsistências no modelo ou erros/travamentos durante a simulação.

Figura 73 - Ativação do *Enable material override*.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 74 - Validação do modelo desenhado

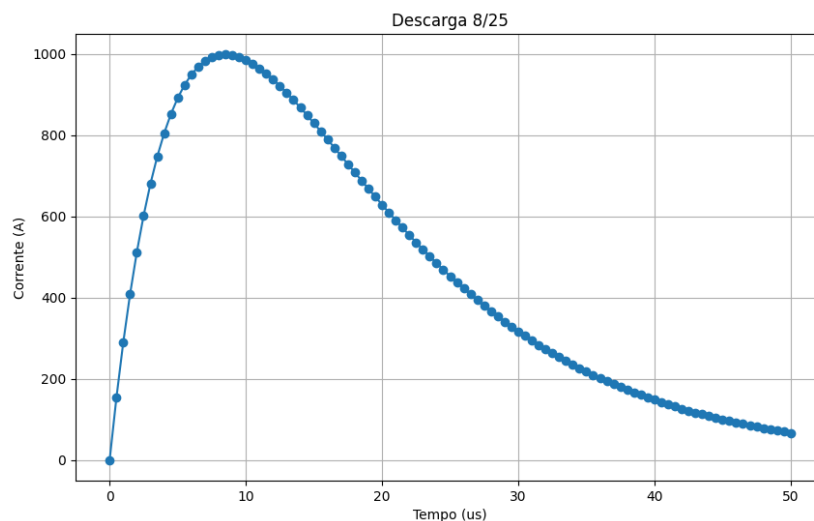


Fonte: Próprio autor (2024).

3.2 Modelo do cabo de descida e sua validação

Inicialmente, modelou-se no HFSS um modelo de solo hemisférico de 20 m de raio com resistividade de $1000 \, \Omega \cdot \text{m}$ e permissividade relativa de 11,9. O cabo de descida, de cobre de 12 mm de diâmetro, é atravessada por uma corrente do tipo 8/25 μs com pico de 1 kA. Essa forma de onda é apresentada na Figura 75. Sua importação para o HFSS já foi apresentada na Figura 50, pois o modelo simulado é análogo a malha 3x3m construída na seção 3.1.2, com a diferença que se retirou a malha do solo, de forma que o cabo de descida está em contato direto com o solo.

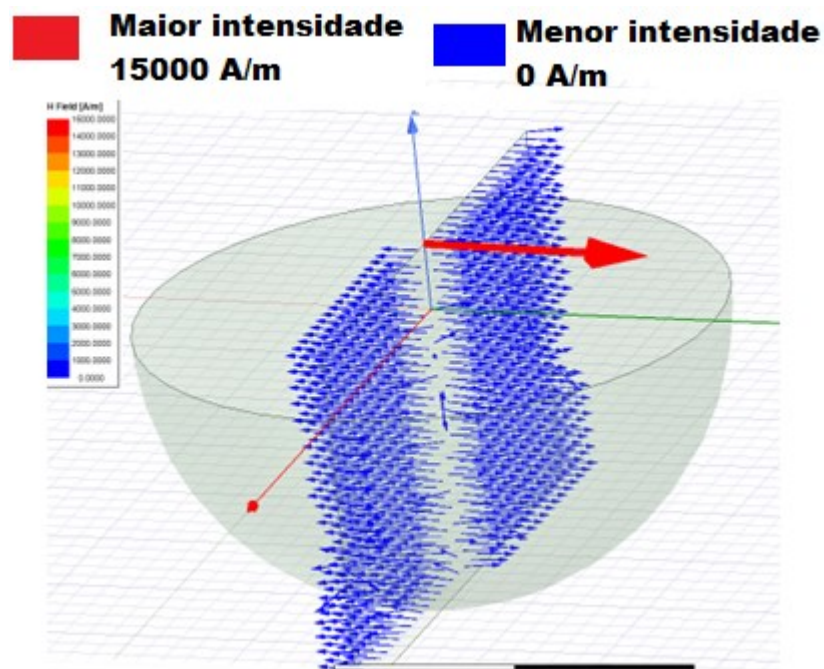
Figura 75 - Forma de onda da corrente 8/25us.



Fonte: Próprio autor (2024)

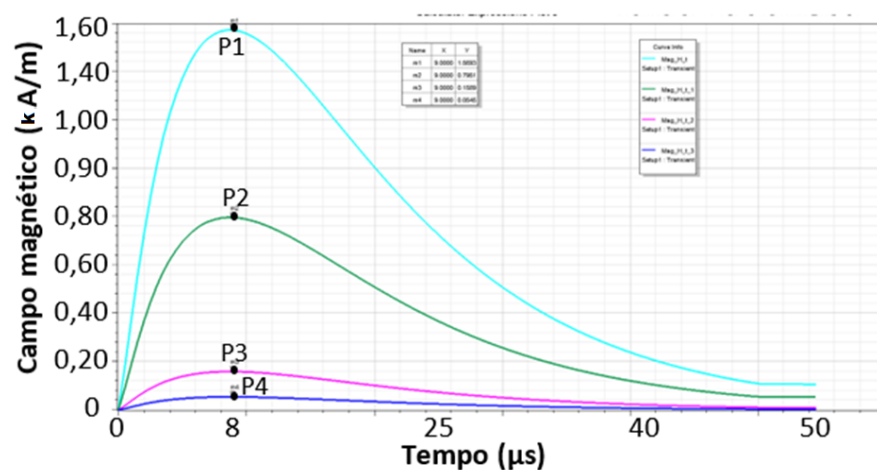
Na Figura 76 é apresentada a disposição vetorial do campo magnético, definidos pela regra da mão direita. Na Figura 77 são apresentadas as curvas de campo magnético no domínio do tempo nos pontos P1, P2, P3 e P4. Esses pontos estão a uma altura de 3 m e distanciados do cabo de descida, respectivamente, 10 cm, 20 cm, 100 cm e 300 cm.

Figura 76 - Campo magnético em torno do cabo de descida.



Fonte: Próprio autor (2024).

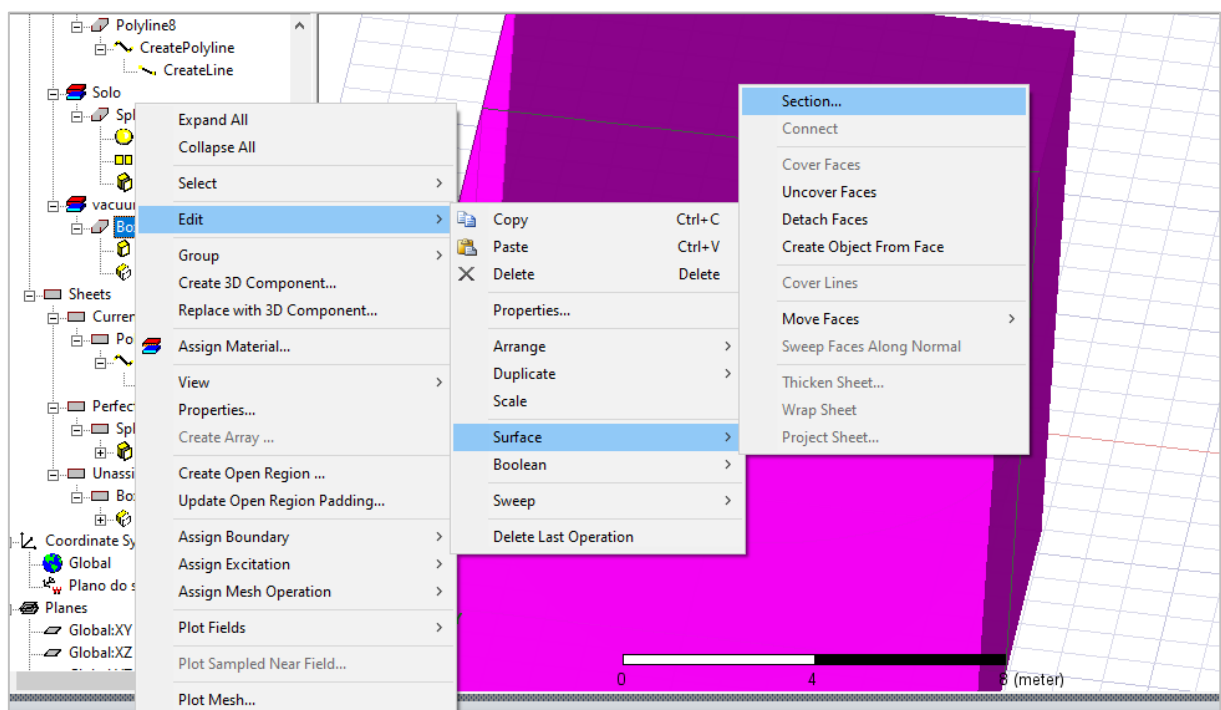
Figura 77 - Campo magnético em função do tempo nos pontos em análise.



Fonte: Próprio autor (2024).

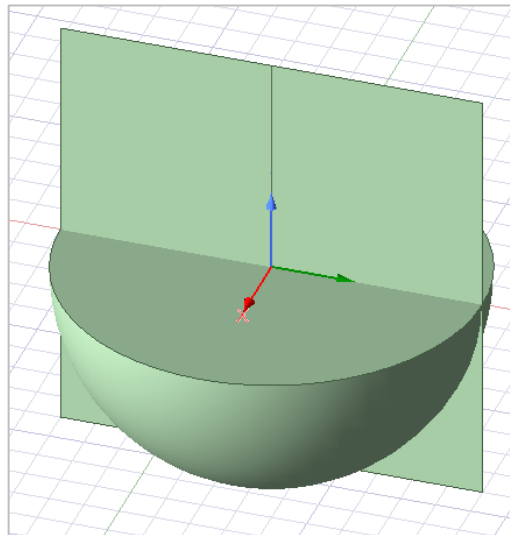
Para a obtenção dos resultados do campo magnético, fez-se necessário criar o plano de análise $x = 0$, limitado pelas coordenadas de armazenamento de campo (*FaceList*), analogamente ao feito no plano do solo (Figura 64) juntamente com comando de armazenamento no *setup* (Figura 72). A fim de criar tal plano, utilizou-se a caixa de ar como referência, seguindo o caminho *Box* → *Edit* → *Surface* → *Section*. O primeiro clique em *Box* deve ser executado com o botão direito. O caminho a ser seguido é apresentado na Figura 78. Ao selecionar a opção *Section*, abrirá a opção de definição desse plano de corte sobre a superfície da caixa, na qual é inserida a opção ZY. Assim é criado o plano (Figura 79), sobre o qual pontos podem ser definidos para a obtenção do campo magnético, conforme apresentado na Figura 80.

Figura 78 - Criação de um plano de análise ZY



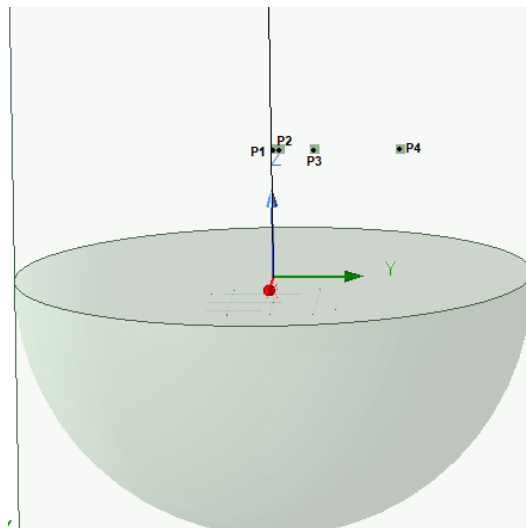
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 79 - Plano de análise ZY criado



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 80 - Atribuição dos pontos sobre os quais foi obtido o campo magnético



Fonte: Próprio autor (2024).

O campo magnético de pico simulado também se alinha com a teoria se comparado aos valores calculados por meio da Equação (2.5). Para evidenciar tal condição, é apresentado na Tabela 1 os valores de pico do campo magnético, simulados e calculados. Vale ressaltar, que essa análise é baseada na lei de Ampère para a condição em que se tem um fio infinito retilíneo. Portanto, foram escolhidos pontos próximos ao cabo de descida para satisfazer as condições de contorno imposta pela

teoria. Devido a isso, nota-se que os valores calculados e simulados estão próximos, com diferenças devidas a aproximação do modelo e fatores de natureza numérica.

O campo elétrico gerado na superfície do solo também é validado. Para isso, utiliza-se o plano armazenador de campo que foi definido, sendo utilizada uma linha radial que parte do ponto central (ponto de injeção de corrente) indo até a extremidade distante que fica a 20 m do ponto de origem. Desta forma, é possível determinar a variação do campo elétrico em qualquer posição ao longo deste eixo. Consequentemente, é possível determinar, também, o potencial elétrico ao longo do eixo.

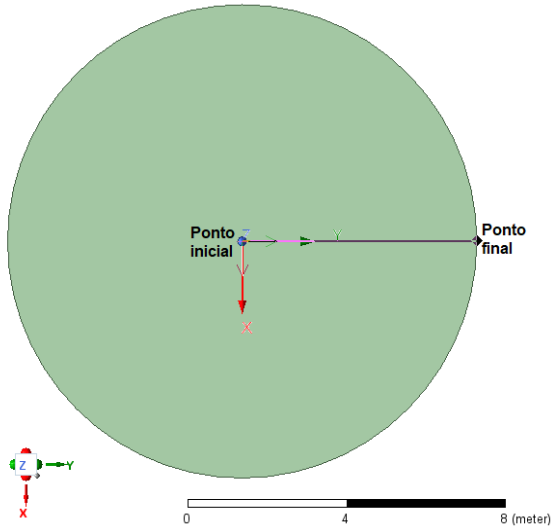
Na Figura 81 é apresentada a linha sobre a superfície indicando o ponto de injeção de corrente (ponto inicial) e o ponto final.

Tabela 1 - Campo magnético no momento de pico simulado e calculado.

Campo Magnético (A/m)	Calculado	Simulado
P1 (10 cm)	1591,5	1569,3
P2 (20 cm)	795,8	795,1
P3 (100 cm)	159,1	158,9
P4 (300 cm)	53,05	54,5

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 81 - Atribuição da linha sobre o plano de análise do solo.

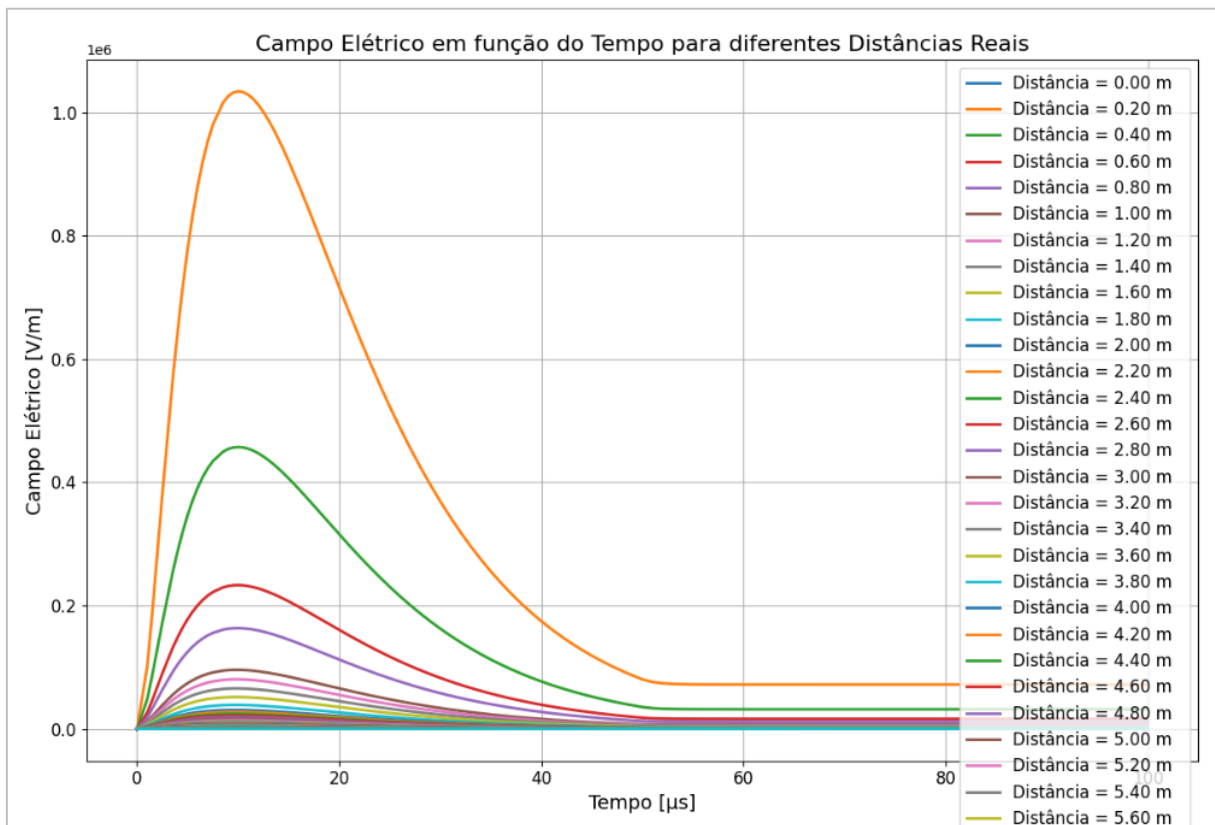


Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 82 são apresentadas as curvas relativas ao campo elétrico para várias posições, considerando o afastamento do ponto de injeção de corrente. Já na Figura 83, são apresentadas as curvas relativas ao potencial elétrico para as mesmas condições.

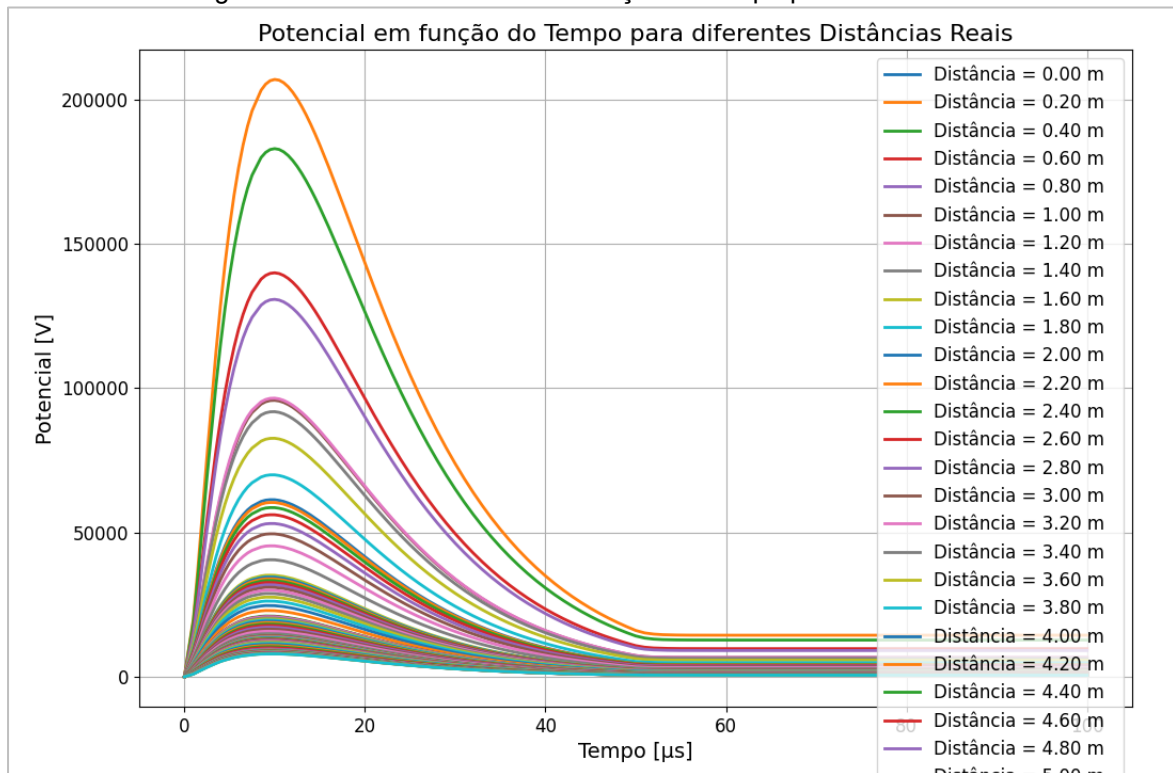
Em complemento, ao se analisar o pico do campo elétrico em cada ponto, tem-se uma distribuição espacial sobre o plano solo, como mostra a Figura 84. É importante ressaltar que como a variação do campo a partir do centro até a sua extremidade é bastante elevada, a resolução visual do HFSS implementa uma larga faixa de valores representada pela cor azul. Porém, a representação gráfica evidencia melhor essa variação. Essa mesma discrepância é observada na Figura 85 (campo elétrico) e na Figura 86 (potencial elétrico).

Figura 82 - Campo elétrico para pontos distantes do centro do solo.



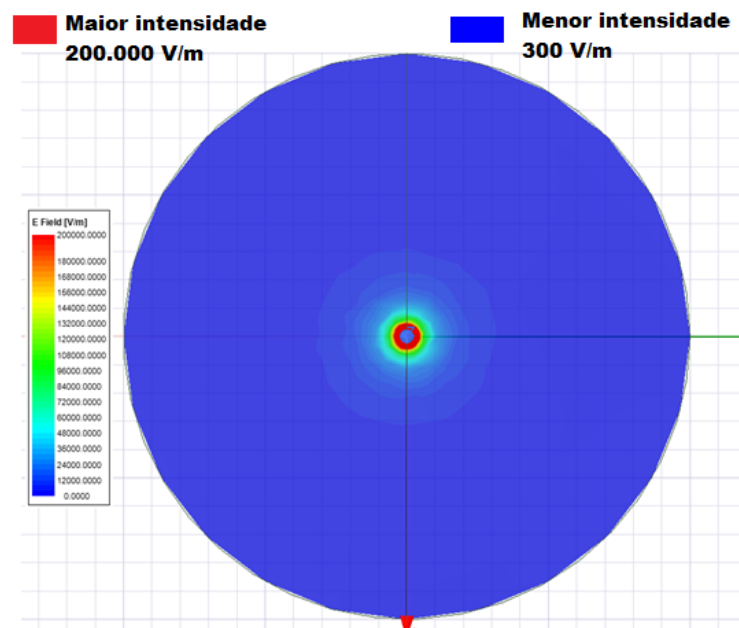
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 83 - Potencial elétrico em função do tempo para cada distância.



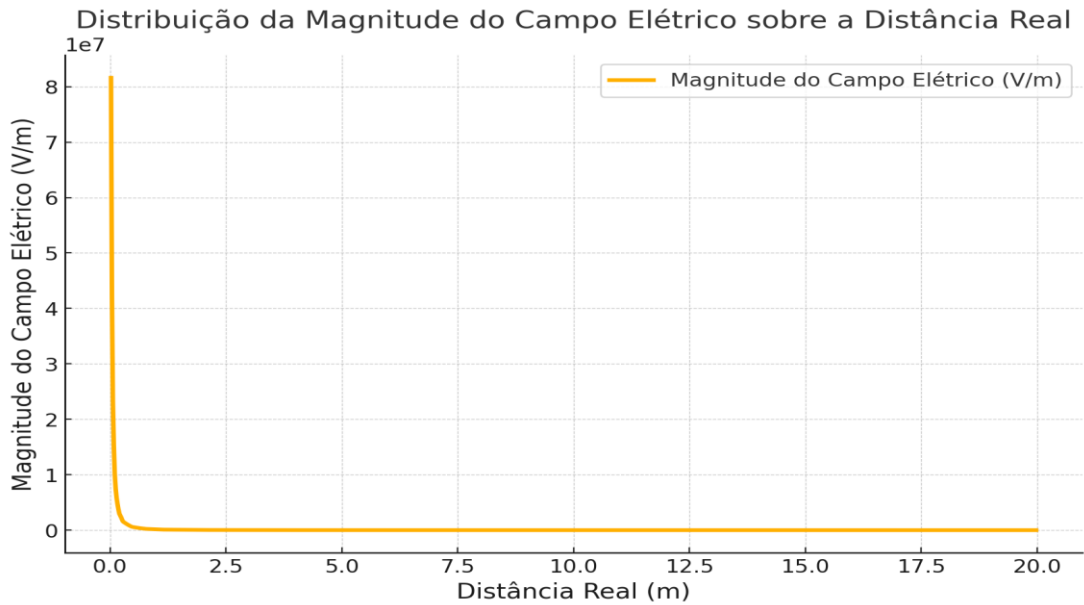
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 84 - Intensidade do campo elétrico no instante do pico da descarga.



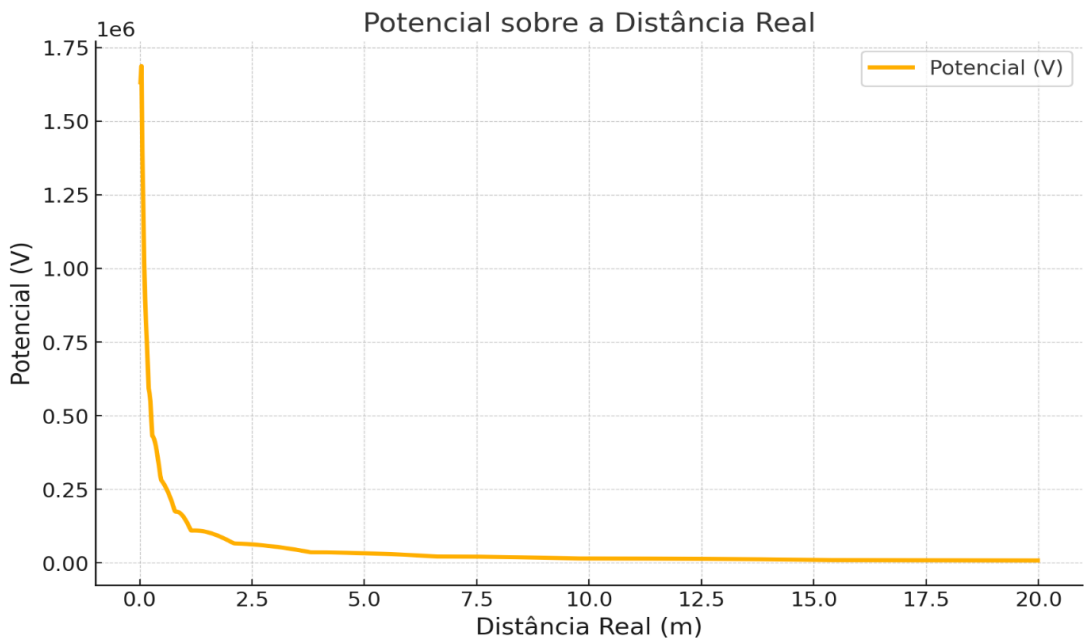
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 85 - Intensidade do campo elétrico no instante do pico da descarga.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 86 - Intensidade do potencial elétrico no instante do pico da descarga.



Fonte: Próprio autor (2024).

Fica evidente, portanto, que ambos o campo elétrico e o potencial elétrico de-
crescem exponencialmente, segundo as Equações (2.6) e (2.7). Na Tabela 2, são
apresentados alguns valores de campo elétrico para posicionamentos específicos,

tanto os obtidos por simulação, como os obtidos a partir das equações mencionadas. São apresentadas, também, as tensões de passo para os pares de pontos 1m - 2m e 1,5m - 2,5m. Os resultados indicam existir boa concordância entre os valores calculados e os simulados, como esperado. As diferenças observadas são de natureza numérica.

Tabela 2 - Amplitudes teórica e simulada do campo elétrico e da tensão de passo.

	Campo elétrico calculado (V/m)	Campo elétrico simulado (V/m)	Tensão de passo simulada (V)		Tensão de passo calculada (V)
P1 (1,0m)	159154,9431	161025,1155	P1-P3	79742	79577
P2 (1,5m)	70735,53	69203,7696			
P3 (2,0m)	39788,73	36457,7696			
P4 (2,5m)	25464,79	25703,3197	P2-P4	42710	41844
P5 (3,0m)	17683,88	17061,2863			
P6 (3,5m)	12992,24	13289,3551			

Fonte: Próprio autor (2024).

3.3 Aplicação Python para modelagem de malhas de aterramento.

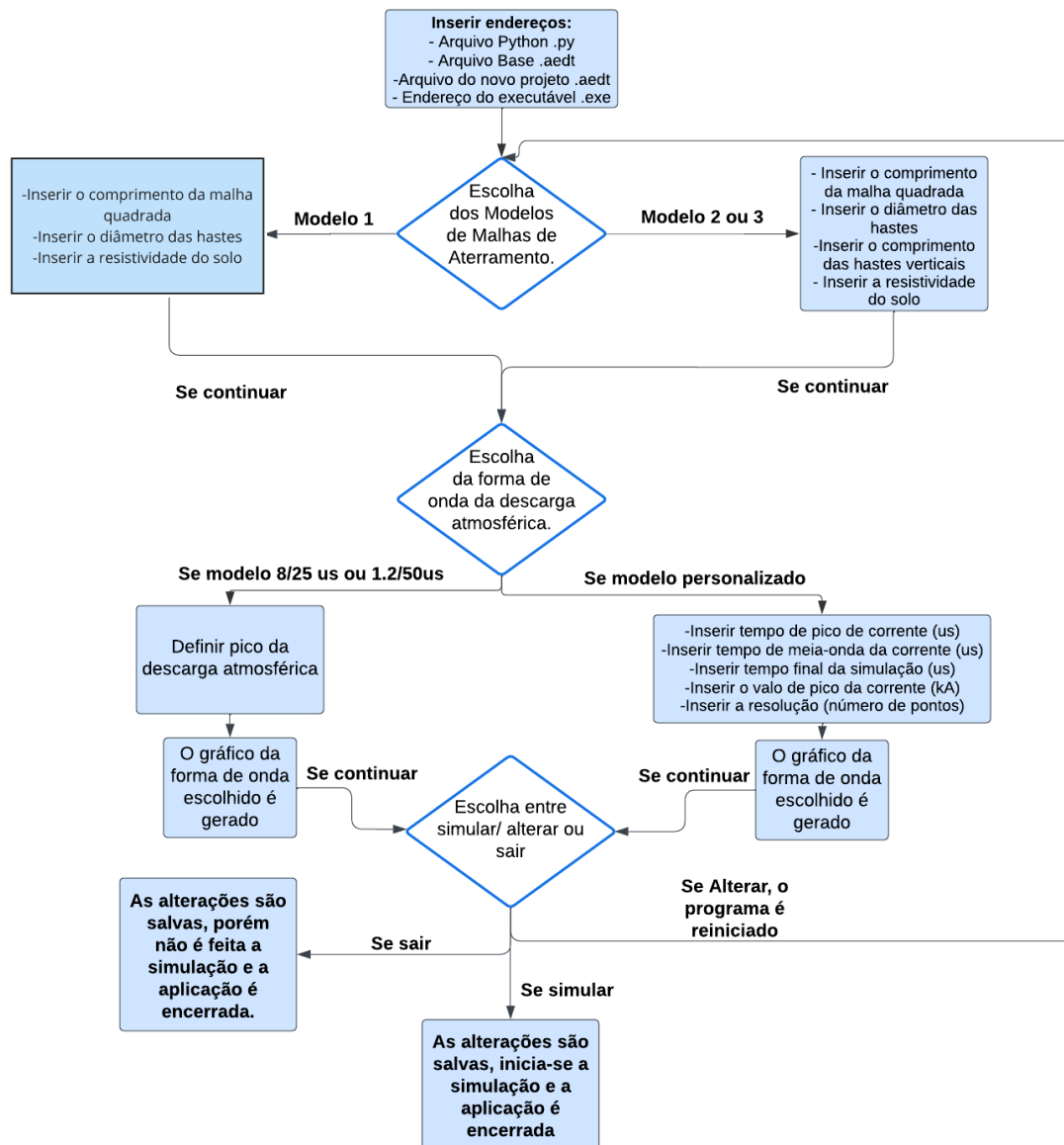
Neste capítulo é apresentada a aplicação em *Python* de maneira gradativa, a fim de que todo o processo de desenvolvimento possa ser mais bem acompanhado. Portanto, os procedimentos vão desde os códigos iniciais de interação com o HFSS, até a finalização da ferramenta para a geração da configuração completa das malhas de aterramento para modelagem no *software* 3D *Ansys* HFSS. Dessa maneira, à medida que se avança nas próximas seções, tem-se a gradativa evolução dos códigos, até o alcance do objetivo do presente trabalho. Adicionalmente, a cada aplicação será inicialmente apresentada a utilização pelo terminal do usuário, seguido do respectivo pseudocódigo desenvolvido para fins didáticos. Os códigos, de fato, são apresentados nos Apêndices.

Na Figura 87, é apresentado o fluxograma da aplicação completa para melhor entendimento da lógica de funcionamento desenvolvida. Ressalta-se que foi utilizado o editor de código-fonte desenvolvido pela empresa *Microsoft*, denominado *VSCode*

para todas as aplicações que serão apresentadas. Além disso, definiu-se que as aplicações escrevem os códigos em arquivo .py adaptados para a versão da linguagem Python do HFSS, para upload neste. Em suma, todos os comandos são desenvolvidos pela aplicação em um arquivo (fora do HFSS), sendo posteriormente executados automaticamente no próprio HFSS. Dessa maneira, possibilita-se desenvolver a configuração de malha desejada e seu sistema de injeção de correntes, além do solo circundante à malha, tipo de simulação e formato do sinal a ser aplicado, sem utilizar, necessariamente, a interface gráfica do software Ansys HFSS.

O usuário, ao desenvolver as aplicações, deve ficar atento ao local em que serão salvos os arquivos .py que serão executados no HFSS, bem como os projetos.aedt, seja para criar, ou modificar um já existente. Ademais, outro diretório que o usuário deve ter ciência é o do arquivo '*ansysedt.exe*' ou '*ansysedtsv.exe*' (versão estudantil). Esse é o executável principal do *Ansys Electronics Desktop*, localizado na pasta em que foi instalado o *software*. Isso se deve ao fato de que este é a entrada de interação entre aplicações externas e o *software*. Vale, também, ressaltar que os códigos desenvolvidos podem ser acessados através dos links disponíveis nos apêndices (repositório *GitHub*). Isso se fez necessário devido aos códigos desenvolvidos serem bastante extensos.

Figura 87 - Fluxograma explicativo da aplicação



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.1 Abertura de projetos no HFSS utilizando Python.

Inicialmente, a abordagem mais básica para a interação entre o HFSS e uma aplicação em *Python* consiste em criar um projeto, ou abrir um projeto existente por uma aplicação. Nesse sentido, para criar um projeto, inicialmente, coloca-se o diretório seguido do nome do arquivo a ser compilado pelo HFSS, por exemplo: 'C:\caminho\para\o\arquivo\nome_arquivo.py'. Na sequência, o endereço para salvar

o novo projeto de simulação do HFSS, como por exemplo: 'C:\caminho\ para\o\novo\projeto\nome_projeto.aedt'. Por fim, o endereço do 'ansysedt.exe' ou 'ansysedtsv.exe', por exemplo: 'C:\caminho\para\seu\ansysedtsv.exe'. Tais ações são apresentadas na Figura 88, ao compilar o código desenvolvido.

Figura 88 - Criação de novos projetos no HFSS.

```
PS C:\Users\flavi> & C:/Users/flavi/AppData/Local/Programs/Python/Python312/python.exe "c:/Users/flavi/OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco/TCC/Testes para o TCC/Códigos/Sucesso/abrir_new_project.py"

Insira o caminho para o arquivo Python (ex: C:\caminho\para\seu\nome_arquivo.py):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Teste\proje.1.py

Insira o caminho para o projeto do HFSS(ex: C:\caminho\para\seu\nome_projeto.aedt):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Teste\teste_abertura.aedt

Insira o caminho para o ansysedtf (ex: C:\caminho\para\seu\ansysedtsv.exe):
C:\Program Files\AnsysEM\Ansys Student\v232\Win64\ansysedtsv.exe
```

Fonte: Próprio autor (2024).

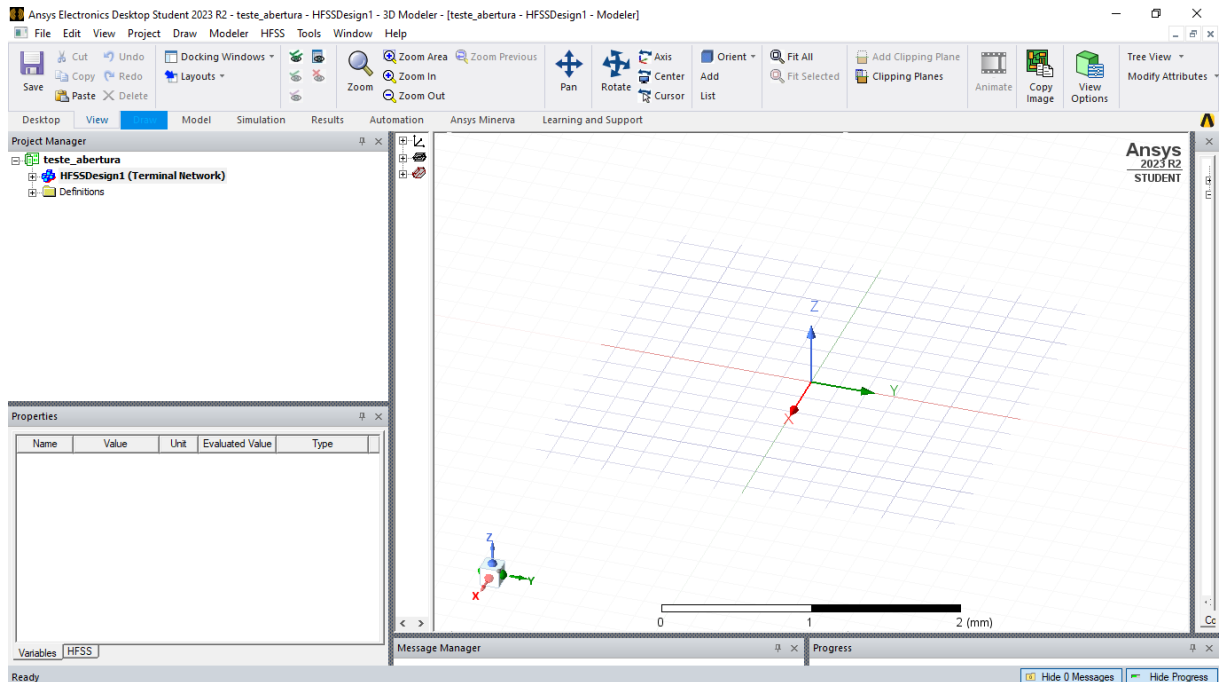
Com a entrada das informações pelo usuário, será automaticamente aberto um novo projeto no HFSS, tanto na sua interface gráfica, como também, o salvo no diretório designado (ver Figura 89, Figura 90, Figura 91).

Figura 89 – Inicialização do HFSS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 90 - Abertura de novo projeto.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 91 - Salvamento automático no diretório designado.

OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco > TCC > Teste >				
Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho	
teste_abertura.aedtresults	01/03/2024 15:20	Pasta de arquivos		
proje	01/03/2024 15:19	Arquivo Fonte Pyt...	1 KB	
teste_abertura	01/03/2024 15:20	Ansys Electronics ...	29 KB	
teste_abertura.aedt.lock	01/03/2024 15:20	Arquivo LOCK	1 KB	

Fonte: Próprio autor (2024).

Para a presente aplicação, foi desenvolvido o código disponível no APÊNDICE 1. Na Figura 92 é apresentado o pseudocódigo, apresentando as funções do *Python* e seus comentários e na Figura 93 observa-se um fluxograma explicando o funcionamento da aplicação. Dentre as bibliotecas usadas, destaca-se a *subprocess*, pois ela possibilita a interação e integração do *script Python* com o HFSS, visto que proporciona a automatização da abertura e execução de *scripts* no HFSS, de forma a evitar a necessidade de sua abertura manual do *software* para a execução do *script*.

A biblioteca *time* possibilita controlar o fluxo temporal do *script* ao adicionar uma pausa de segurança ao fim do código (*time.sleep()*), visando garantir que o HFSS tenha tempo suficiente para inicializar completamente, assim como começar o

processor de compilação do código. A biblioteca `os` permite ao *script* interagir diretamente com o sistema de arquivos e o sistema operacional do computador, de maneira a possibilitar a validação do caminho fornecido pelo usuário para o executável, mediante a função `os.path.isfile()`.

No que se refere à abertura de um projeto já existente, a estratégia é como a apresentada no pseudocódigo da Figura 92, em que o usuário entrará com todos os endereços, lembrando que o projeto já deve existir em algum diretório do seu computador. Entretanto, há algumas mudanças, sobretudo no conteúdo do arquivo.py que será executado, visto que ele se torna mais simplificado, pois seu objetivo é de apenas abrir um projeto existente. O pseudocódigo é apresentado Figura 94, o fluxograma na Figura 95 e o código fonte está disponível no link do APÊNDICE 2.

Figura 92 - Pseudocódigo para criação de um projeto no HFSS.

```
# Importação de bibliotecas importantes
Importar biblioteca subprocess
Importar biblioteca time
Importar biblioteca os

# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo .py a ser compilado no HFSS
Solicitar ao usuário fornecer o caminho para o arquivo Python, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_arquivo.py)

# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo do novo projeto de simulação do HFSS
Solicitar ao usuário caminho para o novo projeto do HFSS, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_projeto.aedt)

# Troca as \ por / pois é assim que o HFSS padroniza os endereços
Substituir \ por / no caminho do projeto

Solicitar ao usuário o caminho do arquivo ansyedt.exe, exemplo:
(ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansyedt.exe) ou (ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansyedt.exe)

# Função para validar o endereço dado do ansyedt
Definir Função obter_caminho_válido(endereço):
    Enquanto o caminho fornecido não for válido:
        Solicitar caminho do ansyedt ao usuário
        Se caminho for 'sair', encerrar aplicação
        Se caminho for válido, retornar caminho
        Se caminho não for válido, informar erro e solicitar novamente

Chamar a Função obter_caminho_válido (endereço fornecido pelo usuário)

# Conteúdo do código HFSS a ser escrito no arquivo .py que será executado no HFSS, no qual tem-se a inicialização do
HFSS, a criação de um novo projeto, bem como o seu salvamento no diretório designado
Gerar código HFSS com inicialização, criação de projeto e salvamento

# Escrever código HFSS em arquivo Python
Escrever código gerado no arquivo Python, .py.

# Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS

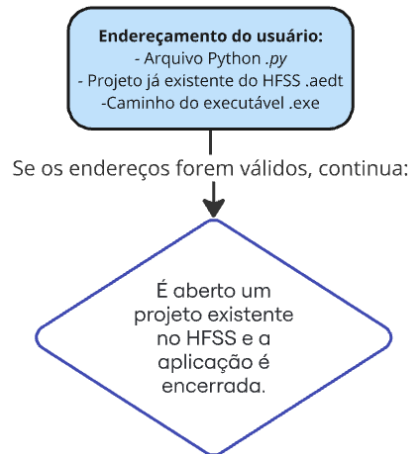
# Executa o comando em segundo plano, de maneira de para além de executar o arquivo, permite a abertura da interface
gráfica do HFSS já com o novo projeto
Executar comando em segundo plano

# Tempo de atraso para executar todo o comando de abertura e carregamento do código no HFSS sem finalizar a compila-
ção do código
Aguardar tempo de execução

Fim
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 93-Fluxograma para abertura projeto existente



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 94 - Pseudocódigo para abertura de projeto já existente.

```

# Importação de bibliotecas importantes
Importar biblioteca subprocess
Importar biblioteca time
Importar biblioteca os

# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo .py a ser compilado no HFSS
Solicitar ao usuário fornecer o caminho para o arquivo Python, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_arquivo.py)
# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo do projeto de simulação do HFSS
Solicitar ao usuário caminho para o projeto do HFSS, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_projeto.aedt)

Solicitar ao usuário o caminho do arquivo ansysedt.exe, exemplo:
(ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansysedtsv.exe) ou (ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansysedt.exe)

# Verificar se o projeto do HFSS existe
Se o projeto do HFSS não for encontrado:
    Exibir mensagem de erro
    Encerrar o script

# Converter barras inclinadas para barras invertidas nos caminhos devido a semântica do HFSS
Substituir \ por / no caminho do projeto

# Gerar conteúdo do código HFSS a ser escrito no arquivo .py, note que é mais simplificado comparado com a ação de
criar uma aplicação e salvá-la em algum diretório
Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela e abrir o projeto

# Escreve o código que será executado no HFSS no arquivo Python (.py)
Escrever código gerado no arquivo Python

# Função para validar o endereço dado do ansysedt
Definir Função obter_caminho_válido(endereço):
    Enquanto o caminho fornecido não for válido:
        Solicitar caminho do ansysedt ao usuário
        Se caminho for 'sair', encerrar aplicação
        Se caminho for válido, retornar caminho
        Se caminho não for válido, informar erro e solicitar novamente

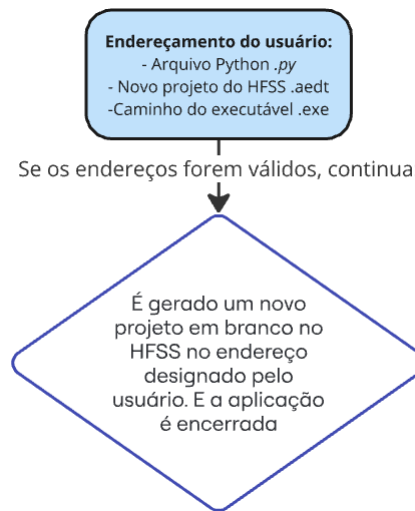
Chamar a Função obter_caminho_válido (endereço fornecido pelo usuário)

# Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS

# Executa o comando em segundo plano, de maneira de para além de executar o arquivo, permite a abertura da interface
gráfica do HFSS já com o novo projeto
Executar comando em segundo plano
# Tempo de atraso para executar todo o comando de abertura e carregamento do código no HFSS sem finalizar a compila-
ção do código
Aguardar tempo de execução
Fim
  
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 95- Fluxograma para criação de novo projeto no HFSS



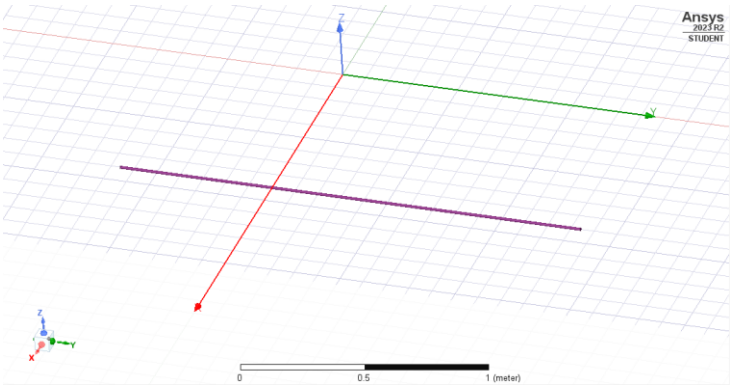
Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.2 Modificação de parâmetros no HFSS

Para fins da aplicação que está sendo desenvolvida, suponha-se que há uma geometria no HFSS composta por uma simples haste de cobre de 2 m de comprimento (Figura 96) e deseja-se alterar o comprimento para 4 m. Para tanto, como apresentado Figura 97, o usuário deverá entrar com os mesmos endereços apresentados na seção 3.1.1. Além disso, deverá ser inserido o nome do *design* no qual serão feitas alterações, visto que um mesmo projeto no HFSS suporta várias aplicações e geometrias. Por fim, o usuário deve entrar com o comprimento desejado para a haste. Com isso, o HFSS abrirá automaticamente o projeto com a respectiva mudança efetuada (Figura 98).

Dessa maneira, para efetuar tal modificação na haste mediante aplicação em *Python*, sem a necessidade de utilizar a interface gráfica do HFSS, desenvolveu-se o código apresentado no APÊNDICE 3, cujo pseudocódigo é apresentado na Figura 99 e fluxograma explicativo na Figura 100.

Figura 96 - Hastes de cobre. (a) Esboços; (b) Dimensões (ponto inicial e final)



(a)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Segment ...	Line		
Point1	0 ,-1 ,0	meter	0meter , -1mete...
Point2	0 ,1 ,0	meter	0meter , 1meter...

(b)

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 97 - Solicitação de informações para modificar o comprimento da haste.

```
Insira o caminho para o arquivo Python (ex: C:\caminho\para\seu\arquivo.py):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Códigos\Sucesso\modificar_geome
tria_upload_HFSS.py

Insira o caminho para o projeto do HFSS (ex: C:\caminho\para\seu\projeto.aedt):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha nitaria com altera
coes\Projeto_teste.aedt

Insira o nome do design do projeto:
haste_teste

Insira o comprimento da haste:
4
```

Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 98 - Mudança nos parâmetros automática.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Segment ...	Line		
Point1	0 ,-2 ,0	meter	0meter , -2mete...
Point2	0 ,2 ,0	meter	0meter , 2meter...

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 99 - Pseudocódigo para modificação de haste existente.

```
# Importação de bibliotecas importantes
Importar biblioteca subprocess
Importar biblioteca time
Importar biblioteca os
# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo .py a ser compilado no HFSS
Solicitar ao usuário fornecer o caminho para o arquivo Python, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_arquivo.py)

# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do arquivo do projeto de simulação do HFSS
Solicitar ao usuário caminho para o projeto do HFSS, exemplo: (C:\\caminho\\para\\seu\\nome_projeto.aedt)

# Verificar se o projeto do HFSS existe
Se o projeto do HFSS não for encontrado:
    Exibir mensagem de erro
    Encerrar o script

# Obter nome do projeto sem a extensão .aedt
Extrair nome do projeto sem a extensão do caminho fornecido

# Solicitar nome do design do projeto do HFSS
Solicitar nome do design do projeto ao usuário

# Converter barras inclinadas para barras invertidas nos caminhos devido a semântica do HFSS
Substituir \ por / no caminho do projeto

# Solicitar comprimento da haste
Solicitar comprimento da haste ao usuário

# Calcular pontos de início e fim da haste
Calcular ponto início = -comprimento_haste / 2
Calcular ponto fim = comprimento_haste / 2

# Gerar código HFSS
Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela, abrir o projeto e modificar propriedades da haste

# Escrever código gerado no arquivo Python
Escrever código gerado no caminho do arquivo Python

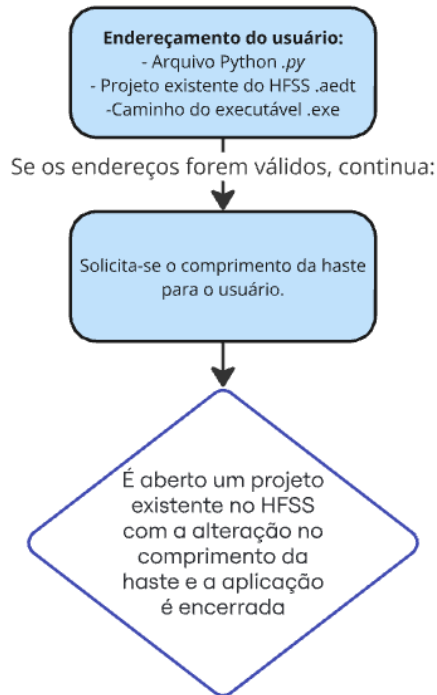
# Definir função para validar o caminho do ansysedt
Definir função obter_caminho_valido:
    Enquanto o caminho não for válido:
        Solicitar caminho do ansysedt ao usuário
        Se caminho for 'sair', encerrar
        Se caminho for válido, retornar caminho
        Se caminho não for válido, informar erro e solicitar novamente

# O usuário será solicitado para fornecer o caminho do executável ansysedtsv.exe
Solicitar ao usuário o caminho do arquivo ansysedt.exe, exemplo:
(ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansysedtsv.exe) ou (ex: C:\\caminho\\para\\seu\\ansysedt.exe)
Validar caminho com a função obter_caminho_valido

# Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS
# Executar comando em segundo plano
Executar comando em segundo plano
# Aguardar tempo de execução
Aguardar tempo de execução
Fim
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 100- Fluxograma explicativo para alteração do comprimento da haste.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.3 Alteração de um modelo de malha unitária e solo hemisférico

Nessa etapa, será modificado um modelo geométrico padrão de malha de aterramento unitário já desenhado no HFSS, ou seja, um arquivo .aedt para uma malha quadrada, enterrada em um solo hemisférico a 50 cm de profundidade, análogo ao construído no subtópico 3.1.2. Tal arquivo, disponibilizado ao usuário, que poderá executar o *download* em seu computador e mediante a aplicação em *python*, precisará apenas fornecer o comprimento da malha e a resistividade do solo desejados. É preciso, também, entrar com o diretório do arquivo .aedt, e o local do arquivo .py que será executado no HFSS. Por exemplo, o arquivo base com o nome *teste_malha_unit.aedt*, originalmente contendo dados de uma malha 3mx3m e solo hemisférico de resistividade de 1000 Ω/m , será modificado externamente pelo usuário mediante a *interface* da aplicação (Figura 101). É importante notar que o usuário da aplicação alterou o comprimento da malha para 4mx4m e a resistividade do solo para 500 Ω/m .

Figura 101 - Interface da aplicação da malha unitária.

```
PS C:\Users\flavi> & C:/Users/flavi/AppData/Local/Programs/Python/Python312/python.exe "c:/Users/flavi/One
os/Sucesso/tent1_mudar_malha.py"

Insira o caminho para o arquivo Python (ex: C:\caminho\para\seu\arquivo.py):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Teste\teste1.py

Insira o caminho para o projeto do HFSS (ex: C:\caminho\para\seu\projeto.aedt):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha unitaria co
m alteracoes\teste_malha_unit.aedt

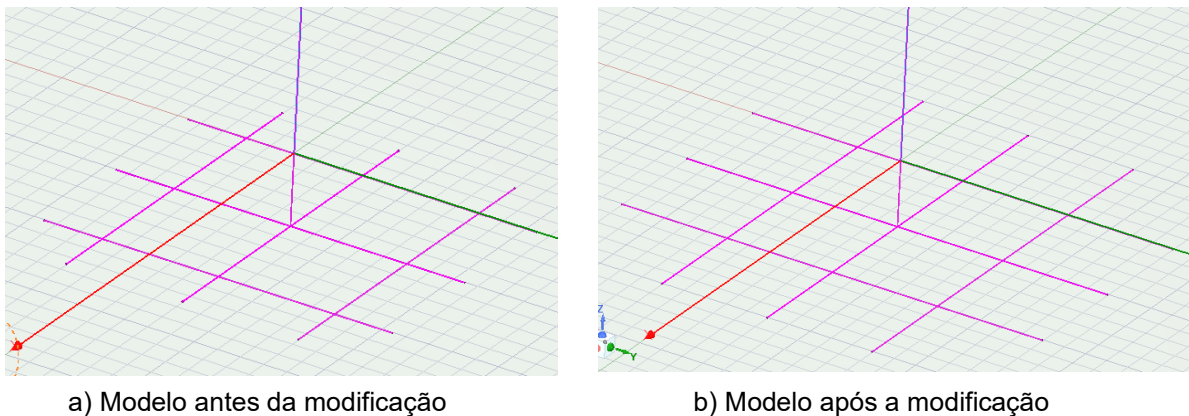
Insira o comprimento da malha quadrada:
4

Insira a resistividade do solo:
500
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Com os dados fornecidos pelo usuário, o modelo da malha automaticamente abrirá no HFSS com as modificações desejadas quanto ao comprimento da malha e a resistividade do solo (Figura 102). Ressalta-se que nessa aplicação, o comprimento da malha é recebido pelo HFSS como um parâmetro para uma variável interna criada para as medidas de toda a malha, e a resistividade sendo parâmetro interno.

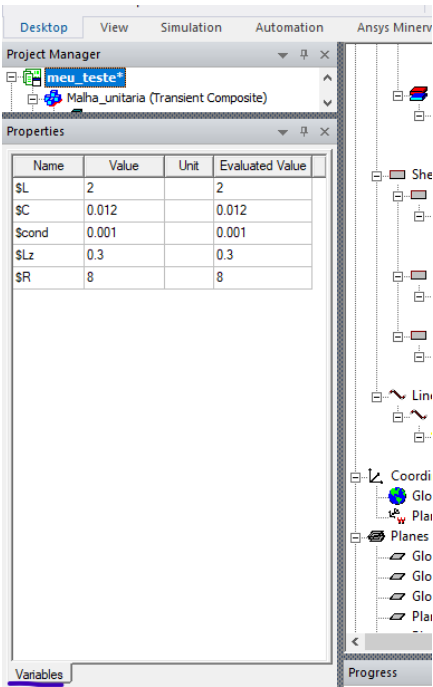
Figura 102 - Alterações na malha, antes e após a modificação



Fonte: Próprio autor (2024).

Em suma, é possível declarar variáveis internas e usá-las nos parâmetros de geometria e do modelo em geral, simplesmente colocando \$(nome da variável), aparecendo automaticamente em *Properties* → *Variables* da aplicação (Figura 103).

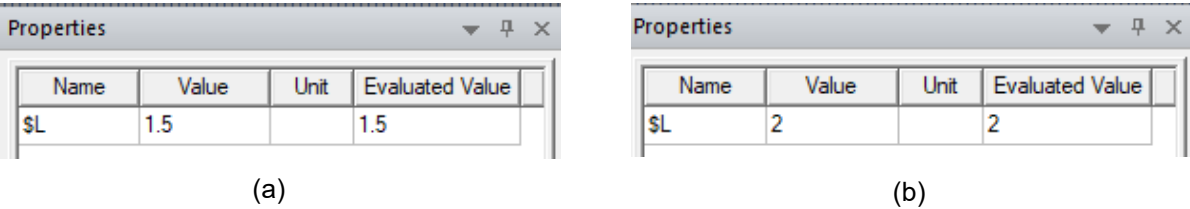
Figura 103 - Exemplo de implementação variáveis internas no HFSS



Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 104, Figura 105 e Figura 106, nota-se que a variável interna '\$L' é alterada para 2m, pois se refere ao comprimento da metade da haste até a sua extremidade, e o parâmetro condutividade, que é definido com o inverso da resistividade, também foi modificado para 0,002 m/Ω, respectivamente.

Figura 104 - Comprimento da malha. (a) Antes (b) Depois



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 105 - Resistividade do solo

Properties of the Material				
	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	11.9	
	Relative Permeability	Simple	1	
	Bulk Conductivity	Simple	0.001	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Mass Density	Simple	2330	kg/m ³
	- Measured Frequency	Simple	9.4e+09	Hz

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 106 - Resistividade do solo, após da mudança do usuário.

Properties of the Material				
	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	11.9	
	Relative Permeability	Simple	1	
	Bulk Conductivity	Simple	0.002	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Mass Density	Simple	2330	kg/m ³
	- Measured Frequency	Simple	9.4e+09	Hz

Fonte: Próprio autor (2024).

Ressalta-se que a criação de variáveis internas se torna um facilitador para que o HFSS receba as informações dos parâmetros da malha, solo, dentre outros, de maneira a reduzir, sobretudo, a dimensão do arquivo `.py` consideravelmente, pois a associação de um valor recebido da aplicação a uma variável interna no HFSS é direta. Por outro lado, se a alteração fosse realizada de fato no parâmetro da geometria, haveria a necessidade de serem abertos vários subprocessos para que a modificação fosse feita. Isso pode ser observado no código associado a este capítulo, pois o comprimento da malha foi associado a uma variável interna do HFSS, enquanto os outros foram associados diretamente à geometria. Isso exigiu muito mais linhas de código se comparado com a associação direta via variáveis internas.

O código desenvolvido com os respectivos comentários, o pseudocódigo, e o fluxograma encontram-se respectivamente: APÊNDICE 4, Figura 107, e Figura 108.

Sendo assim, o usuário apenas com o fornecimento da localização do arquivo base, bem como do local em que vai armazenar o arquivo .py e as informações de comprimento da malha e resistividade do solo, obterá um modelo de malha de aterramento em 3D pronto para simulação e aquisição de resultados.

Figura 107 - Pseudocódigo para alterações na malha de aterramento unitária.

```
# Importar bibliotecas necessárias
Importar subprocess
Importar time
Importar os

# Solicitar ao usuário os caminhos necessários
Solicitar caminho para o arquivo Python do usuário
Solicitar ao usuário o caminho para o projeto que deseja modificar do HFSS
Solicitar ao usuário o caminho do arquivo ansyedt.exe, exemplo:

# Verificar se o projeto do HFSS existe
Se o projeto do HFSS não for encontrado:
    Exibir mensagem de erro
    Encerrar o script

# Obter nome do projeto sem a extensão .aedt
Extrair nome do projeto sem a extensão do caminho fornecido

# Solicitar comprimento da malha quadrada
Solicitar comprimento da malha quadrada ao usuário

# Solicitar resistividade do solo
Solicitar resistividade do solo ao usuário

# Ajustar caminhos para a semântica do HFSS
Substituir \ por / nos caminhos

# Gerar código HFSS
Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela, abrir o projeto, definir o projeto ativo, mudar propriedades,
atribuir material e editar material
- Inicializar ScriptEnv: ScriptEnv.Initialize("Ansoft.ElectronicsDesktop")
- Restaurar janela do HFSS: oDesktop.RestoreWindow()
- Abrir o projeto especificado: oDesktop.OpenProject("{caminho_projeto}")
    - Definir o projeto ativo com base no nome extraído: projeto ativo: oProject =
oDesktop.SetActiveProject("{nome_projeto}")
- Alterar propriedade do projeto para atualizar o comprimento da haste: oProject.ChangeProperty(...)
- Definir o design ativo no projeto
- Definir o editor ativo como "3D Modeler"
- Atribuir material "SoloTeste1" a "Sphere1": oEditor.AssignMaterial(...)
- Editar propriedades do material "SoloTeste1" com base na resistividade fornecida: oDefinitionMana-
ger.EditMaterial("SoloTeste1", ...)

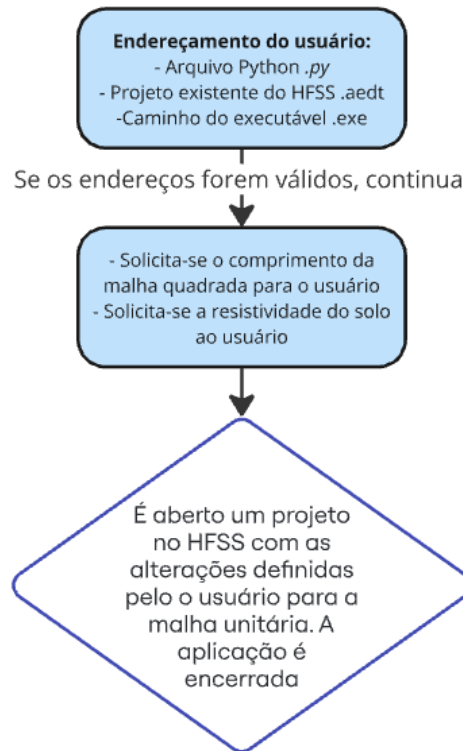
# Escrever código HFSS no arquivo Python
Abrir arquivo Python no caminho especificado para escrita
Escrever código gerado no arquivo Python
Fechar o arquivo após escrita

# Definir função para validar o caminho do ansyedt
Definir função obter_caminho_valido:
    Enquanto o caminho não for válido:
        Solicitar caminho do ansyedt ao usuário
        Se caminho for 'sair', encerrar
        Se caminho for válido, retornar caminho
        Se caminho não for válido, informar erro e solicitar novamente

# Obter e validar o caminho do ansyedt
Solicitar e validar caminho do ansyedt do usuário
# Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS
# Executar comando em segundo plano
Executar comando em segundo plano
# Aguardar tempo de execução
Aguardar tempo de execução
Fim
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 108 - Fluxograma referente à alterações na malha unitária.



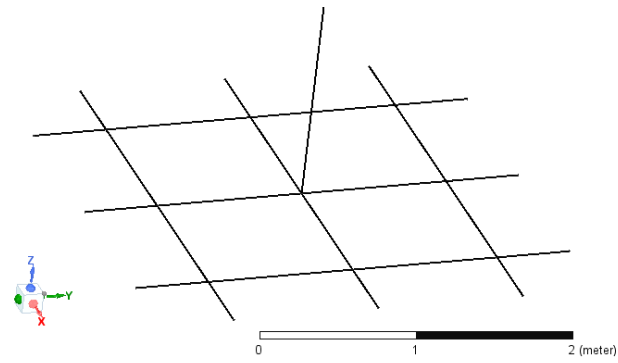
Fonte: Próprio autor (2024).

Diante do exposto, para a continuidade das próximas etapas da aplicação, será sempre utilizada a estratégia de personalizar previamente um arquivo base do HFSS, com todos os parâmetros a serem recebidos da aplicação em *Python*, já associados a variáveis internas. Além disso, o arquivo interno já terá parte da geometria intrínseca do modelo de malha de aterramento em solo hemisférico, conforme já apresentado na fundamentação.

3.3.4 Escolha entre 3 modelos de malhas de aterramento pelo usuário

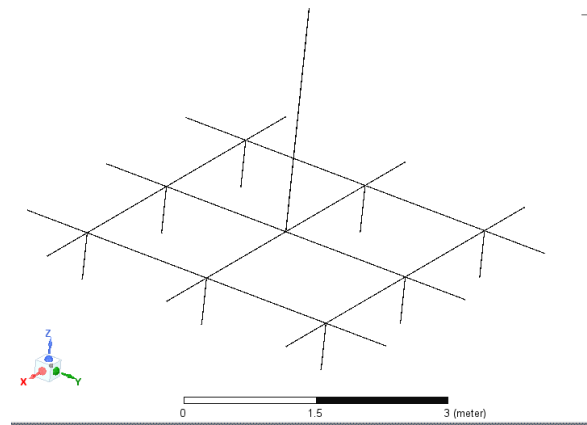
Na presente etapa, acrescentaram-se algumas funcionalidades na aplicação, como a opção de escolha entre três modelos diferentes de malhas. O modelo 1, é uma malha de aterramento com eletrodo totalmente horizontal (Figura 109). O modelo 2 é caracterizado pelo acréscimo de hastes verticais nas intersecções/junções dos retículos, como apresentado Figura 110. E por fim, o modelo 3, onde as hastes apresentam uma inclinação (ver Figura 111).

Figura 109-Modelo 1 da malha de aterramento.



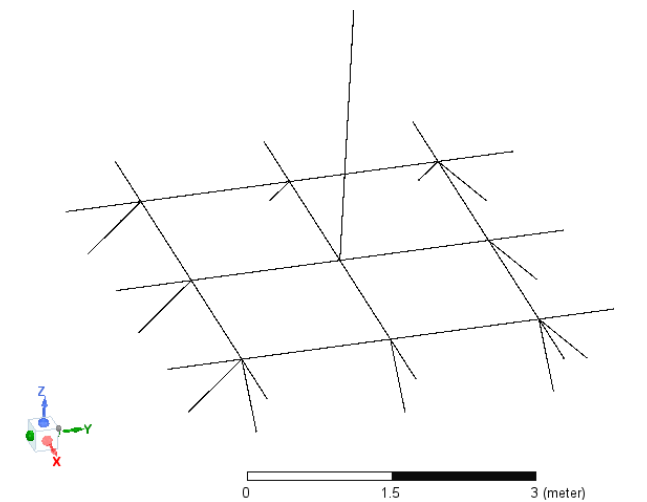
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 110 - Modelo 2 da malha de aterramento.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 111 - Modelo 3 da malha de aterramento.



Fonte: Próprio autor (2024).

Para o modelo 1, o usuário pode definir o comprimento da malha unitária, o diâmetro das hastes de cobre e a resistividade do solo. Nos modelos 2 e 3, o usuário além de colocar os mesmos parâmetros do modelo 1, pode, também, definir o comprimento das hastes verticais. Na Figura 112, a aplicação está requisitando do usuário as informações referentes aos endereços necessários, tanto do arquivo `.py`, quanto do arquivo base fornecido ao usuário, além do endereço e nome do novo projeto que será desenvolvido conforme as mudanças do usuário. Além de requisitar qual modelo o usuário deseja construir, que, nesse caso, foi escolhido o modelo 2.

Figura 112 - Requisições iniciais feitas ao usuário.

```

Insira o caminho para o arquivo Python (ex: C:\caminho\para\seu\arquivo.py):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Teste\teste.3.py

Insira o caminho para o projeto base do HFSS (ex: C:\caminho\para\seu\projeto.aedt):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha nitaria com alteracoes\teste_malha_unit.aedt

Insira o caminho para o projeto novo do HFSS baseado em suas alterações (ex: C:\caminho\para\seu\projeto):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha nitaria com alteracoes\meu_teste2.aedt

Insira o modelo desejado (1, 2 ou 3) ou digite 'sair' para sair da aplicação.
Modelo 1:Malha horizontal.
Modelo 2:Malha com hastes verticais.
Modelo 3:Malha com hastes verticia inclinadas.
2

```

Fonte: Próprio autor (2024).

Uma vez inseridos os endereços e escolhido o modelo, parte-se para definição dos parâmetros da malha e do solo (Figura 113). Em seguida, o modelo começa a ser gerado automaticamente baseado em escolha e parâmetros inseridos (Figura 114 e Figura 115, respectivamente). Nota-se que as seguintes variáveis se referem a: a variável interna $\$C$ é o diâmetro das hastes, $\$L$ é metade do comprimento das hastes, $\$cond$ é a condutividade do solo, e $\$LZ$ é o comprimento da haste vertical. O código referente à etapa está disponível no APÊNDICE 8, seu pseudocódigo na Figura 116, e o fluxograma na Figura 117. Em síntese, é possível que o usuário escolha entre três modelos de malha unitária, com possibilidade de alterar seu comprimento, o diâmetro das hastes, e a resistividade do solo. Nas etapas posteriores, será automatizada a replicação da malha unitária para a criação de modelos com maiores dimensões que necessitam de números maiores de reticulados, visto que, até o momento, a aplicação só permite diminuir ou aumentar o modelo unitário.

Figura 113 - Atribuição dos parâmetros.

```

Insira o comprimento da malha quadrada:
5

Insira o diâmetro das hastes entre 10-15 mm:
12

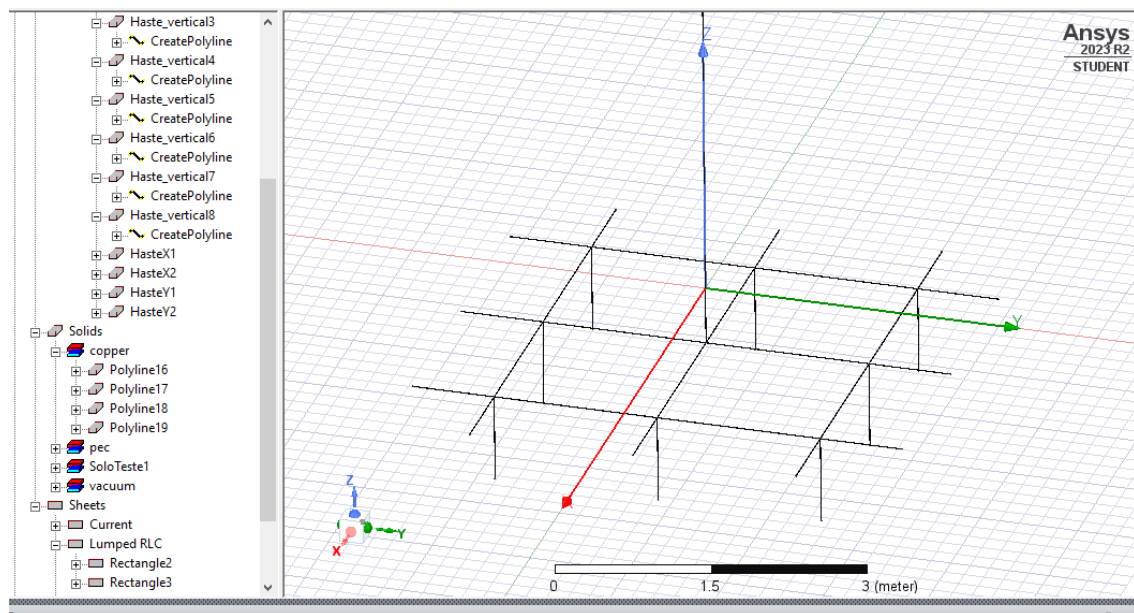
Insira o comprimento das hastes verticais:
0.9

Insira a resistividade do solo:
1111
Executando o modelo 2...
Carregando...

```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 114 - Modelo 2 gerado.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 115 - Alterações dos parâmetros observados pelas variáveis internas.

Properties			
Name	Value	Unit	Evaluated Value
\$L	2.5		2.5
\$C	0.012		0.012
\$cond	0.0009000900090009		0.000900090001
\$Lz	0.9		0.9
\$R	6	meter	6meter

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 116 - Pseudocódigo para escolha dos tipos de malha e seus parâmetros.

```

# Importar bibliotecas necessárias
Importar subprocess
Importar time
Importar os
Importar sys
Importar psutil

# Solicitar ao usuário os caminhos necessários
Solicitar caminho para o arquivo Python do usuário
Solicitar caminho para o projeto base do HFSS do usuário
Solicitar caminho para o novo projeto do HFSS do usuário
Solicitar caminho para o executável ansyedt.exe

# Verificar se o projeto base do HFSS existe
Se o projeto base do HFSS não for encontrado:
    Exibir mensagem de erro
    Encerrar o script

# Obter nome do projeto sem a extensão.aedt
Extraír nome do projeto base sem a extensão do caminho fornecido

# Ajustar caminhos para a semântica do HFSS
Substituir \ por / nos caminhos

Definir função modelo_1:
    # Solicitar entradas do usuário
    Solicitar comprimento da malha quadrada ao usuário
    Solicitar raio das hastes ao usuário
    Solicitar resistividade do solo ao usuário

    # Gerar código HFSS
    Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela, abrir o projeto base, definir projeto ativo, alterar pro-
    priedades do projeto, salvar como novo projeto

    # Escrever código HFSS no arquivo Python
    Abrir arquivo Python no caminho especificado para escrita
    Escrever código gerado no arquivo Python
    Fechar o arquivo após escrita

    # Definir caminho completo para o ansyedt.exe
    Definir caminho para o executável ansyedt.exe

    # Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
    Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS

    # Executar comando em segundo plano
    Executar comando em segundo plano

    # Animação de carregamento
    Enquanto o processo estiver em execução:
        Exibir animação de carregamento
        Verificar se o arquivo de saída foi criado ou modificado recentemente
        Se o arquivo foi modificado recentemente:
            Exibir mensagem de conclusão
            Encerrar animação

    # Aguardar tempo de execução
    Aguardar tempo de execução

Definir função modelo_2:
    # Solicitar entradas do usuário
    Solicitar comprimento da malha quadrada ao usuário
    Solicitar raio das hastes ao usuário
    Solicitar comprimento das hastes verticais ao usuário
    Solicitar resistividade do solo ao usuário

    # Gerar código HFSS
    Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela, abrir o projeto base, definir projeto ativo, alterar pro-
    priedades do projeto, criar hastes verticais, salvar como novo projeto

    # Escrever código HFSS no arquivo Python
    Abrir arquivo Python no caminho especificado para escrita
    Escrever código gerado no arquivo Python
    Fechar o arquivo após escrita

    # Definir caminho completo para o ansyedt.exe
    Definir caminho para o executável ansyedt.exe

    # Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
    Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS

```

```

# Executar comando em segundo plano
Executar comando em segundo plano

# Animação de carregamento
Enquanto o processo estiver em execução:
    Exibir animação de carregamento
    Verificar se o arquivo de saída foi criado ou modificado recentemente
    Se o arquivo foi modificado recentemente:
        Exibir mensagem de conclusão
        Encerrar animação

# Aguardar tempo de execução
Aguardar tempo de execução

Definir função modelo_3:
    # Solicitar entradas do usuário
    Solicitar comprimento da malha quadrada ao usuário
    Solicitar raio das hastes ao usuário
    Solicitar comprimento das hastes verticais inclinadas ao usuário
    Solicitar resistividade do solo ao usuário

    # Gerar código HFSS
    Gerar código HFSS para inicializar, restaurar janela, abrir o projeto base, definir projeto ativo, alterar pro-
priedades do projeto, criar hastes verticais inclinadas, salvar como novo projeto

    # Escrever código HFSS no arquivo Python
    Abrir arquivo Python no caminho especificado para escrita
    Escrever código gerado no arquivo Python
    Fechar o arquivo após escrita

    # Definir caminho completo para o ansyedt.exe
    Definir caminho para o executável ansyedt.exe

    # Gerar comando para executar arquivo Python no HFSS
    Gerar comando para executar o arquivo Python no HFSS

    # Executar comando em segundo plano
    Executar comando em segundo plano

    # Animação de carregamento
    Enquanto o processo estiver em execução:
        Exibir animação de carregamento
        Verificar se o arquivo de saída foi criado ou modificado recentemente
        Se o arquivo foi modificado recentemente:
            Exibir mensagem de conclusão
            Encerrar animação

    # Aguardar tempo de execução
    Aguardar tempo de execução

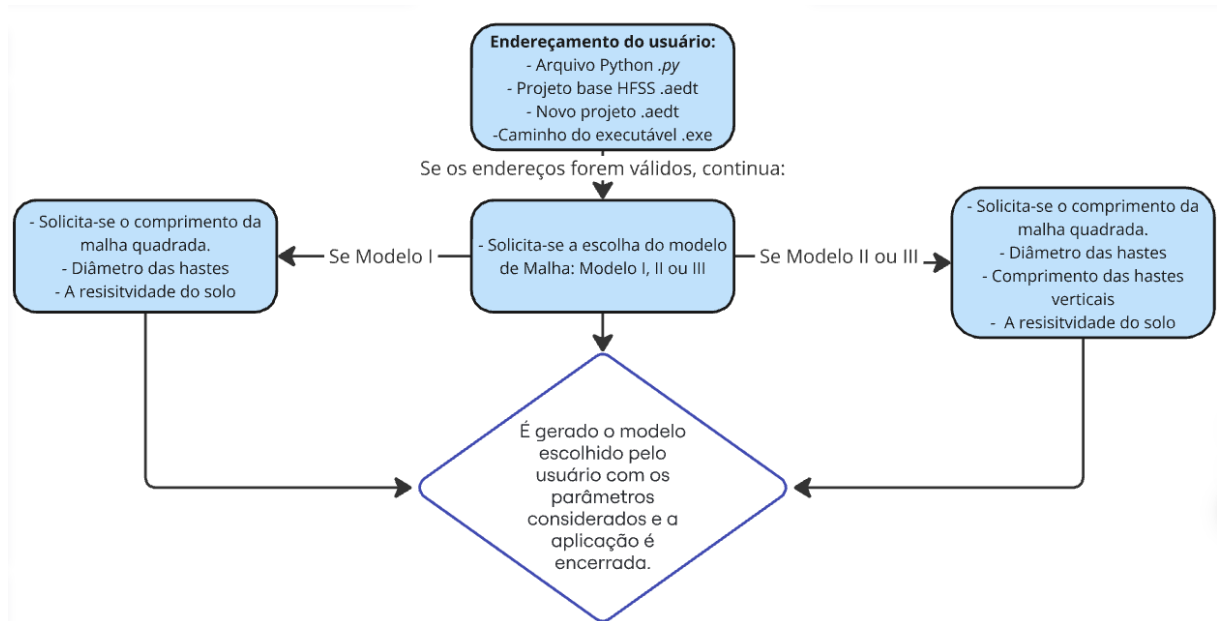
# Solicitar ao usuário o modelo da malha desejado
Enquanto True:
    Solicitar modelo desejado ao usuário (1, 2, 3 ou 'sair')
    Se a entrada for '1':
        Executar função modelo_1
        Encerrar loop
    Se a entrada for '2':
        Executar função modelo_2
        Encerrar loop
    Se a entrada for '3':
        Executar função modelo_3
        Encerrar loop
    Se a entrada for 'sair':
        Exibir mensagem de saída
        Encerrar loop
    Caso contrário:
        Exibir mensagem de entrada inválida

```

Fim

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 117 - Fluxograma relativo a escolha do modelo de malha.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.5 Escolha da forma de onda da descarga atmosférica de entrada da simulação

Nesta etapa, foi acrescentada a funcionalidade de o usuário adicionar na aplicação a forma de onda da corrente impulsiva (descarga atmosférica). Nesse sentido, o usuário após escolher entre os três modelos de malha, poderá, posteriormente, escolher entre três formas de onda de corrente para serem o *input* da simulação. A primeira e a segunda forma de onda já estão salvas no próprio projeto base, fornecido ao usuário, sendo as formas de 8/20 μ s e 1,25/50 μ s. Caso o usuário opte por uma delas, deverá apenas entrar com o valor de pico da corrente, sendo ela associada automaticamente ao retângulo portador da corrente. Observa-se na Figura 118 essa etapa da aplicação, em que o usuário escolhe a descarga 8/20 μ s.

Figura 118 - Escolha da entrada da simulação.

```
O HFSS terminou de executar o modelo, confira no HFSS.

Se deseja continuar a aplicação, digite: 1
Se deseja alterar o modelo, digite: 2
1

Para o input da aplicação, digite 1 para uma descarga atmosférica 8/20us, digite 2 para uma descarga 1.2/50us ou digite 3 para gerar seu próprio modelo.
1
Carregando...
Segue o gráfico da descarga atmosférica.

Index(['X ', 'Y'], dtype='object')

Se deseja continuar com essa descarga, digite 1. Se não, digite 2)
```

Fonte: Próprio autor (2024).

Por fim, a terceira opção consiste no próprio usuário inserir os parâmetros da forma de onda dupla exponencial: tempo de frente, tempo de meia onda, tempo de simulação, valor de pico da corrente. Assim, por meio de método iterativo disponível em [25], adaptado ao *Python*, a própria aplicação gera a forma de onda da corrente e a aplica como entrada do sistema. Na Figura 119 são apresentadas as requisições do sistema caso o usuário escolha sua própria forma de onda. Ao escolher a forma de onda, automaticamente o HFSS é aberto com a atualização da entrada do sistema, assim como a própria aplicação fornece o gráfico da forma de onda da corrente (Figura 75), para que ao fim, o usuário decida em continuar com a forma de onda escolhida ou não.

Na Figura 120 é apresentada a forma de onda da corrente requisitada pelo usuário, e na Figura 121, tem-se a sua atualização feita automaticamente no HFSS. Na Figura 122 é apresentado o pseudocódigo dos acréscimos efetuados, e seu fluxograma na Figura 123. O *link* do código fonte está disponível no APÊNDICE 6.

Figura 119 - Entrada de uma forma de onda personalizada do usuário.

```
Para o input da aplicação, digite 1 para uma descarga atmosférica 8/20us, digite 2 para uma descarga 1.2/50us ou digite 3 para gerar seu próprio modelo.
3

Insira o tempo de pico da corrente (em microsegundos): 6

Insira o tempo de meia-onda da corrente (em microsegundos): 30

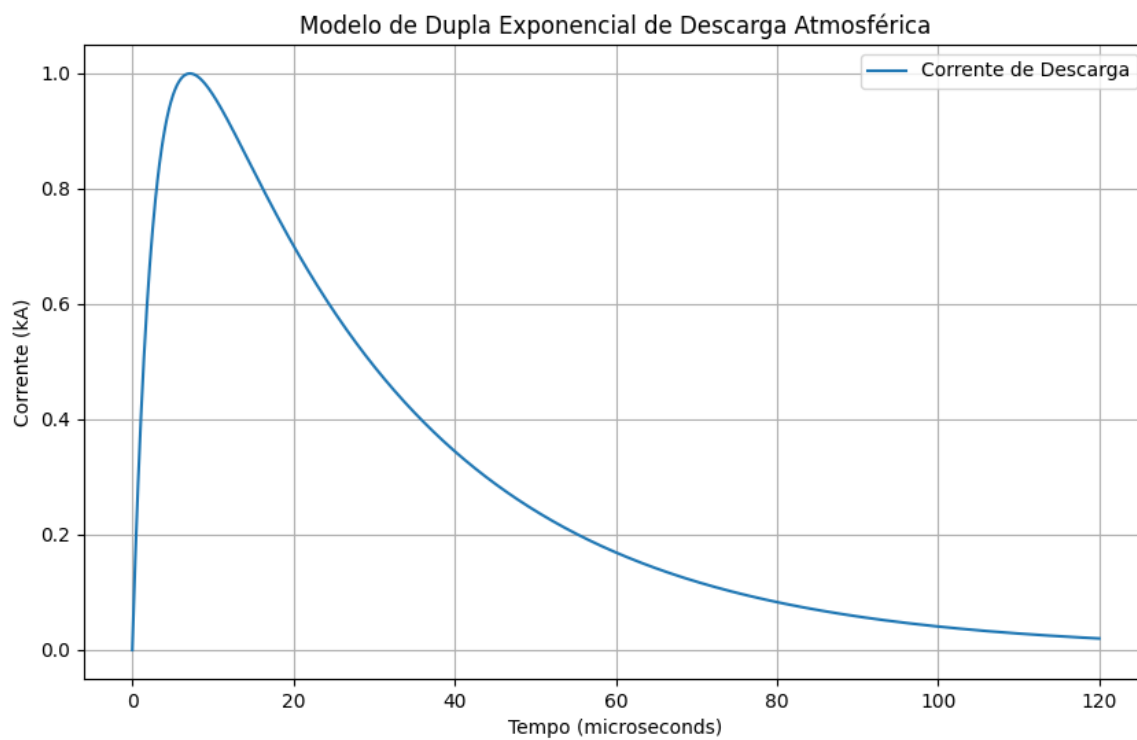
Insira o tempo final da simulação (em microsegundos): 120

Insira o valor de pico da corrente (em kA): 1

Insira a resolução (número de pontos): 1000
```

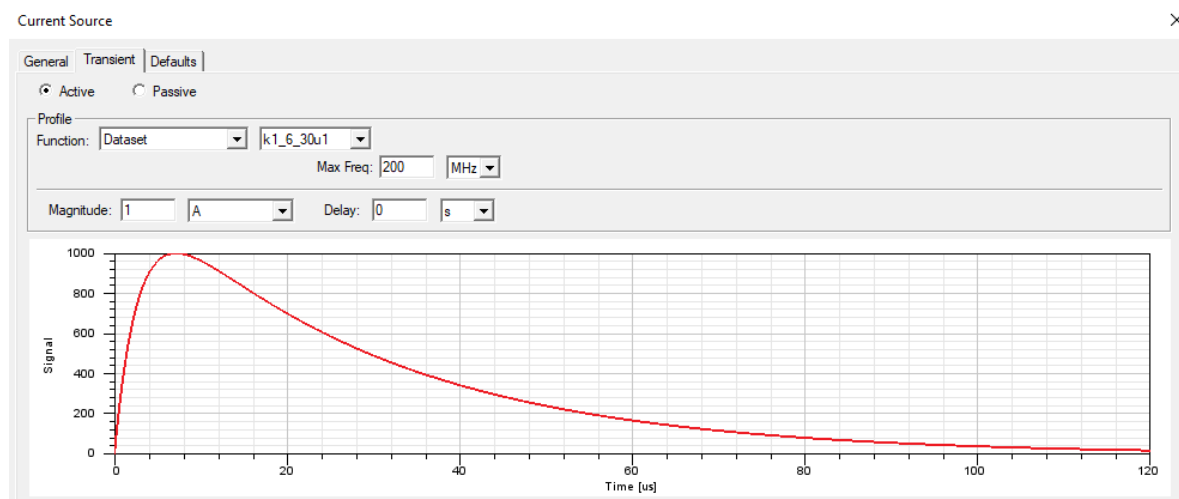
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 120 - Descarga personalizada gerada.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 121 - Atualização automática da forma de onda no HFSS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 122 - Pseudocódigo da escolha da entrada.

```

Importar subprocess
Importar time
Importar os
Importar pandas COMO pd
Importar matplotlib.pyplot COMO plt
Importar psutil
Importar numpy COMO np

Definir verificar_HFSS_em_execucao()
    PARA CADA processo EM psutil.process_iter(['pid', 'name'])
        SE processo.info['name'] == 'ansysets.exe'
            RETORNAR True
        RETORNAR False

Definir modelo_1()
...

Definir modelo_2()
...

Definir modelo_3()
...
Definir lightning(tp, tmm, tend, peak, resol, directorio)
    Definir pontos de tempo em ms
    Calcular parâmetros alpha, beta, A, I
    Calcular erro
    Encontrar pontos max_i, max_v, max_t, med_v, med_t
    Enquanto (condição de erro e limites de iteração)
        Ajustar tp e tm pelo método da bisseção
        Recalcular parâmetros alpha, beta, A, I
        Recalcular erro
        Reencontrar pontos max_i, max_v, max_t, med_v, med_t
    Ajustar pico da corrente
    Plotar gráfico
    Formatar nome do arquivo
    Salvar arquivo
    Retornar parâmetros K, alpha, beta, emax, kk, file_path, file_name

Definir define_input1()
    Configurar caminho para arquivo raio3.py
    Criar código HFSS para exportar dataset de descarga
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS para aplicar a descarga escolhida
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
    Ler arquivo de saída e Plotar gráfico

DEFINIR define_input2()
    Configurar caminho para arquivo raio4.py
    Criar código HFSS para exportar dataset de descarga
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS para aplicar a descarga escolhida
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
    Ler arquivo de saída e Plotar gráfico

DEFINIR define_input3()
    Configurar caminho para arquivo raio_criado.py
    Solicitar parâmetros de entrada do usuário
    Calcular lightning(tp, tmm, tend, peak, resol, directorio)
    Plotar gráfico
    Perguntar ao usuário se deseja salvar
    Se sim
        Criar código HFSS para importar dataset de descarga
        Escrever código HFSS no arquivo Python
        Executar arquivo Python no HFSS
        Animar reticências enquanto o processo está em execução

Definir escolhe_modelo()
    Continuar aplicação enquanto usuário não sair
    Perguntar ao usuário qual modelo deseja (1, 2, 3)
    Se modelo 1
        Executar modelo_1()
    Se modelo 2
        Executar modelo_2()
    Se modelo 3
        Executar modelo_3()
    Se sair
        Sair da aplicação
    Perguntar ao usuário se deseja alterar o modelo ou continuar aplicação
    Se continuar aplicação
        Perguntar ao usuário qual input de corrente deseja (1, 2, 3)
        Se input 1

```

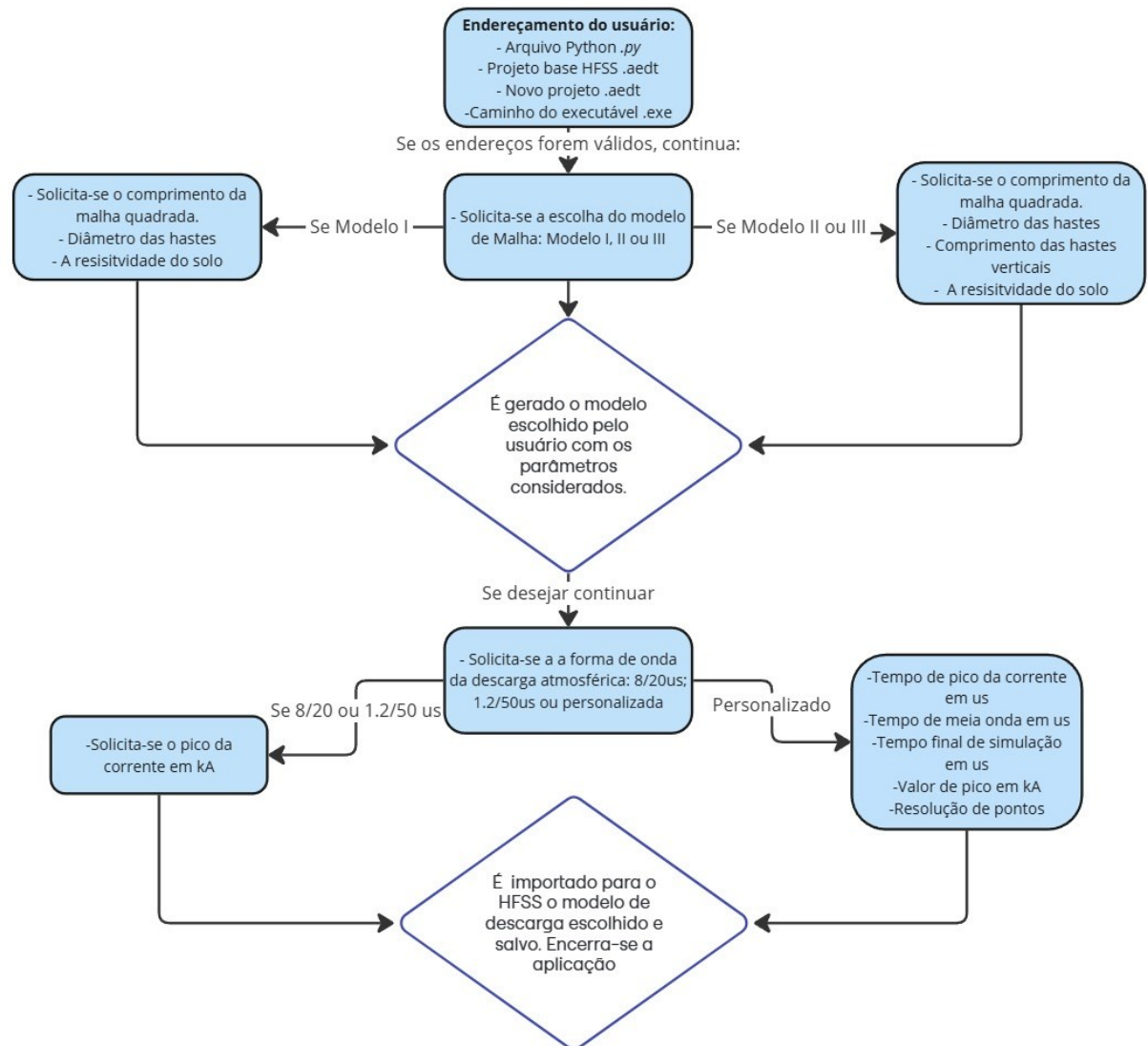
```

    Executar define_input1()
    Perguntar ao usuário se deseja continuar com essa descarga
    Se input 2
        Executar define_input2()
        Perguntar ao usuário se deseja continuar com essa descarga
    Se input 3
        Executar define_input3()
        Perguntar ao usuário se deseja continuar com esse modelo
    Se alterar modelo
        Retornar para escolha do modelo
Fim

```

Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 123- Fluxograma referente à escolha da descarga atmosférica.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.6 Aplicação completa

Para a finalização da aplicação, outras funcionalidades foram adicionadas, sobretudo, a replicação automática da malha unitária. Assim, caso o comprimento da malha seja expressivo, o número de retículos será aumentado automaticamente. É importante destacar que cada retículo terá entre 1 m e 4 m, dependendo do comprimento total da malha. Assim, além de retornar o modelo pronto no HFSS, a aplicação retornará a quantidade de retículos gerados, assim como o seu comprimento. É importante notarem-se as informações na Figura 124, em que a parte anterior de definição dos endereços foi ocultada na imagem, porém é sempre o primeiro passo. Dessa maneira, automaticamente é gerada a malha, nesse caso, com 64 retículos provenientes da replicação espacial da malha (Figura 125).

Figura 124 - Informações requisitadas ao usuário na aplicação completa com o retorno da quantidade de retículos e seus comprimentos.

```

Insira o modelo desejado (1, 2 ou 3) ou digite 'sair' para sair da aplicação.
Modelo 1: Malha horizontal.
Modelo 2: Malha com hastes verticais.
Modelo 3: Malha com hastes verticais inclinadas.
2

Insira o comprimento da malha quadrada:
30

Insira o diâmetro das hastes entre 10-15 mm:
12

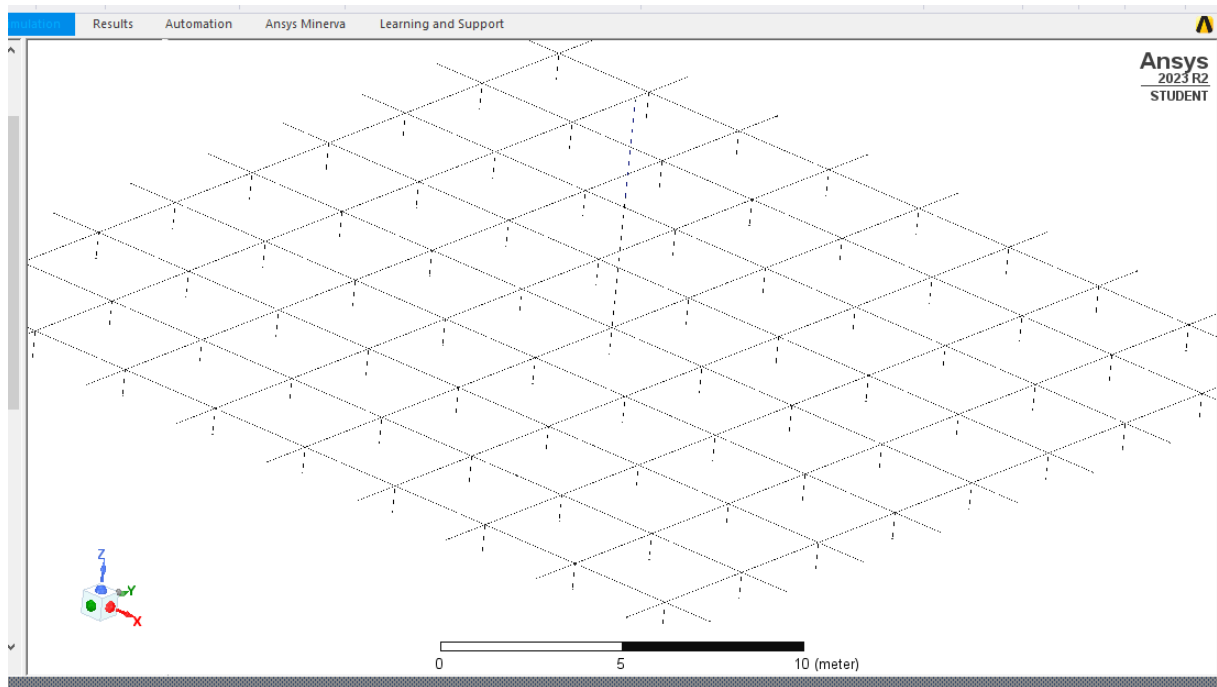
Insira o comprimento das hastes verticais:
0.8

Insira a resistividade do solo:
1111
Está sendo gerada uma malha 30.0m x 30.0m com 8x8 retículos quadrados de 3.33m de comprimento cada.
Executando o modelo 2...
Carregando...

```

Fonte: Próprio autor (2024).

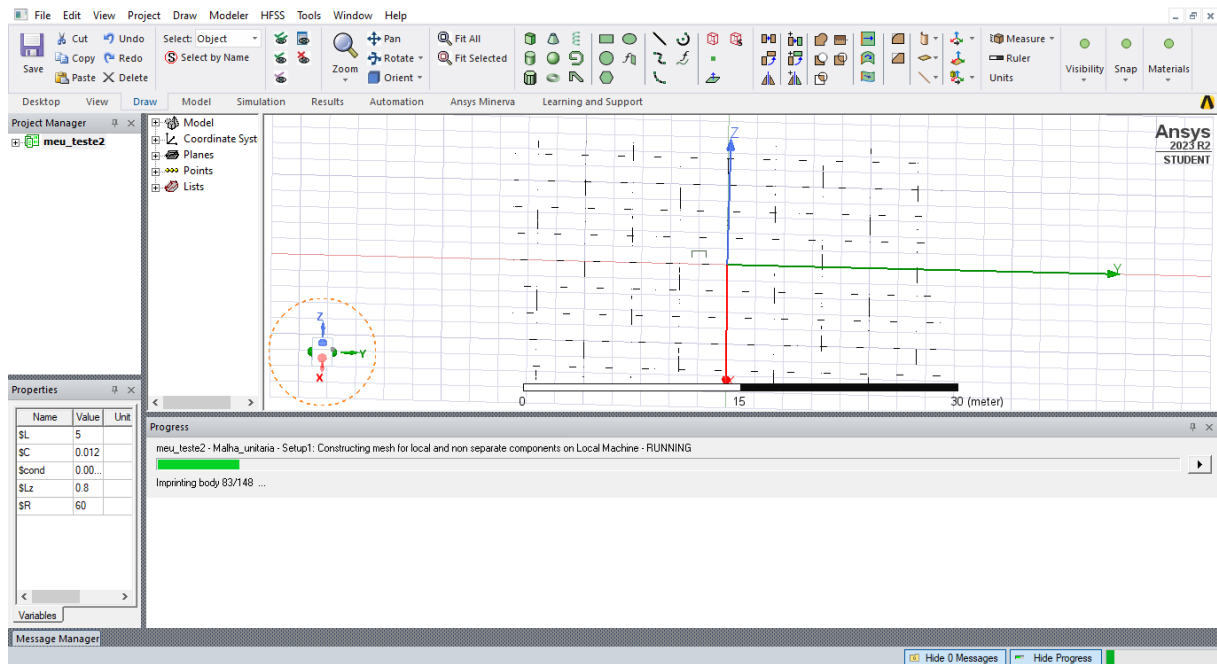
Figura 125 - Malha 30x30m gerada automaticamente no HFSS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Outrossim, após o modelo ser desenhado no HFSS, a própria aplicação retorna uma mensagem de conclusão e pergunta ao usuário se ele gostaria de continuar a aplicação ou refazer o modelo da malha. Caso o usuário decida pela continuidade, será requisitado que ele escolha dentre as três formas de onda apresentadas anteriormente. Ao escolher a forma de onda da corrente, o usuário será questionado se deseja continuar com sua escolha. Caso opte pela continuidade, a aplicação perguntará se deseja-se simular o modelo desenvolvido. Em caso afirmativo, o HFSS será aberto e a simulação iniciará automaticamente (Figura 126). O passo a passo dessa interação, usuário e aplicação estão disponíveis no link do APÊNDICE 7. O código completo está disponível no link do APÊNDICE 8 e pseudocódigo é apresentado na Figura 127.

Figura 126 - A simulação inicia automaticamente.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 127 - Pseudocódigo da aplicação completa.

```

Importar subprocess
Importar time
Importar os
Importar pandas COMO pd
Importar matplotlib.pyplot COMO plt
Importar psutil
Importar numpy COMO np

Definir verificar_HFSS_em_execucao()
    PARA CADA processo EM psutil.process_iter(['pid', 'name'])
        Se processo.info['name'] == 'ansysedtsv.exe'
            RETORNAR True
        Retornar False
Solicitar ao usuário que insira o caminho para o arquivo Python
Armazenar caminho_arquivo

Solicitar ao usuário que insira o caminho para o projeto base do HFSS
Armazenar caminho_projeto_base

Solicitar ao usuário que insira o caminho para o projeto novo do HFSS
Armazenar caminho_projeto_novo

Solicitar ao usuário que insira o caminho do executável ansysedt_exe
Armazenar em caminho_ansysedt

Verificar se o projeto do HFSS existe
    Se não existir, exibir mensagem de erro e encerrar

Obter nome do projeto base sem extensão
Converter barras inclinadas para barras invertidas nos caminhos

Definir modelo_1()
    Solicitar ao usuário o comprimento da haste
    Solicitar ao usuário o diâmetro das hastes
    Solicitar ao usuário a resistividade do solo

    Se comprimento_haste <= 12
        Calcular tamanho_reticulo, tamanho_malha_base, n_cinturoes, qtd_reticulos
    Senão
        Calcular divisor e ajustar tamanhos
    Exibir mensagem sobre a malha gerada
    Gerar código HFSS com parâmetros de entrada

```

```

    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução

Definir modelo_2()
    Solicitar ao usuário o comprimento da haste
    Solicitar ao usuário o diâmetro das hastes
    Solicitar ao usuário a dimensão das hastes verticais
    Solicitar ao usuário a resistividade do solo

    Se comprimento_haste <= 12
        Calcular tamanho_reticulo, tamanho_malha_base, n_cinturoes, qtd_reticulos
    Senão
        Calcular divisor e ajustar tamanhos
    Exibir mensagem sobre a malha gerada
    Gerar código HFSS com parâmetros de entrada
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução

Definir modelo_3()
    Solicitar ao usuário o comprimento da haste
    Solicitar ao usuário o diâmetro das hastes
    Solicitar ao usuário a dimensão das hastes verticais inclinadas
    Solicitar ao usuário a resistividade do solo

    Se comprimento_haste <= 12
        Calcular tamanho_reticulo, tamanho_malha_base, n_cinturoes, qtd_reticulos
    Senão
        Calcular divisor e ajustar tamanhos
    Exibir mensagem sobre a malha gerada
    Gerar código HFSS com parâmetros de entrada
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
Definir lightning(tp, tmm, tend, peak, resol, directorio)
    Calcular pontos de tempo
    Calcular variáveis auxiliares
    Calcular parâmetros alpha, beta, A, I
    Calcular erro
    Encontrar pontos max_i, max_v, max_t, med_v, med_t
    Ajustar tp e tm pelo método da bissecção
    Calcular fator de correção do pico
    Plotar gráfico da corrente de descarga
    Salvar dados em arquivo

Definir define_input1()
    Solicitar ao usuário o valor de pico da corrente
    Gerar código HFSS para exportar descarga
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
    Ler arquivo .tab
    Plotar gráfico XY

Definir define_input2()
    Solicitar ao usuário o valor de pico da corrente
    Gerar código HFSS para exportar descarga
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
    Ler arquivo .tab
    Plotar gráfico XY
Definir define_input3()
    Solicitar ao usuário parâmetros de descarga atmosférica
    Chamar função lightning()
    Exibir resultados
    Solicitar ao usuário se deseja salvar o modelo
    Se sim
        Gerar código HFSS para importar dataset
        Executar arquivo Python no HFSS
Definir simular_projeto(caminho_projeto_novo)
    Gerar código HFSS para simulação
    Escrever código HFSS no arquivo Python
    Executar arquivo Python no HFSS
    Animar reticências enquanto o processo está em execução
    Verificar arquivo de log para detectar início da simulação
Definir escolhe_modelo()
    Enquanto continuar_aplicacao
        Solicitar ao usuário escolha de modelo
        Se modelo 1
            Chamar modelo_1()
        Se modelo 2

```

```

        Chamar modelo_2()
    Se modelo 3
        Chamar modelo_3()
    Se 'sair'
        Sair da aplicação
    Solicitar ao usuário se deseja alterar o modelo ou continuar
    Se continuar
        Solicitar escolha de input
        Se input 1
            Chamar define_input1()
            Solicitar confirmação do usuário
        Se input 2
            Chamar define_input2()
            Solicitar confirmação do usuário
        Se input 3
            Chamar define_input3()
            Solicitar confirmação do usuário
    Se alterar
        Reiniciar escolha de modelo
    Se usuário escolher simular
        Chamar simular_projeto(caminho_projeto_novo)

Imprimir "Encerrada a aplicação!"
Se __name__ == "__main__"
    Chamar escolhe_modelo()
FIM

```

Fonte: Próprio autor (2024).

Dessa maneira, com o uso da aplicação, o usuário poderá definir os parâmetros principais de uma malha de grandes extensões de maneira rápida, sem demandar tempo no desenho 3D do modelo, visto que, todo o arquivo base está em função dos parâmetros da malha. Assim, com o aumento da malha, aumenta-se proporcionalmente o raio do solo hemisférico e as dimensões da caixa de ar. Com isso, o modelo estará pronto para a simulação, já com a forma de onda de corrente de entrada escolhida, não sendo necessário criar um arquivo *.tab* e posteriormente exportando-o manualmente no HFSS. O arquivo base *.aedt* do HFSS para a aplicação pode ser instalado utilizando o link disponível no APÊNDICE 9.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho apresentou uma aplicação em *Python* que otimiza e automatiza a criação de modelos de malha de aterramento reticuladas para uso no *software* de simulação eletromagnética 3D, HFSS. A abordagem apresentada visa mitigar o enorme esforço de implementação e tempo gasto, geralmente necessários, na implementação realizada diretamente no HFSS. É importante destacar que mesmo para um modelo simplificado, o processo de construção mostrou-se complexo, envolvendo a elaboração do modelo geométrico, seguido da atribuição das propriedades físicas e elétricas dos materiais, aplicação da forma de onda da corrente e a simulação propriamente dita.

A aplicação apresentada proporciona uma economia considerável de tempo para o usuário devido a automatização dos procedimentos de definição dos parâmetros de simulação, tornando a implementação mais simples e assertiva. Isso é particularmente vantajoso quando as malhas apresentam dimensões maiores, onde, normalmente, a implementação pode ser exaustiva devido ao volume de procedimentos e ocorrência de inconsistências que levam a erros.

Além disso, destaca-se a escalabilidade da aplicação, a qual permite facilmente a incorporação de novas funcionalidades e adaptações para outros tipos de simulação ou estudos. Essa flexibilidade amplia o potencial de uso da ferramenta, não apenas para simulações envolvendo malhas de aterramento submetidas a correntes impulsivas, mas, também, para uma ampla gama de aplicações em pesquisa e desenvolvimento na área de engenharia. A integração entre a aplicação em *Python* e o HFSS mostrou-se expansível e flexível, de maneira a permitir sua adaptação para uma ampla variedade de outras aplicações.

De modo geral, portanto, este trabalho evidencia a possibilidade de se explorar novas fronteiras para o desenvolvimento de soluções mais robustas e eficazes em simulações eletromagnéticas, ao demonstrar como a integração entre uma aplicação *Python* e o *software* HFSS pode potencializar o desenvolvimento de projetos e simulações de sistemas complexos que estão no cerne das atividades laborais do engenheiro. Como propostas de continuidade, sugere-se o aprimoramento da aplicação em *Python* por meio da incorporação de técnicas de inteligência artificial. Essa abor-

dagem pode viabilizar a construção de malhas otimizadas que podem levar a melhor relação custo-benefício, levando-se em consideração, também, as melhores condições de segurança relacionadas à tensão de passo e de toque. A utilização de algoritmos de inteligência artificial, como aprendizado de máquina e redes neurais, poderia identificar padrões e relações complexas entre as variáveis envolvidas, ajustando automaticamente os parâmetros do modelo para alcançar o arranjo mais adequado maximizando eficiência, custo e segurança.

REFERÊNCIA

1. PABÓN, L. Á. D. **Bíblia do pescador**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: CPAD, 2014.
2. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE avalia prejuízos causados por raios, 2020. Disponível em:
3. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. O que são descargas atmosféricas, 2024. Disponível em:
4. PAULINO, J. O. S. **Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra curtos elétricos em Instalações**. 1ª. ed. Lagoa Santa: Clamper, 2016.
5. MORENO, H.; COSTA, P. F. **Aterramento Elétrico**. 2ª. ed. São Paulo: Procobre, 2018.
6. VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos**. 1ª. ed. São Paulo: Artliber, 2002.
7. ALÍPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional)**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educacao Tecnologica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2008.
8. LINS POMPEU, J.; DE CAMARGO WITT, R. N. **Análise da distribuição de corrente em malhas de aterramento ante a utilização de terrômetros de alta frequência**. UFPR. Curitiba, p. 81. 2018.
9. LIMA, A. B. Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2010.
10. GRCEV, L.; POPOV, M. On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1598-1603, abr. 2005.
11. GRCEV, L. Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements. **Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on**, Munich, Germany, 24-28 Sept. 2007. p.325,328.
12. GRCEV, L. Impulse efficiency of ground electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 24, n. 1, Jan. 2009. 441-451.
13. GRCEV, L. Modeling of grounding electrodes under lightning currents. **IEEE Transactions on Eletrocmagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 559-571, ago. 2009.
14. KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3ª. ed. Porto Alegre: [s.n.], 1995.

15. VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1ª. ed. São Paulo: Artliber, 2005.
16. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 15751: Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 47. 2013.
17. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. **IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)**, p. 1-226, 15 May 2015.
18. YU, C. et al. Configuration Detection of Substation Grounding Grid Using Transient Electromagnetic Method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 8, p. 6475-6483, Aug. 2017.
19. DIAS, A. D. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). [S.l.], p. 132. 2011.
20. VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002.
21. BALEV, V.; CHARAN, P. **Substation grouding optimization**. California State University. Sacramento, p. 82. 2013.
22. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro, p. 55. 2009.
23. TELLÓ, M. et al. **Aterramento elétrico impulsivo em baixa e alta frequências com apresentação de casos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.
24. SOUZA, A. N. D. et al. **SPDA: sistema de proteção contra descargas atmosféricas: teoria, prática e legislação**. 2ª. ed. São Paulo: Érica, 2020.
25. TARRAGO, V. L. An interative method for double exponential lightning signal modelling. **International Conference on grouding lightning physics and effects**, Belo Horizonte, 2021.
26. FERNANDO, M. The peak, rise time and the half-width of lightning generated eletric field derivatives over finitely conducting ground. **10th International Conference on Electromagnetic Compatibility**, Uppsala, 1997. 158-163.
27. VLADIMIR, A. R.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. 1ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
28. SALARIEH, B.; SILVA, J. D.; KORDI, B. High frequency response of grouding electrodes: effect of soil dielectric constant. **IET Generation, Transmission & Distribution**, p. 1-7, 2020.
29. SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
30. ALURA. Python e orientação a objetos. **Casa do Código**, 2015. Disponível em: <<https://www.caelum.com.br/apostila/apostila-python-orientacao-a-objetos.pdf>>. Acesso em:

23 Fevereiro 2024.

31. LUTZ, M.; ASCHER, D. **Aprendendo python**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
32. PAIVA, F. A. P. et al. **Introdução a python com aplicações de sistemas operacionais**. 1ª. ed. Natal: IFRN, 2020.
33. CODY PIERSALL. Documentação HFSS, 2015. Disponível em:
<<https://arcc.ou.edu/~cody/hfsslib/intro/>>. Acesso em: 23 Fevereiro 2024.
34. ESSS. Método dos Elementos Finitos: o que é?, 2016. Disponível em:
<<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 23 Fevereiro 2024.
35. JITHESH, V.; PANDE, D. C. A review on computational EM1 modeling techniques. **Proceedings of INCEMIC**, 2003.
36. PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros: Com Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
37. SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. New York: Dover Publications, INC., 1968.
38. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. **IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)**, p. 1-86, Dec. 2012.
39. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. **ABNT NBR 15749**, p. 49, set. 2009.
40. KORASLI, C. Ground resistance measurement with alternative fall-of-potential method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 1657-1661, Apr 2005.
41. WANG, C.-G. et al. Grounding resistance measurement using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 4, p. 1128-1135, Oct. 1998.
42. KORASLI, C. Ground Resistance Measurement with Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes. **Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference on**, 15-19 Oct. 2006.
43. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. **ABNT NBR 5410**, p. 238, 2005.
44. PANTOJA, J. J.; ROMAN, F. Analysis of a lightning eathing system using electromagnetic simulations. **XIII International Symposium on Lightning Protection**, Camboriú, 2015. 104-108.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Código de abertura de um novo projeto no HFSS.

https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-HFSS/blob/7ee8ac12019457140780e6cfd1fec5315de72f84/Abrir_novo_projeto_3.2.1.py

APÊNDICE 2 – Código de abertura de um projeto existente no HFSS.

https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-HFSS/blob/7ee8ac12019457140780e6cfd1fec5315de72f84/Abrir_projeto_existente_3.2.1.py

APÊNDICE 3 – Código para modificação de parâmetros no HFSS.

https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-HFSS/blob/7ee8ac12019457140780e6cfd1fec5315de72f84/Modifica%C3%A7%C3%A3o_de_parametros_HFSS_3.2.2.py

APÊNDICE 4 – Código para alterações de um modelo de malha de aterramento via aplicação.

https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-HFSS/blob/3555ea6877a42894cd18b11efb908ca175826bb4/Alterar_malha_de_aterramento_3.2.3

APÊNDICE 5 – Código referente a aplicação que permite escolher entre três modelos de malhas e alterar os parâmetros das hastes e solo.

<https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no->

HFSS/blob/3555ea6877a42894cd18b11efb908ca175826bb4/Escolha_entre_3_mod
elos_de_malhas_de_aterramento_pelo_usu%C3%A1rio_3.2.4.py

APÊNDICE 6 – Acréscimo da funcionalidade da escolha entre três descargas atmosféricas
[https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-](https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no-HFSS/blob/3555ea6877a42894cd18b11efb908ca175826bb4/Escolha_da_descarga_atmosferica_3.2.5.py)
HFSS/blob/3555ea6877a42894cd18b11efb908ca175826bb4/Escolha_da_descarga_
atmosferica_3.2.5.py

APÊNDICE 7 – Passo a passo da interação aplicação e usuário.

1. Endereçamentos.

```
Insira o caminho para o arquivo Python (ex: C:\caminho\para\seu\arquivo.py):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Teste\teste.3.py

Insira o caminho para o projeto base do HFSS (ex: C:\caminho\para\seu\projeto.aedt):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha nitaria com alteracoes\teste_malha_unit.aedt

Insira o caminho para o projeto novo do HFSS baseado em suas alterações (ex: C:\caminho\para\seu\projeto):
C:\Users\flavi\OneDrive - Universidade Federal de Pernambuco\TCC\Testes para o TCC\Malhas\Malha nitaria com alteracoes\meu_teste2.aedt
```

2. Escolha dos modelos e estabelecimento dos parâmetros importantes.

```
Insira o modelo desejado (1, 2 ou 3) ou digite 'sair' para sair da aplicação.
Modelo 1: Malha horizontal.
Modelo 2: Malha com hastes verticais.
Modelo 3: Malha com hastes verticais inclinadas.
2

Insira o comprimento da malha quadrada:
30

Insira o diâmetro das hastes entre 10-15 mm:
12

Insira o comprimento das hastes verticais:
0.8

Insira a resistividade do solo:
1111
Está sendo gerada uma malha 30.0m x 30.0m com 8x8 retículos quadrados de 3.33m de comprimento cada.
Executando o modelo 2...
Carregando...
O HFSS terminou de executar o modelo, confira no HFSS.
```

3. Continuidade com a escolha da descarga atmosférica e seus parâmetros (Se modelo 3 da forma de onda).

```

Se deseja continuar a aplicação, digite: 1
Se deseja alterar o modelo, digite: 2
1

Para o input da aplicação, digite 1 para uma descarga atmosférica 8/20us, digite 2 para uma descarga 1.2/50us ou digite 3 para gerar seu próprio modelo.
3

Insira o tempo de pico da corrente (em microsegundos): 5

Insira o tempo de meia-onda da corrente (em microsegundos): 40

Insira o tempo final da simulação (em microsegundos): 120

Insira o valor de pico da corrente (em kA): 3

Insira a resolução (número de pontos): 1000

```

4. Continuidade com a escolha da descarga atmosférica e seus parâmetros (Se modelo 1 ou 2).

```

Se deseja continuar a aplicação, digite: 1
Se deseja alterar o modelo, digite: 2
1

Para o input da aplicação, digite 1 para uma descarga atmosférica 8/20us, digite 2 para uma descarga 1.2/50us ou digite 3 para gerar seu próprio modelo.
2

Insira o valor de pico da corrente (em kA): 1
Carregando...
Segue o gráfico da descarga atmosférica.

Index(['X ', 'Y'], dtype='object')

Se deseja continuar com essa descarga, digite 1. Se não, digite 2)

```

5. O gráfico da forma de onda é gerado, e se o usuário desejar, inicia-se a simulação e a aplicação é encerrada, ou altera o modelo e inicia o processo do começo, ou sai e a aplicação é salva sem simulação.

```

Deseja salvar este modelo? (s/n): s
Carregando...
O HFSS terminou de executar o modelo, confira no HFSS.

Se deseja continuar com esse modelo de descarga, digite 1. Se não, digite 2)
1

Deseja simular o projeto, alterar o modelo ou sair? (simular/alterar/sair)
sair

```

APÊNDICE 8 – Código da aplicação completa.

<https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no->

HFSS/blob/634fba36d7e228a73f0d818f92e318252dc64782/Modelagem_completa.py

APÊNDICE 9 – Arquivo base do HFSS para as aplicações.

<https://github.com/Flavio-Lopes/Aplica-o-em-Python-para-modelagem-autom-tica-de-malhas-de-aterramento-no->

HFSS/blob/63277d662bbdc663bb8e69967c349f3e0f1fe417/teste_malha_unit.aedt