

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LEONARDO GRIGOLETTO

**Modelagem de Cabos para Simulações de Testes de Descargas Elétricas Atmosféricas em
Aeronaves**

Guaratinguetá
2021

Leonardo Grigoletto

Modelagem de Cabos para Simulações de Testes de Descargas Elétricas Atmosféricas em Aeronaves

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica .

Orientador: Prof Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá

2021

G857m	Grigoletto, Leonardo Modelagem de cabos para simulações de testes de descargas elétricas em aeronaves / Leonardo Grigoletto – Guaratinguetá, 2021. 73 f : il. Bibliografia: f. 71-73 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula 1. Aviões - Equipamento elétrico. 2. Eletricidade na aeronáutica 3. Aeronaves. 4. Descargas elétricas. I. Título. CDU 629.733
-------	--

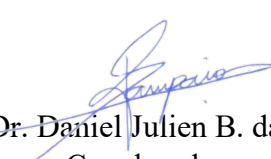
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MODELAGEM DE CABOS PARA SIMULAÇÕES DE TESTES
DE DESCARGAS ELÉTRICAS EM AERONAVES

LEONARDO GRIGOLETTO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUANDO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA "**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

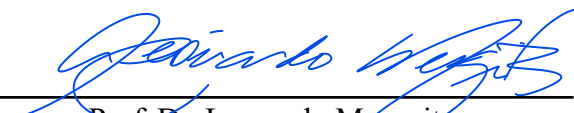


Prof. Dr. Daniel Julien B. da S. Sampaio
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Leonardo Mesquita
UNESP-FEG



Prof. Dr. Rubens Alves Dias
UNESP-FEG

DEZEMBRO, 2021

“O maior risco é não correr nenhum risco. Em um mundo que muda rapidamente, a única estratégia que certamente falhará, é não arriscar.”
(Mark Zuckerberg)

RESUMO

Os testes de certificação de suscetibilidade a descargas elétricas atmosféricas são obrigatórios para qualquer fabricante do ramo aeroespacial. A norma DO160G padroniza procedimentos de testes de qualificação em equipamentos eletrônicos aerotransportados para verificar seus comportamentos em relação aos efeitos indiretos dos raios. A presente análise propõe um estudo de modelagem de diferentes configurações de condutores, os quais são inseridos em um método criado para simular o teste de indução por cabos da norma apresentada. Uma simulação pode ser feita anteriormente e posteriormente ao teste físico em laboratório, seja para prever possíveis erros e falhas nos processos de testes ou replicar contestações dos resultados por parte dos órgãos reguladores, sem a necessidade de refazer a testagem arcando com os altos custos por ela demandados. O trabalho também propõe a aplicação e análise em um sistema aeronáutico real fornecido por uma fabricante do ramo aeroespacial.

PALAVRAS-CHAVE: DO160G. Equipamentos aeronáuticos. Modelagem. Equipamentos eletrônicos.

ABSTRACT

Atmospheric lightning susceptibility certification tests are mandatory for any aerospace manufacturer. The DO160G standard standardizes qualification test procedures on airborne electronic equipment to verify their behavior in relation to the indirect effects of lightning. The present analysis proposes a modeling study of different configurations of conductors, which are inserted in a method created to simulate the cable bundle induction test of the presented standard. A simulation can be done before and after the physical test in the laboratory, either to predict possible errors and failures or to replicate disputes of the results by regulatory bodies, without the need to redo the test, bearing the high costs required by it. This document also offers an application and analysis in a real aeronautical system, supplied by an aerospace manufacturer.

KEYWORDS: DO160G. Airborne equipment. Cable modeling. Electronic equipment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Principais componentes de uma aeronave.	15
Figura 2	Veículo elétrico de pouso e decolagem vertical	16
Figura 3	Imagem real de uma aeronave sendo atingido por uma descarga elétrica.	17
Figura 4	Estrutura das subseções da seção 22 norma DO160G.	20
Figura 5	PSU (Unidade do Sensor de Pressão).	21
Figura 6	Cablagem aeronáutica em processo de produção.	22
Figura 7	Formas de onda exigidas pela norma.	23
Figura 8	Configuração de pulsos múltiplos.	23
Figura 9	Configuração de rajadas múltiplas.	24
Figura 10	Transformador de injeção utilizado como gerador de transientes.	24
Figura 11	Categorias dos testes de suscetibilidade a descargas elétricas da norma DO160G.	25
Figura 12	Configuração do teste de cablagem.	29
Figura 13	Elementos da construção de um cabo duplo com blindagem.	31
Figura 14	Cabo blindado duplo com seção transversal em formato circular.	31
Figura 15	Capacitâncias de um cabo duplo blindado.	33
Figura 16	Profundidade da pele do efeito pelicular.	34
Figura 17	Modelo do cabo duplo blindado.	36
Figura 18	Modelo do cabo simples sem blindagem.	37
Figura 19	Modelo do cabo simples com blindagem.	38
Figura 20	Modelo do cabo duplo sem blindagem.	39
Figura 21	Parâmetros distribuídos cabo simples blindado.	40
Figura 22	Indutância Parcial Mútua entre dois condutores causada por campos externos.	42
Figura 23	Seção transversal de um cabo blindado duplo.	42
Figura 24	Método da imagem.	43
Figura 25	Modelo de circuito equivalente de um condutor simples acima do solo.	44
Figura 26	Capacitâncias cabo duplo blindado.	46
Figura 27	Indução eletromagnética em bobinas.	46
Figura 28	Modelo do transformador de injeção.	47
Figura 29	Configuração do circuito cedido pela empresa de aeronáutica.	48
Figura 30	Procedimentos para simulação dos testes de cablagem.	49
Figura 31	Forma de onda número 1 extraída da norma DO160G.	52
Figura 32	Forma de onda número 1 plotada no software <i>LTSpice</i>	53
Figura 33	Forma de onda número 3 extraída da norma DO160G.	53
Figura 34	Formas de onda número 3: $f_{req} = 1$ MHz e $P_D = 25\%$ e 75% plotada no <i>LTSpice</i>	54
Figura 35	Formas de onda número 3: $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 25\%$ e 75% plotada no <i>LTSpice</i>	55
Figura 36	Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 1.	56

Figura 37	Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$	56
Figura 38	Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$	57
Figura 39	Modelo do cabo coaxial	58
Figura 40	Modelo final de parâmetros concentrados do cabo coaxial.	61
Figura 41	Encapsulamento do modelo de parâmetros concentrados.	62
Figura 42	Modelo final de parâmetros distribuídos do cabo coaxial.	62
Figura 43	Configuração do teste de cablagem.	63
Figura 44	Modelo encapsulado do circuito de interface do equipamento sob teste.	64
Figura 45	Modelo encapsulado do equipamento de suporte.	64
Figura 46	Modelo encapsulado do transformador de injeção.	64
Figura 47	Modelo final do teste de cablagem, método de indução por cabos.	65
Figura 48	Simulação 1 - Sem formas de onda aplicadas.	66
Figura 49	Simulação 2 - Forma de onda número 1 aplicada.	66
Figura 50	Simulação 3 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 1 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$) aplicada. .	67
Figura 51	Simulação 4 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 1 \text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$) aplicada. .	67
Figura 52	Simulação 5 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$) aplicada. .	68
Figura 53	Simulação 6 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$) aplicada. .	68
Figura 54	Simulação 7 - Potência e Corrente - Formas de onda número 3 ($f_{req} = 1 \text{ MHz}$). .	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conjuntos de formas de onda para testes de injeção por pino	26
Tabela 2 – Conjuntos de formas de onda para testes de cablagem	26
Tabela 3 – Configuração de níveis para o gerador de testes de injeção por pinos	27
Tabela 4 – Configuração de níveis para o gerador de testes de cablagem de pulso único . . .	27
Tabela 5 – Configuração de níveis para o gerador de testes de cablagem de pulsos múltiplos .	27
Tabela 6 – onfiguração de níveis para o gerador de testes de cablagem de rajadas múltiplas .	28
Tabela 7 – Fator de encalhe em função do número de filamentos	32
Tabela 8 – Permissividade Relativa de alguns materiais mais comuns utilizados em cabos elétricos.	34
Tabela 9 – Permissividade Relativa de alguns materiais mais comuns utilizados em cabos elétricos.	49
Tabela 10 – Conjuntos de formas de onda e seus diferentes testes e repetições	51
Tabela 11 – Formas de onda e seus limites superiores de frequência	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
eVTOL	<i>Electrical Vertical Takeoff and Landing</i> - Veículo Elétrico de Pouso e Decolagem Vertical
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i> - Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional de Padronização
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i> - Agência de Segurança da Aviação da União Européia
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> - Administração Federal da Aviação
EUT	<i>Equipment Under Test</i> - Equipamento Sob Teste

LISTA DE SÍMBOLOS

l	comprimento [m]
f	fator de enalhe []
f_{req}	frequência [Hz]
ϵ	permissividade elétrica [F/m]
ϵ_0	permissividade elétrica do vácuo [F/m]
ϵ_r	permissividade elétrica relativa []
μ	permeabilidade magnética [H/m]
μ_0	permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
δ_i	espessura ou profundidade da pele do efeito pelicular [mm]
δ'_i	espessura ou profundidade corrigida da pele do efeito pelicular [mm]
r	raio real do condutor interno [mm]
r_w	raio real do condutor interno [mm]
d	diâmetro real do condutor interno [mm]
d_w	diâmetro real do condutor interno [mm]
r	raio real da isolação interna [mm]
r_i	raio real da isolação interna [mm]
t_i	espessura real da isolação interna [mm]
r_{si}	raio interno da blindagem [mm]
r_{se}	raio externo da blindagem [mm]
d_{si}	diâmetro interno da blindagem [mm]
d_{se}	diâmetro externo da blindagem [mm]
t_s	espessura da blindagem [mm]
r_j	raio da jaqueta externa [mm]
d_j	diâmetro da jaqueta externa [mm]
t_J	espessura da jaqueta externa [mm]

a	distância do centro da blindagem ao centro do condutor interno [mm]
s	separação entre condutores [mm]
h	altura em relação ao plano de terra [mm]
L	indutâncias parciais próprias de cada elemento [H]
L_e	indutância efetiva do cabo [H]
L_{INT}	indutância interna [H]
L_{EXT}	indutância externa [H]
M	indutâncias parciais mútuas de cada conjunto de elementos [H]
k	fator de acoplamento de cada conjunto de elementos []
C_g	capacitâncias parasitas entre um condutor e o plano de terra [F]
C_{sg}	capacitâncias parasitas entre uma blindagem e o plano de terra [F]
$K1$	capacitâncias parasitas entre dois condutores [F]
$K0$	capacitâncias parasitas entre um condutor e a sua blindagem ou um condutor e o plano de terra [F]
C_m	capacitância mútua [F]
C_{md}	capacitância mútua de modo diferencial [F]
C_{mc}	capacitância mútua de modo comum [F]
N_{pi}	número de circuitos π em cascata []
P_D	porcentagem de decaimento da forma de onda []

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	AS DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS	16
1.2	OBJETIVO	17
1.3	MATERIAL E MÉTODO	17
1.4	JUSTIFICATIVA	18
2	TESTES DE SUSCETIBILIDADE A DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOS- FÉRICAS	19
2.1	A SEÇÃO 22 DA NORMA DO160G	19
2.2	O PROPÓSITO DOS TESTES	19
2.3	DEFINIÇÕES	20
2.3.1	Equipamentos Eletrônicos Aerotransportados	21
2.3.2	Cablagem de Interconexão	21
2.3.3	Tipos de Cabos Utilizados	21
2.3.4	Formas de Onda Transientes	22
2.3.5	Testes de cablagem - Pulsos Únicos, Pulsos Múltiplos e Rajadas Múltiplas . .	22
2.3.6	Gerador de Transientes e Transformador de Injeção	24
2.4	CATEGORIAS	24
2.4.1	Conjuntos de Forma de Onda	25
2.4.2	Níveis de Teste	26
2.5	PROCEDIMENTOS DE TESTE	28
2.5.1	Calibração do Gerador de Transientes	28
2.5.2	Testes de Cablagem - Método de Indução por Cabos	28
3	ASPECTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS SOBRE A MODELAGEM DO TESTE DE CABLAGEM	30
3.1	PROPRIEDADES E ELEMENTOS DA CONSTRUÇÃO DE UM CABO	30
3.1.1	Elementos da Construção de um Cabo	30
3.1.2	Fator de Encalhe	31
3.1.3	Propriedades Geométricas de um Cabo	32
3.1.4	Propriedades Elétricas de um Cabo	32
3.2	CONCEITOS TEÓRICOS PRESENTES NA MODELAGEM DE CABOS	34
3.2.1	Efeito Pelicular	34
3.2.2	Resistência AC	35
3.2.3	Indutâncias Parciais	35
3.2.4	Indutância Efetiva	36
3.2.5	Capacitâncias Parasitas	36

3.2.6	Capacitância Mútua	37
3.3	MODELOS DE PARÂMETROS CONCENTRADOS	37
3.3.1	Cabo Simples sem Blindagem	37
3.3.2	Cabo Simples com Blindagem	38
3.3.3	Cabo Duplo sem Blindagem	38
3.4	MODELOS DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS	38
3.5	CÁLCULO DOS PARÂMETROS CONCENTRADOS	40
3.5.1	Resistências dos Condutores e da Blindagem	40
3.5.2	Indutâncias Parciais Próprias do Condutor e da Blindagem	40
3.5.3	Indutância Parcial Mútua entre Dois Condutores	41
3.5.4	Indutância Parcial Mútua entre Condutor e Blindagem	41
3.5.5	Indutâncias Parciais Mútuas entre Condutor - Plano de Terra e entre Blindagem - Plano de Terra	43
3.5.6	Indutância Parcial Própria do Plano de Terra	43
3.5.7	Fator de Acoplamento	44
3.5.8	Capacitância entre Dois Condutores sem Blindagem	44
3.5.9	Capacitância entre Condutor e Blindagem - Cabo Simples	44
3.5.10	Capacitâncias entre Condutor - Plano de Terra e entre Blindagem - Plano de Terra	45
3.5.11	Capacitâncias Cabo Duplo Blindado	45
3.6	MODELO DO TRANSFORMADOR DE INJEÇÃO	46
4	APLICAÇÃO E ANÁLISE EM UM SISTEMA AERONÁUTICO REAL . . .	48
4.1	DEFINIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA A SIMULAÇÃO	49
4.2	DEFINIÇÃO DA CATEGORIA DE TESTES	50
4.3	DEFINIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DAS FORMAS DE ONDA	51
4.3.1	Plotando e validando as formas de onda	52
4.3.2	Extraindo as frequências das formas de onda	55
4.4	CRIAÇÃO DO MODELO DO CABO UTILIZADO	57
4.4.1	Calculando todos os parâmetros	58
4.4.2	Criando o modelo de parâmetros concentrados	61
4.4.3	Criando o modelo de parâmetros distribuídos	61
4.5	CONECTANDO TODOS OS MODELOS	63
4.5.1	Equipamento sob teste	63
4.5.2	Equipamento de suporte	64
4.5.3	Transformador de injeção	64
4.5.4	Modelo final dos elementos agrupados	65
4.6	SIMULAÇÃO DO TESTE DE CABLAGEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS .	65
4.6.1	Em busca de perturbações funcionais	65
4.6.2	Verificando se há danos no diodo TVS de proteção	68

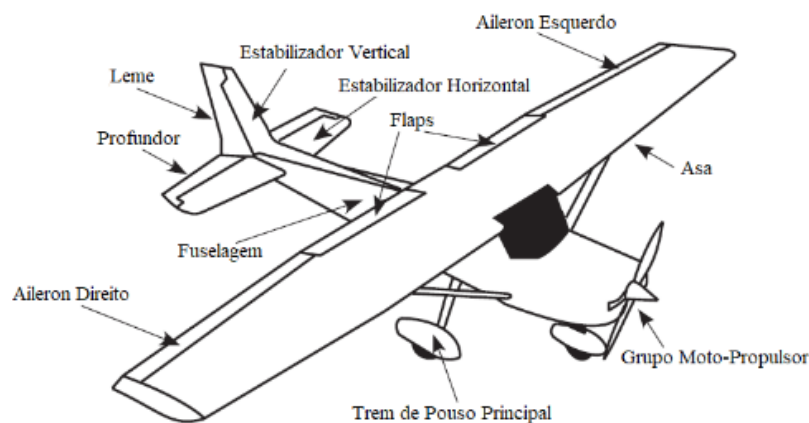
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Atualmente é muito comum ouvir falar de sistemas que antes eram mecânicos e agora estão sofrendo constantes adaptações e evoluções para tornarem-se cada vez mais eletrificados. A tecnologia automotiva é um dos maiores exemplos dessa transformação, na qual há uma corrida mundial para substituir os motores à combustão por elétricos (JORNAL DA UNICAMP, 2021). Ao longo dos anos esta indústria vem substituindo diversas funções manuais por eletrônicas, como: carburador pela injeção eletrônica, motores à combustão por motores elétricos e até implementando equipamentos que antes não existiriam sem a eletrônica, como: sistemas de navegação, instrumentações mais precisas e determinados itens de luxo.

Além da indústria automotiva, a aeronáutica também está acompanhando essa transformação ao longo dos anos e também apresenta diversos sistemas que foram se eletrificando e outros que foram surgindo ao longo do tempo. Um destes é o sistema que é responsável por controlar os atuadores que movimentam aeronave no ar: aileron, profundor, leme e entre outros (como mostrado na Figura 1), os quais eram controlados pelo piloto por cabos de aço, roldanas e polias. Segundo Vinholes (2021), nos dias de hoje ele sofreu uma grande transformação e se tornou o conhecido *full fly-by-wire* na aeronáutica, no qual os atuadores que antes eram controlados mecanicamente agora recebem comandos de equipamentos eletrônicos através de cabos elétricos.

Figura 1 – Principais componentes de uma aeronave.



Fonte: Vilaça (2019)

Um outro exemplo desta eletrificação em aeronaves é a criação do *EVTOL* (Veículo elétrico de pouso e decolagem vertical) mostrado na Figura 2, que como o próprio nome diz, é uma aeronave com sistemas majoritariamente elétricos, incluindo o motor que faz suas hélices girarem, criando forças verticais e horizontais (EMBRAER, 2021).

Foram citados alguns exemplos de sistemas que foram sofrendo transformações em relação ao seu modo de operação. Essas modificações são feitas por vários motivos que trazem benefícios para a indústria de veículos, engenharia e para o mundo, como: maior confiabilidade, redução de peso, maior

Figura 2 – Veículo elétrico de pouso e decolagem vertical



Fonte: Embraer (2021)

eficiência, não emissão de substâncias poluentes e entre outros. Mas assim como qualquer outro, os sistemas elétricos também possuem vulnerabilidades específicas que precisam ser exploradas para que de forma segura, seja possível a utilização dos mesmos em veículos de transporte humana. Neste trabalho é abordada uma condição e vulnerabilidade ambiental específica em aeronaves causada por descargas elétricas atmosféricas, mais conhecido como raio.

1.1 AS DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

Todos os tipos de sistemas possuem condições e vulnerabilidades específicas em relação ao meio ambiente onde estão inseridos e operando. Em aeronaves uma delas é ocasionada pelas descargas elétricas vindas da atmosfera, as quais podem atingi-las e causar danos aos seus equipamentos eletrônicos que, como dito anteriormente, atualmente controlam a maior parte dos sistemas essenciais e não essenciais.

Um evento de raio é nada menos que um raio atingindo uma aeronave, a qual por ser construída de materiais metálicos, se comporta como um caminho de baixa resistência por onde a corrente elétrica trafega. Segundo Librantz (2006), geralmente a descarga elétrica entra por uma das extremidades da fuselagem e sai pela outra, como mostrado na Figura 3. Uma pessoa dentro de um avião atingido por uma descarga não sofrerá danos, pois a corrente elétrica tende a fluir ao longo das partes metálicas externas, não penetrando no avião e seguindo seu caminho na atmosfera. Por outro lado, a corrente elétrica pode causar danos aos equipamentos eletrônicos, uma vez que ao trafegar pela carcaça da aeronave, ela cria um campo magnético variante ao seu redor de alta intensidade, devido à sua alta amplitude. Este campo magnético, por sua vez, irá induzir outras correntes elétricas indesejadas em todos os tipos de condutores que podem por ele estar envolvidos, podendo assim penetrar indiretamente nos equipamentos conectados por eles (LIBRANTZ, 2006). Caso as devidas proteções não sejam aplicadas uma falha pode acontecer.

Figura 3 – Imagem real de uma aeronave sendo atingido por uma descarga elétrica.



Fonte: Basseto (2019)

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é criar um método de modelagem e simulação para diferentes tipos de cabos elétricos simulando testes de descargas elétricas vindas da atmosfera em aeronaves, com o intuito de estudar o efeito que elas podem apresentar em seus equipamentos eletrônicos, devido a magnitude das correntes elétricas na cablagem e a indução de intensos campos eletromagnéticos.

1.3 MATERIAL E MÉTODO

Os testes apresentados por este documento são complexos quando abordados por simulações, pois envolvem muitas variáveis que, por sua vez, demandariam um extenso trabalho no qual seriam feitos procedimentos de simulação inéditos na indústria aeronáutica, por conta disso apenas pontos chave e simulações mais conservadoras são abordados neste trabalho, criando uma base que poderá servir de continuação para projetos futuros.

Atualmente existem procedimentos padrões prontos e definidos em norma por órgãos reguladores responsáveis pela segurança da operação de aeronaves no Brasil e no mundo. Os mais conhecidos são: a FAA (Administração Federal de Aviação) dos Estados Unidos, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) do Brasil e a EASA (Agência Europeia para a Segurança da Aviação) da Europa. Estas agências visam promover os mais elevados padrões de segurança e proteção ambiental na aviação, reconhecendo as diversas normas necessárias para testes e procedimentos de condições ambientais em aeronaves.

Neste trabalho a norma específica abordada é a DO160G, que fornece procedimentos para testes ambientais em equipamentos aerotransportados. A norma foi escrita pela RTCA (Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica) que é reconhecida pelos diversos órgãos reguladores do mundo e pela ISO (Organização Internacional de Padronização) como ISO-7137. A DO160G possui 26 seções das quais apenas a seção 22 será utilizada, que possui como título traduzido do inglês: Suscetibilidade Transitória Induzida por Descarga Elétrica e apresenta métodos de testes para verificar a capacidade do equipamento de resistir à uma seleção de transientes definidos (RTCA, 2010).

No documento são mostrados como calcular todos os parâmetros elétricos de diferentes tipos de condutores mais comumente utilizados nas aeronaves e os testes serão realizados e simulados em conformidade com a norma citada anteriormente. A norma aborda dois diferentes tipos de testes: o de injeção por pinos (*Pin Injection*) e o teste de cablagem (*Cable Bundle*). O trabalho tem como objetivo criar modelos de diferentes tipos de condutores para serem inseridos no software *LTSpice*, fazendo assim a simulação dos testes de cablagem, no qual diversos transientes são induzidos em um ou mais cabos. Devido à sua complexidade, os métodos de indução por cabos que são feitos em uma cablagem completa, serão reproduzidos com a aplicação apenas em um condutor isolado dos outros, pois os cálculos dos parâmetros concentrados e distribuídos dependerão da posição em que cada condutor ocupa na cablagem em relação aos outros. Uma simulação bem-feita é aquela que representa bem a realidade dependendo da pessoa que está simulando deixá-la o mais fiel possível. Por isso seria inviável tentar simular um conjunto de cabos e seus respectivos acoplamentos adjacentes, devido à aleatoriedade da posição relativa de cada diferente condutor, criando uma falsa representação do teste real. Simular apenas um cabo irá criar uma simulação mais conservadora em relação à um conjunto de cabos e irá representar o pior caso, pois a corrente elétrica a ser induzida não será dividida pelos diversos condutores inseridos em uma cablagem, tendo assim toda sua magnitude aplicada em apenas um elemento. Portanto se os circuitos de interface do equipamento resistirem aos efeitos dos transientes induzidos em apenas um condutor, eles resistirão aos efeitos induzidos em uma cablagem inteira.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os testes de suscetibilidade a descargas elétricas são necessários para a certificação e validação da qualidade do equipamento em relação à sua capacidade de resistir aos efeitos que as descargas elétricas podem causar. Estes testes por sua vez demandam tempo, dinheiro e mão de obra qualificada, então é essencial que se obtenha um conhecimento e um domínio prévio sobre o que será feito e os problemas que podem aparecer durante a testagem. As simulações feitas podem prever possíveis falhas e direcionar os engenheiros no momento do teste físico, assim como também replicar possíveis contestações feitas pelos órgãos reguladores, sem haver a necessidade de refazer o teste após o envio dos resultados.

Os resultados obtidos por este trabalho também podem ser utilizados para outras aplicações, como análise de interferências eletromagnéticas (seção 21 da norma DO160G), pois ele aborda a criação de modelos de diferentes tipos de condutores que podem ser utilizados genericamente para outras análises.

2 TESTES DE SUSCETIBILIDADE A DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

A Norma DO160G aborda diversos métodos de testes para diferentes condições ambientais. Neste trabalho será abordada a seção 22, que descreve os testes de suscetibilidade a descargas elétricas atmosféricas em equipamentos aeronáuticos, os quais são realizados com o intuito de certificar e qualificar o mesmo em relação à este evento ambiental (RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS, 2010).

2.1 A SEÇÃO 22 DA NORMA DO160G

A RTCA (Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica) é uma organização americana que desenvolve guias técnicos para uso regulamentar de autoridades governamentais e pela indústria. Foi fundada em 1935 e reincorporada em 1991 como uma organização privada sem fins lucrativos. Ela possui por volta de 20 comitês ativos com vários subgrupos de trabalho em cada um deles, desenvolvendo padrões para órgãos reguladores de aviação pelo mundo (RTCA, 2021).

A norma produzida pela RTCA que será utilizada como base neste trabalho é a DO160G, mais especificamente a seção 22. Ela fornece procedimentos padrão e critérios de teste ambiental para testar equipamentos aerotransportados para todo o espectro de aeronaves, desde as mais leves de aviação geral e helicópteros até as mais pesadas, como os cargueiros.

A seção 22 da DO160G tem como título: Suscetibilidade Transitória Induzida por Descarga Elétrica e aborda diversos requisitos e procedimentos padrões de testes para certificar um equipamento eletrônico aerotransportado em relação aos efeitos que podem ocorrer quando um raio atinge uma aeronave. A Figura 4 ilustra a estrutura de seções da norma citada, neste trabalho são especificados apenas pontos chaves relacionados ao tema, para os demais será abordada apenas uma visão geral explicativa.

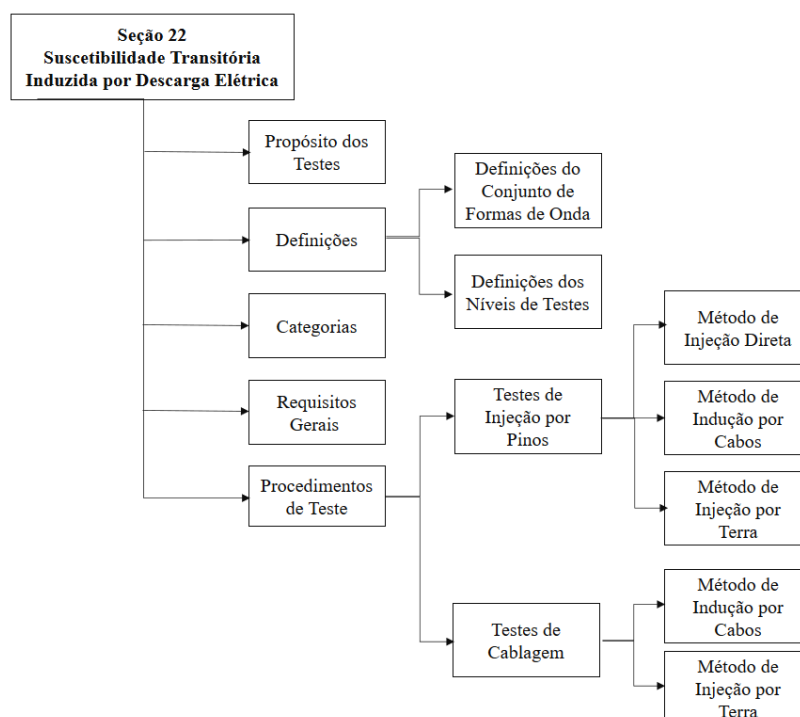
2.2 O PROPÓSITO DOS TESTES

Os métodos de testes de indução por descargas elétricas vindas da atmosfera em equipamentos eletrônicos, são essenciais para verificar e certificar a capacidade dos mesmos a resistirem à uma seleção de transientes definidos pela norma e que são característicos dos raios que atingem as aeronaves.

A seção 22 da norma DO160G aborda dois grupos de testes diferentes que são efetuados em caixas eletrônicas. O primeiro (teste de injeção por pinos) é um teste de tolerância a danos realizado usando a injeção direta de transientes em pinos ou contatos dos conectores de equipamentos eletrônicos, este método é utilizado para avaliar a rigidez dielétrica suportável ou tolerância a danos nos circuitos de interface de proteção do equipamento. Caso algum dos componentes do circuito de interface venham a sofrer algum tipo de dano, a certificação não é concluída.

O segundo (teste de cablagem) avalia a tolerância funcional do equipamento quando os transientes são aplicados nas cablagens de interconexão, podendo penetrar o equipamento indiretamente pelos cabos a ele conectados. O teste de cablagem é realizado com o intuito de verificar danos aos com-

Figura 4 – Estrutura das subseções da seção 22 norma DO160G.



Fonte: Elaborada pelo autor.

ponentes do equipamento e mudanças de estado inesperadas na saída da interface de proteção, que possam causar alguma perturbação funcional. Caso algum componente do equipamento venha a sofrer algum dano ou o próprio equipamento apresente mudanças abruptas de estado, a certificação não é concluída.

Como mostrado na Figura 4, ambos os testes estão divididos por subgrupos que representam os métodos de testagem e cada teste possui um método de indução por cabos. O foco deste trabalho é abordar a modelagem de diferentes tipos de condutores para serem inseridos apenas nos testes de cablagem com o método de indução por cabos.

Um ponto importante a se ressaltar é que estes testes podem não cobrir todos os aspectos da interação induzida por raios e efeitos no equipamento. Testes adicionais, como testes do equipamento em um sistema completo, podem ser necessários para obter a certificação de uma instalação específica, dependendo das funções executadas. Para equipamentos instalados externamente, testes de efeitos diretos também podem ser necessários (RTCA, 2010). Os testes para efeitos diretos de descargas elétricas em equipamentos são abordados na seção 23 da norma DO160G, os quais não são descritos neste trabalho.

2.3 DEFINIÇÕES

Nesta seção serão explicados alguns termos mais importantes que são citados neste trabalho relacionados aos testes e contidos na DO160G.

2.3.1 Equipamentos Eletrônicos Aerotransportados

Equipamentos eletrônicos aerotransportados são caixas que contêm algum circuito eletrônicos inserido e desempenham alguma função em algum sistema específico da aeronave, variando desde sistemas de entretenimento de passageiros até sistemas de radares e comunicação. Neste trabalho elas são referenciadas como a sigla em inglês EUT (*Equipment Under Test* ou equipamento sob teste).

Segundo Ananya Technologies (2018), um exemplo de equipamento aerotransportado é a PSU (*Pressure Sensor Unit* ou Unidade do Sensor de Pressão) contida na Figura 5, a qual desempenha a função de medir e distribuir a pressão estática e a pressão diferencial na forma de tensões DC.

Figura 5 – PSU (Unidade do Sensor de Pressão).



Fonte: Ananya Technologies (2018)

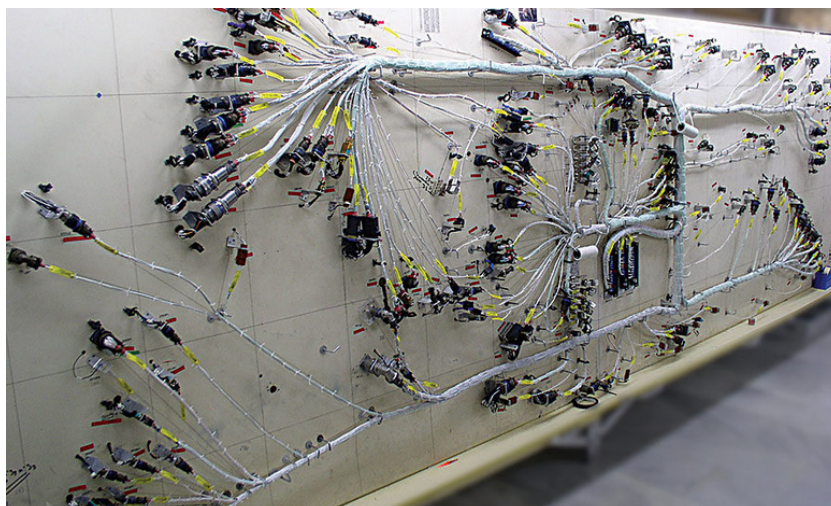
2.3.2 Cablagem de Interconexão

A cablagem de interconexão nada mais é que um conjunto ou um feixe de cabos paralelos que interligam um sistema. Ela pode ser constituída de diversos tipos diferentes de itens de hardware elétrico, como: cabos, conectores e proteções contra interferências eletromagnéticas, como mostrado na Figura 6. Como diz Librantz (2006), a cablagem de interconexão é uma das vias de entrada da corrente elétrica, induzida pelas descargas elétricas, nos equipamentos.

2.3.3 Tipos de Cabos Utilizados

Uma aeronave tem suas cablagens de interconexão compostas por diversos tipos de cabos, desde configurações mais simples sem nenhuma blindagem, até cabos compostos por diversos condutores entrelaçados internamente e envoltos por diferentes tipos de malhas metálicas, as quais têm a função de proteção contra induções de campos eletromagnéticos externos. Estes são responsáveis por transmitir sinais ou energia para os diferentes equipamentos que compõe um sistema. Cada condutor tem uma aplicação específica e pode ter configurações diferentes dos demais. Apesar de existirem inúmeros tipos de configurações diferentes, há aquelas que predominam a maior parte do espectro de cabos do sistema. Neste documento serão abordados quatro tipos: cabo simples sem blindagem, cabo duplo sem

Figura 6 – Cablagem aeronáutica em processo de produção.



Fonte: Traskos (2016)

blindagem, cabo simples com blindagem e cabo duplo com blindagem, os quais são divididos em dois grupos: cabos com blindagem e cabos sem blindagem.

O foco deste trabalho é mostrar os métodos de modelagem para os tipos de cabos mais comuns e que possa servir de base para futuros trabalhos que tenham a intenção de modelar configurações muito mais complexas, que possam conter mais de 3 condutores compondo o mesmo cabo.

2.3.4 Formas de Onda Transientes

Para a realização dos testes é necessário o acoplamento de um gerador de formas de onda transientes que injetam as respectivas curvas abordadas pela norma DO160G. Elas são transientes de tensão ou corrente que são induzidos nas cablagens ou injetados diretamente nos circuitos do equipamento, dependendo do tipo de teste a ser realizado. A Figura 7 mostra todas as formas de onda transientes exigidas pela norma nos testes

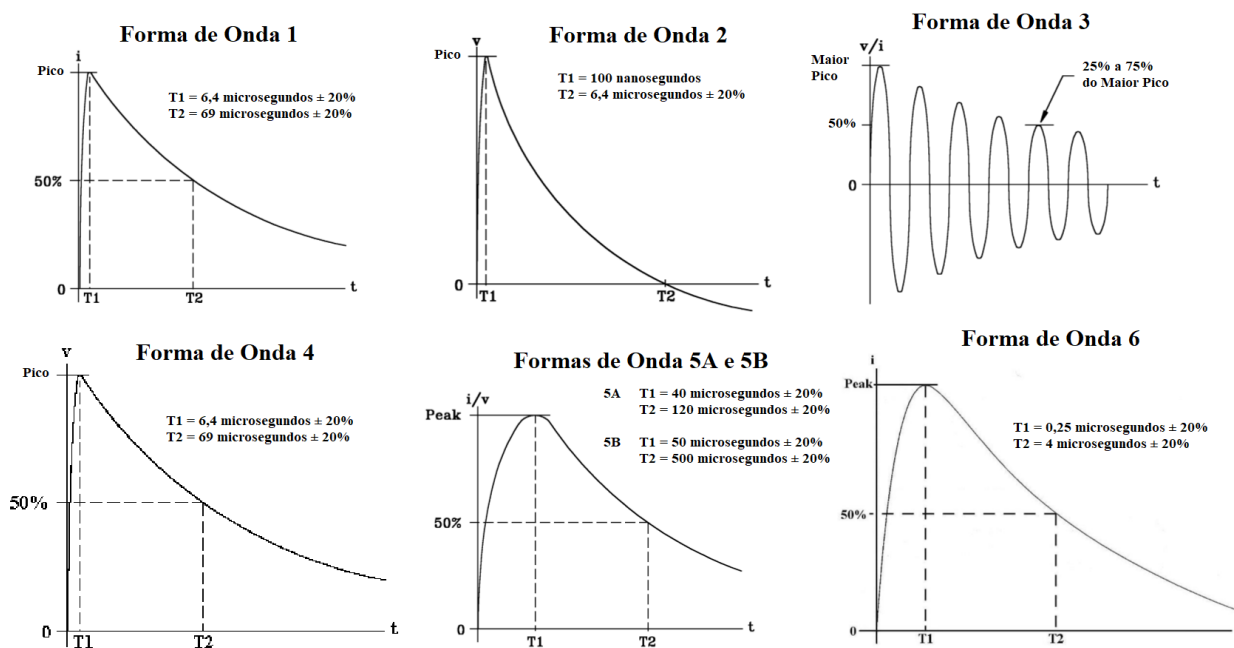
2.3.5 Testes de cablagem - Pulsos Únicos, Pulsos Múltiplos e Rajadas Múltiplas

Nos testes físicos de cablagem, as formas de onda que foram apresentadas na seção anterior, não são simplesmente induzidas na cablagem e no equipamento. Existem três diferentes modos de indução: pulsos únicos, pulsos múltiplos e rajadas múltiplas.

A configuração de pulsos únicos representa a aplicação e a verificação da resposta para o componente mais severo de um raio em uma aeronave, simplesmente induzindo a forma de onda desejada na cablagem. No laboratório real o teste de pulsos únicos deve ser repetido dez vezes no espaço de tempo de 1 minuto para verificar o comportamento do equipamento em relação às respostas térmicas.

A configuração de pulsos múltiplos representa um conjunto de formas de onda transitórias destinadas a representar os efeitos induzidos da forma de onda de múltiplos pulsos de um relâmpago externo na cablagem da aeronave. Para esta configuração, diferentemente da configuração de pulso único, a indução das formas de onda nos condutores se repete seguindo um padrão como mostrado na Figura 8, o qual é composto por um primeiro transiente que possui seu pico maior do que os demais seguido

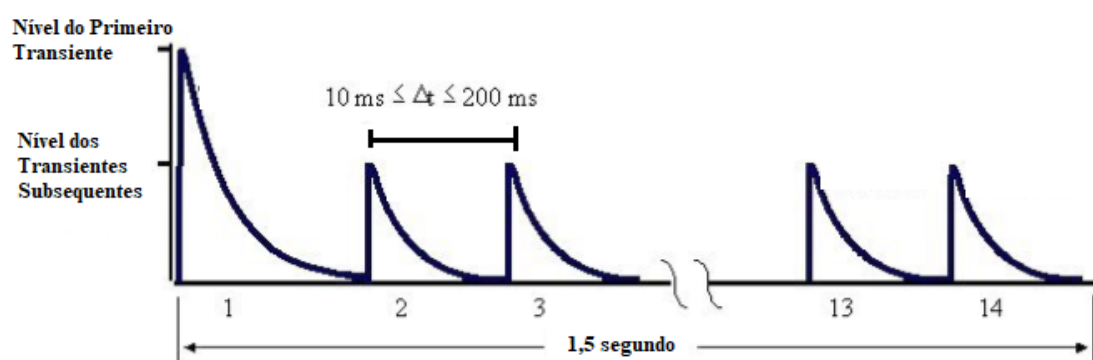
Figura 7 – Formas de onda exigidas pela norma.



Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

por 13 subsequentes transientes distribuídos em um espaço de tempo de 1,5 segundo. Assim como em pulsos únicos, a indução para pulsos múltiplos deve ser feita em laboratório em um espaço de tempo de 5 minutos, repetindo-se dez vezes a configuração de pulsos mostrada na Figura 8, também com o intuito de verificar as respostas térmicas do equipamento.

Figura 8 – Configuração de pulsos múltiplos.

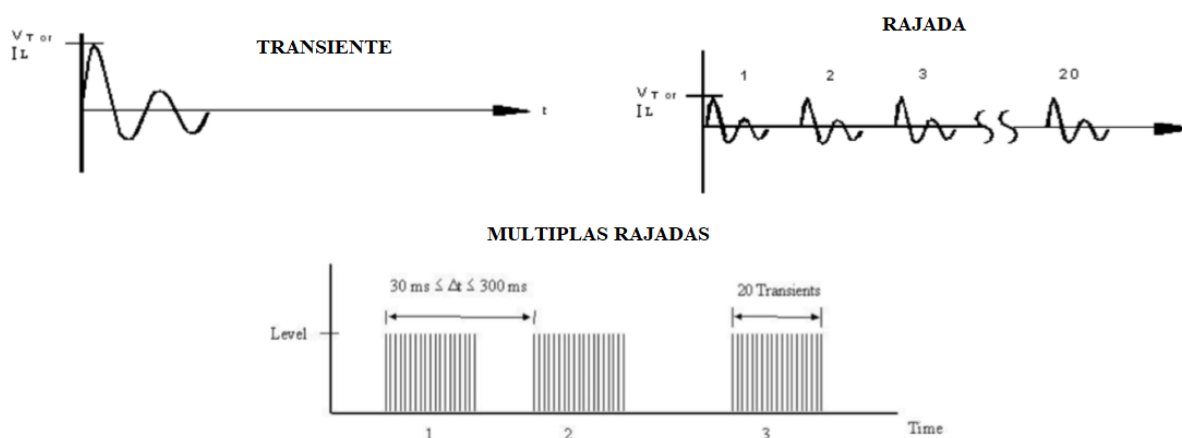


Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor

Para a configuração de múltiplas rajadas, assim como em pulsos múltiplos, as formas de onda devem seguir um padrão que é chamado de rajada (do inglês *burst*). A rajada é composta por 20 transientes contidos em um espaço de tempo entre $50\mu\text{s}$ e $1000\mu\text{s}$ e deve ser aplicada múltiplas vezes

como na Figura 9, por este motivo se dá o nome rajadas múltiplas. No laboratório 3 rajadas devem ser induzidas a cada 3 segundos continuamente em um espaço de tempo de 5 minutos.

Figura 9 – Configuração de rajadas múltiplas.



Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor

2.3.6 Gerador de Transientes e Transformador de Injeção

O gerador de transientes é o equipamento responsável por criar as formas de onda mostradas nas subseções anteriores. Para induzir os transientes na cablagem utiliza-se um transformador de injeção acoplado no gerador, como o mostrado na Figura 10. Este transformador é composto por uma bobina comum em seu primário, sendo o seu secundário a cablagem que será testada.

Figura 10 – Transformador de injeção utilizado como gerador de transientes.



Fonte: Fischer (2021)

2.4 CATEGORIAS

A categoria dos testes é constituída por 6 caracteres, como ilustrado na Figura 11, onde os caracteres definidos pelas letras representam o conjunto de formas de onda que devem ser aplicados ao equipamento. A forma de onda depende de características físicas dos cabos utilizados e da configuração da fuselagem da aeronave que está mais próxima. Os caracteres definidos por números representam os níveis dos respectivos testes.

Os caracteres estão definidos por pares, onde para cada conjunto de forma de onda, há um nível de teste atrelado. O primeiro par representa o conjunto de transientes e o nível para o teste de injeção por pino, o segundo para o teste de cablagem de pulsos únicos e pulsos múltiplos e o terceiro também para o teste de feixe de cabos, porém para rajadas múltiplas.

No exemplo ilustrado pela Figura 11, a categoria B3G4L3 representa um equipamento com teste de injeção por pinos utilizando o conjunto B de formas de onda com nível 3, teste de cablagem de pulso único e pulsos múltiplos com conjunto de formas de onda G e nível 4 e cablagem de cabos de rajadas múltiplas com conjunto de formas de onda L e nível 3. Note que as designações de pulso único, pulsos múltiplos e rajadas múltiplas são atribuídas apenas aos testes feitos em cablagem.

Figura 11 – Categorias dos testes de suscetibilidade a descargas elétricas da norma DO160G.

B	3	G	4	L	3
Injeção por Pinos/Conjunto de Formas de Onda	Injeção por Pinos - Nível de Teste	Feixe de Cabos de Único Pulso e Múltiplos Pulsos – Conjunto de Formas de Onda	Feixe de Cabos de Único Pulso e Múltiplos Pulsos – Nível de Teste	Feixe de Cabos de Rajadas Múltiplas – Conjunto de Formas de Onda	Feixe de Cabos de Rajadas Múltiplas – Nível de Teste

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

2.4.1 Conjuntos de Forma de Onda

Segundo a norma DO160G, os conjuntos de formas de onda são definidos por letras e separados pelo tipo do teste. Cada conjunto possui diferentes formas de onda exigidas para cada, conforme mostrado nas Tabelas 1 e 2.

Cada conjunto tem sua diferente aplicação que depende do local de instalação e do tipo de indução que pode ocorrer nos condutores em relação à configuração da estrutura da fuselagem.

Os conjuntos de formas de onda A, C, E, G, J e L são aplicáveis a equipamentos interconectados com cablagem instalada dentro de fuselagens ou seções de fuselagem onde as aberturas são a principal fonte de transientes induzidos. Pelas mesmas razões, esses conjuntos de forma de onda também podem ser aplicados a equipamentos em fuselagens compostas de estruturas metálicas e painéis compósitos.

Os conjuntos de formas de onda B, D, F, H e K são aplicáveis a equipamentos interconectados com fiação instalada em qualquer fuselagem ou seção de fuselagem quando a resistência da estrutura também é uma fonte significativa de transiente induzido. Nestes casos, a fiação é exposta a altas tensões e correntes de relâmpago redistribuídas, que são representadas pela forma de onda 5A.

Os conjuntos E, F, J, K são aplicáveis para equipamentos interconectados com cabos que possuem malha de blindagem em todos os pontos da cablagem, enquanto os conjuntos C, D, G e H são aplicáveis para equipamentos interconectados com cabos que não possuem malha de blindagem.

Tabela 1 – Conjuntos de formas de onda para testes de injeção por pino

Conjunto de Formas de Onda	Tipo do Teste	Formas de Onda (V_{oc}/I_{sc})
A	Injeção por Pinos	3/3, 4/1
B	Injeção por Pinos	3/3, 5A/5A

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

Tabela 2 – Conjuntos de formas de onda para testes de cablagem

Conjunto de Formas de Onda	Tipo do Teste	Formas de Onda
C	Pulso Único	2, 3
D	Pulso Único	2, 3, 4
E	Pulso Único	1, 3
F	Pulso Único	3, 5A
G	Pulso Único	2, 3
G	Pulsos Múltiplos	2, 3
H	Pulso Único	2, 3, 4
H	Pulsos Múltiplos	2, 3, 4
J	Pulso Único	1, 3
J	Pulsos Múltiplos	1, 3
K	Pulso Único	3, 5A
K	Pulsos Múltiplos	3, 5A
L	Rajadas Múltiplas	3
M	Rajadas Múltiplas	6

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

2.4.2 Níveis de Teste

A testagem tem vários níveis de severidade variando de 1 a 5. Esta categoria é definida com base na localização e função do equipamento na aeronave. O fabricante do equipamento deve testar o equipamento para os níveis de teste e formas de onda consistentes com seu uso esperado e instalação da aeronave.

As descrições dos níveis de teste para ambientes internos de aeronaves são fornecidas abaixo com níveis específicos para cada forma de onda de teste listada nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Cada nível possui um valor relacionado à amplitude das tensões ou correntes de cada uma das formas de onda apresentada anteriormente.

O nível 1 é destinado para equipamentos e cablagem de interconexão instalados em um ambiente bem protegido, o nível 2 é destinado para ambientes parcialmente protegidos, nível 3 para ambientes moderadamente expostos, nível 4 e 5 para ambientes classificados com uma alta severidade eletromagnética.

Note que a Tabela 3 contém uma linha que apresenta as tensões V_{oc} e correntes I_{sc} , estas são a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito respectivamente, ambas são formas de medidas de calibração do gerador dos testes de injeção por pinos. Da mesma forma, as Tabelas 4, 5 e 6 possuem uma linha com as tensões V_T , I_T , V_L e I_L . Estas são chamadas tensão/corrente de nível de teste e tensão/corrente limite, respectivamente. Formas de onda de tensão irão possuir uma tensão de nível

de teste V_T e uma corrente limite I_L , mas uma forma de onda de corrente irá possuir uma corrente de nível de teste I_T e uma tensão limite V_L .

Ter não apenas uma tensão ou corrente de nível de teste, mas também uma tensão ou corrente limite é importante porque em sistemas com baixa impedância, pois atingir um nível de tensão pode exigir uma alta corrente que é impossível de ser atingida.

Tabela 3 – Configuração de níveis para o gerador de testes de injeção por pinos

Nível	Formas de Onda		
	3/3	4/1	5A/5A
	$V_{oc}[V]/I_{sc}[A]$	$V_{oc}[V]/I_{sc}[A]$	$V_{oc}[V]/I_{sc}[A]$
1	100/4	50/10	50/50
2	250/10	125/25	125/125
3	600/24	300/60	300/300
4	1500/60	750/150	750/750
5	3200/128	1600/320	1600/1600

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

Tabela 4 – Configuração de níveis para o gerador de testes de cablagem de pulso único

Nível	Formas de Onda				
	2/1	2/1	3/3	4/1	4/5A
	V_L/I_T	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_L[V]/I_T[A]$
1	50/100	50/100	100/20	50/100	50/150
2	125/250	125/250	250/50	125/250	125/4000
3	300/600	300/600	600/120	300/600	300/1000
4	750/1500	750/1500	1500/300	750/1500	750/2000
5	1600/3200	1600/3200	3200/640	1600/3200	1600/5000

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

Tabela 5 – Configuração de níveis para o gerador de testes de cablagem de pulsos múltiplos

Nível		Formas de Onda				
		2/1	2/1	3/3	4/1	4/5A
		$V_L[V]/I_T[A]$	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_L[V]/I_T[A]$
1	Primeiro pulso	50/50	50/50	100/20	25/50	20/60
	Demais pulsos	25/25	25/25	50/10	12,5/25	10/30
2	Primeiro pulso	125/125	125/125	250/50	62,5/125	50/160
	Demais pulsos	62,5/62,5	62,5/62,5	125/25	31,25/62,5	25/80
3	Primeiro pulso	300/300	300/300	600/120	150/300	120/400
	Demais pulsos	150/150	150/150	300/60	75/150	60/200
4	Primeiro pulso	750/750	750/750	1500/300	375/750	300/800
	Demais pulsos	375/375	375/375	750/150	187,5/375	150/400
5	Primeiro pulso	1600/1600	1600/1600	3200/640	800/1600	640/2000
	Demais pulsos	800/800	800/800	1600/320	400/800	320/1000

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

Tabela 6 – onfiguração de níveis para o gerador de testes de cablagem de rajadas múltiplas

Nível	Formas de Onda	
	3	6
	$V_T[V]/I_L[A]$	$V_L[V]/I_T[A]$
1	60/1	100/5
2	150/2,5	250/12,5
3	360/6	600/30
4	900/15	1500/75
5	1920/32	3200/160

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

2.5 PROCEDIMENTOS DE TESTE

O foco deste trabalho é dar uma atenção especial aos estudos e simulações do teste que utiliza uma indução nos cabos de interconexão de um equipamento, que é o teste de cablagem com o método de indução por cabos.

2.5.1 Calibração do Gerador de Transientes

Como diz a norma DO160G, o gerador de transientes deve primeiro passar por um processo de calibração antes de a testagem ser começada. Cada um dos testes tem seus diferentes meios de serem calibrados, e as tensões e correntes V_T , V_L , I_T , I_L para os Testes de Cablagem e V_{oc} e I_{sc} para os testes de Injeção por Pinos devem ser ajustadas de acordo com cada um dos níveis abordados na Seção 2.4.2, dependendo da categoria do teste a ser realizado. Esta calibração deve ser feita no teste em laboratório como diz a norma, portanto não terá efeito para as simulações.

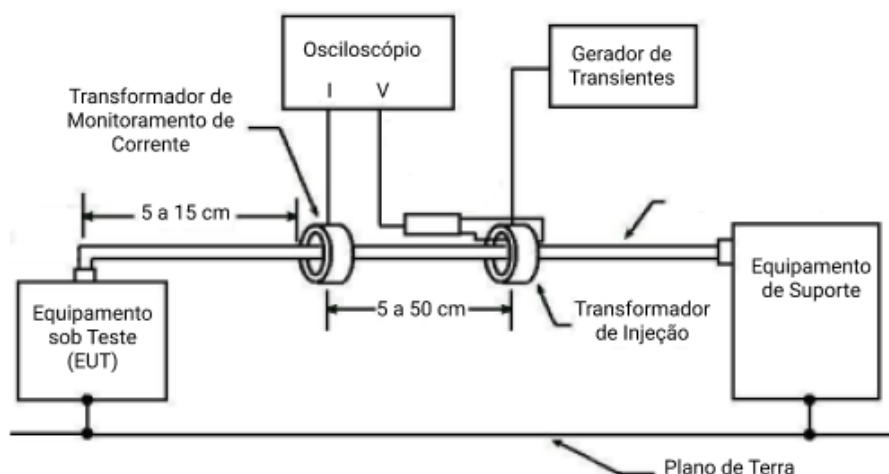
2.5.2 Testes de Cablagem - Método de Indução por Cabos

A testagem de cablagem utilizando o método de indução por cabos, é uma técnica onde diversos transientes são aplicados por indução em um conjunto de cabos. Este método é utilizado para verificar se o equipamento aeronáutico pode resistir aos efeitos eletromagnéticos, produzidos pelo ambiente externo onde as descargas elétricas ocorrem, sem apresentar alguma perturbação funcional ou danos aos componentes internos (RTCA, 2010). Neste método o teste deve ser feito com a configuração completa do equipamento com os cabos de interconexão e as cargas dos circuitos elétricos de interface com a cablagem conectados.

Segundo a norma DO160G, perturbações funcionais são alterações muito grandes de estado que possam alterar as funções ou leituras feitas pelos equipamentos. Cabe a empresa que está testando-os conhecer seus padrões de performance e confiabilidade, para saber se o que está sendo analisado pode causar algum erro em suas unidades.

O teste consiste em induzir diversas formas de ondas transientes definidas pela norma, mostradas na Seção 2.3.4, através de um transformador de injeção que envolve a cablagem conectada em dois equipamentos, o primeiro que é o que está sendo testado e o segundo uma unidade de suporte, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Configuração do teste de cablagem.



Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor

A configuração do teste é composta por alguns elementos principais, como os listados abaixo.

- O gerador de transientes que tem a função de criar as formas de onda exigidas.
- O transformador de injeção que tem a função de induzir as formas de onda na cablagem.
- O transformador de monitoramento da corrente e o monitor de tensão para monitorar e validar as formas de onda injetadas.
- O equipamento de suporte que simula a conexão com outra unidade, carga ou sensor.
- O equipamento sob teste que representa a unidade que será testada.
- O conjunto de cabos de interconexão de uma unidade para outra

Em todos os testes, os cabos de interconexão devem estar alocados a uma distância de 5 cm do plano de terra.

A ênfase deste documento é mostrar um método de modelagem e simulação para alguns tipos diferentes de cabos e posteriormente aplicar em uma configuração de cabo comercial, conectá-lo à interface de proteção de um equipamento aeronáutico real e simular alguns procedimentos importantes dos testes que envolvem indução por cabos. Estes testes são complexos quando abordados por simulações por envolver muitas variáveis que, por sua vez, demandariam um extenso trabalho onde seriam feitos procedimentos de simulações inéditos na indústria aeronáutica, por conta disso apenas pontos chaves e simulações mais conservadoras são abordados neste trabalho, criando uma base que poderá servir de continuação para trabalhos futuros

3 ASPECTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS SOBRE A MODELAGEM DO TESTE DE CABLAGEM

Nesta seção serão desenvolvidos os aspectos teóricos e conceituais para que se possa criar um modelo dos 4 diferentes tipos de cabos e do transformador de injeção, abordados no capítulo 3, para serem inseridos em simulações de testes de suscetibilidade a descargas elétricas atmosféricas. Dentre esses aspectos pode-se incluir os cálculos de parâmetros concentrados e distribuídos dos diferentes tipos de cabos abordados, como as capacitâncias, indutâncias e resistências dos condutores.

3.1 PROPRIEDADES E ELEMENTOS DA CONSTRUÇÃO DE UM CABO

Como dito na Seção 2.3.3, este trabalho aborda 4 configurações de cabos que representam a maioria dos tipos de condutores presentes em uma aeronave, estas configurações são geralmente utilizadas para a instrumentação e comunicação dos sistemas aeronáuticos. Nesta seção serão descritos as propriedades e os diferentes itens que compõe a construção destes condutores, para depois dar os próximos passos referentes à criação dos modelos teóricos, abordados nas próximas seções.

3.1.1 Elementos da Construção de um Cabo

O cabo utilizado como exemplo é o cabo duplo com blindagem. Esta é a configuração mais complexa das 4 que são abordadas neste documento e possui todos os elementos que estão presentes na construção dos tipos abordados neste trabalho. Como mostrado na Figura 13, os elementos que podem estar presentes na construção de um cabo, independente da configuração, são: a jaqueta, a malha de blindagem, a isolação e o condutor.

O Condutor é responsável por transmitir a corrente elétrica, que carrega algum sinal ou apenas energia, entre os equipamentos. Ele é composto por diversos filamentos de pequenos fios que em conjunto formam o que é chamado de cabo, esta técnica tem um objetivo especial que será tratado mais adiante nas próximas seções.

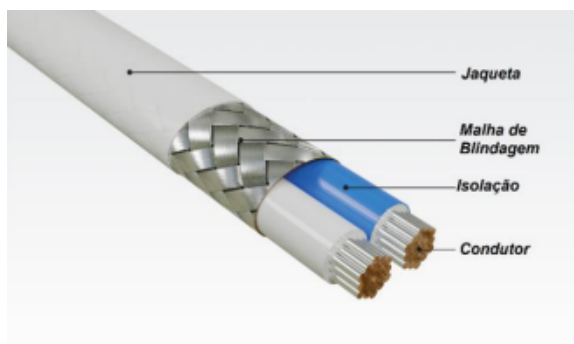
A Malha de Blindagem protege o conteúdo, que está sendo transmitido pelo condutor, contra possíveis interferências eletromagnéticas externas, sendo responsável pela proteção contra a entrada de correntes indesejadas induzidas pelas descargas elétricas atmosféricas. Pode ser feita de filamentos, igual ao condutor, ou apenas de uma lâmina fina (MD POLICABOS, 2021).

Por fim a Isolação e a Jaqueta, feitas de materiais isolantes, são responsáveis por isolar os materiais metálicos e condutores de possíveis curtos-circuitos ou contatos indesejados com o ambiente externo.

Um cabo duplo com ou sem blindagem é constituído de dois condutores, que por sua vez, podem ou não estar trançados entre si, dependendo de sua aplicação. O fato de um cabo ter seus condutores trançados ou não, não afetará os cálculos dos parâmetros concentrados e distribuídos devido à presença de um eixo de simetria, portanto todas as equações serão feitas considerando um cabo duplo sem apresentar seus condutores internos trançados, para uma melhor e mais fácil abordagem.

Como mostrado na Figura 13, um cabo duplo também pode ter o formato de sua seção transversal similar ao de uma elipse, por este motivo muitos fabricantes optam por utilizar filamentos de material

Figura 13 – Elementos da construção de um cabo duplo com blindagem.



Fonte: Gore (2021), adaptado pelo autor.

isolante (geralmente do mesmo material da Isolação) entre os condutores e a malha de blindagem, fazendo assim o formato de sua seção transversal ficar semelhante ao de um círculo, como mostrado na Figura 14. Esta técnica é aplicada para o condutor apresentar parâmetros concentrados e distribuídos mais definidos ao longo de seu comprimento. Portanto neste documento serão modelados apenas condutores que possuem sua seção transversal em formato circular.

Figura 14 – Cabo blindado duplo com seção transversal em formato circular.



Fonte: Gore (2021), adaptado pelo autor.

3.1.2 Fator de Encalhe

Como visto na Figura 13, um cabo tem em seu interior um componente que é feito de material metálico. Segundo Amphenol (2021), na maioria dos cabos este condutor é composto por diversos filamentos internos, esta construção é feita para proporcionar uma maior elasticidade ao longo do comprimento do cabo, evitando possíveis deformações plásticas em sua dobragem. Estes filamentos internos, por sua vez, inserem espaços vazios dentro do condutor e, por este motivo, ao calcular determinados tipos de parâmetros elétricos que dependem do diâmetro do condutor, deve-se aplicar um fator de correção chamado **Fator de Encalhe ou Stranding Factor**. Este fator é sempre menor que 1 e aparece em algumas equações de cálculos de parâmetros elétricos multiplicando o diâmetro do condutor interno para efetuar sua correção. Como mostrado na Tabela 7, o fator de encalhe possui seu valor definido em função do número de filamentos presentes no condutor.

Tabela 7 – Fator de encalhe em função do número de filamentos

Número de Filamentos Internos	Fator de Encalhe
1	1,000
7	0,939
19	0,970
37	0,980
61	0,985
91	0,988

Fonte: Standard Wire (2021), adaptado pelo autor.

3.1.3 Propriedades Geométricas de um Cabo

As propriedades geométricas de um cabo, como o próprio nome diz, são propriedades relacionadas à sua geometria. Elas serão necessárias para os futuros cálculos de parâmetros concentrados de um cabo e geralmente são fornecidas pelos fabricantes. Algumas são descritas a seguir:

Diâmetro Real do Condutor (d_w): É o diâmetro bruto real do material condutor mostrado na Figura 13 quando medido com um paquímetro, ou seja, sem aplicado o fator de encalhe.

Diâmetro da Isolação (d_i): Representa do diâmetro externo da isolação interna que protege o condutor, mostrado na Figura 13.

Diâmetros Interno (d_{si}) e Externo (d_{se}) da Malha de Blindagem: Representam, respectivamente, os diâmetros internos e externos da malha mostrada na Figura 13 responsável por proteger o condutor de possíveis interferências eletromagnéticas.

Diâmetro da Jaqueta (d_j): Representa o diâmetro externo da isolação externa que protege o conjunto inteiro.

Espessura da Isolação (t_i): Representa a espessura da isolação mostrada na Figura 13.

Espessura da Malha de Blindagem (t_s): Representa a espessura da malha de blindagem contra interferências eletromagnéticas.

Espessura da Jaqueta (t_j): Representa a espessura da jaqueta externa.

3.1.4 Propriedades Elétricas de um Cabo

As propriedades elétricas citadas a seguir são as fornecidas pela maioria dos fabricantes de cabos, mas não são suficientes para se criar um modelo fiel à realidade. Estas são propriedades que são medidas por algum equipamento e colocadas na folha de especificações de dados do condutor, portanto representam parâmetros distribuídos. Para se criar um modelo de um cabo real, necessita-se além dos parâmetros distribuídos, os parâmetros concentrados, os quais serão descritos nas próximas seções.

A Figura 15 aborda a ilustração de um cabo blindado duplo, onde os componentes C1 e C2 são os condutores internos e o componente S é a respectiva malha de blindagem.

Resistência Nominal DC do condutor (R_{DCw}): Representa a resistência por unidade de comprimento do condutor interno mostrado na Figura 13. Geralmente os fabricantes a disponibilizam nas unidades $\Omega/1000ft$ ou Ω/m .

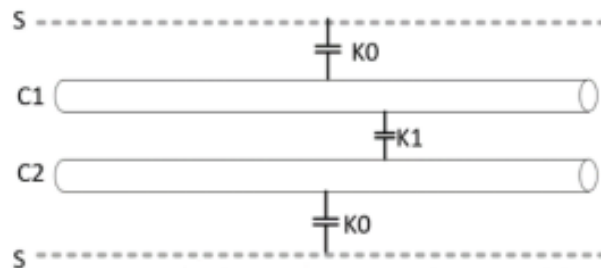
Resistência Nominal DC da malha de blindagem (R_{DCs}): Representa a resistência por unidade de comprimento da malha de blindagem. Assim como no condutor interno, é disponibilizada pelos fabricantes nas unidades $\Omega/1000\text{ft}$ ou Ω/m .

Capacitância Mútua (C_m): A capacitância mútua é a combinação das capacitâncias presentes em um condutor. Seu cálculo pode variar de acordo com a configuração do cabo e geralmente é disponibilizado e representado nas unidades pF/ft ou pF/m pelos fabricantes.

Capacitância Mútua de Modo Diferencial (C_{md}): Para um cabo duplo blindado, a capacitância mútua pode assumir duas formas: modo diferencial ou modo comum. Ambas são formas de medidas diferentes que o fabricante utiliza para representar a capacitância mútua deste tipo de cabo. A primeira é medida simplesmente colocando as pontas de prova de um equipamento em ambos os condutores da Figura 15, o resultado retornado é o valor da capacitância mútua de modo diferencial. Ela representa uma combinação das capacitâncias mostradas na figura. Geralmente ela é fornecida pelos fabricantes nas unidades pF/ft ou pF/m .

Capacitância Mútua de Modo Comum (C_{mc}): A capacitância mútua de modo diferencial, assim como a anterior, é uma combinação diferente das capacitâncias de um cabo duplo blindado, mostradas na Figura 15. Para esta medida, aplica-se um curto-circuito entre qualquer um dos condutores e a malha de blindagem, posteriormente realiza-se a medida colocando as pontas de prova nos condutores. Também é fornecida pelos fabricantes nas unidades pF/ft ou pF/m .

Figura 15 – Capacitâncias de um cabo duplo blindado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Indutância Efetiva (L_e): De modo análogo às capacitâncias mútuas, a indutância efetiva é a combinação de todas as pequenas indutâncias isoladas presentes em cada um dos elementos de um cabo, representando um parâmetro distribuído. Geralmente é fornecida nas unidades $\mu H/ft$ ou $\mu H/m$ pelos fabricantes.

Permissividade (ϵ): é uma propriedade dos materiais que é associada com a quantidade de cargas elétricas que podem ser armazenadas em um determinado volume (unidade: F/m). Na literatura também é chamada de constante dielétrica dos materiais. A permissividade do vácuo (ϵ_0) possui valor aproximado de $8,8541878 \times 10^{-12} F/m$. Já

Permissividade Dielétrica Relativa dos Materiais (ϵ_r): A Permissividade Relativa, também chamada de Constante Dielétrica, é a permissividade de um material em relação à permissividade do vácuo e é calculada com a equação (1).

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (1)$$

A Tabela 8 fornece os valores de alguns materiais mais utilizados em cabos elétricos.

Tabela 8 – Permissividade Relativa de alguns materiais mais comuns utilizados em cabos elétricos.

Material	Permissividade Dielétrica Relativa (ϵ_r)
PFA (Teflon)	2,15
PVC	5,00
PVC (Semirrígido)	3,60
Polietileno	2,29
Polipropileno	2,25

Fonte: Standard Wire (2021) adaptado pelo autor.

3.2 CONCEITOS TEÓRICOS PRESENTES NA MODELAGEM DE CABOS

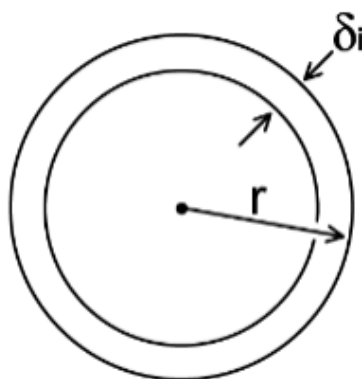
Nesta seção serão abordados alguns conceitos básicos existentes na literatura que são necessários para obter um melhor entendimento da modelagem de cabos e dos cálculos dos parâmetros concentrados e distribuídos.

3.2.1 Efeito Pelicular

O **Efeito Pelicular** é um fenômeno que acarreta a repulsão das linhas de corrente elétrica do centro de um condutor cilíndrico, fazendo-as fluir para mais perto da superfície, devido à frequência da corrente elétrica que trafega o mesmo. O efeito pelicular só é visto em aplicações AC e, como visto nas seções anteriores segundo a norma DO160G, as formas de onda das descargas elétricas não são constantes ao longo do tempo possuindo uma composição de diferentes frequências. Portanto uma análise do efeito pelicular será necessária nas próximas seções.

Segundo Chaves e Braun (2020), a causa deste efeito é a indução eletromagnética. Uma corrente alternada que trafega dentro deste condutor, cria dentro e fora do mesmo um campo magnético acompanhado por um campo elétrico, ambos variantes no tempo. Este campo elétrico, por sua vez, repele as cargas da corrente elétrica para a periferia do condutor. A Figura 16 ilustra este fenômeno, e mostra um condutor de raio r com uma profundidade da pele do efeito pelicular δ_i

Figura 16 – Profundidade da pele do efeito pelicular.



Fonte: Knight (2016).

Segundo Hayt Júnior e Buck (2013), a profundidade da pele δ_i pode ser calculada com a equação (2), onde ρ , f_{req} e μ são respectivamente, a resistividade do material, frequência da corrente aplicada no condutor e a permeabilidade magnética do material.

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f_{req} \mu}} \quad (2)$$

Segundo Knight (2016), a equação (2) é válida apenas quando $r \gg \delta_i$. Note que a equação não possui o termo r (raio do condutor), por este motivo, ao analisar um cabo com raio muito pequeno, a espessura da pele δ_i poderá retornar valores maiores que o próprio raio do condutor quando a corrente elétrica possuir uma frequência baixa, o que seria impossível. Para resolver este problema, Knight (2016) utiliza a equação 3 a seguir, onde δ_i' é a profundidade ou espessura corrigida da pele do efeito pelicular.

$$\delta_i' = \delta_i \left[1 - \exp\left(-\frac{r}{\delta_i}\right) \right] \quad (3)$$

3.2.2 Resistência AC

Como visto na seção anterior, as correntes variantes ao longo do tempo acarretam no surgimento do efeito pelicular, onde as cargas da corrente elétrica sempre apresentarão uma repulsão do centro do condutor e irão, conseqüentemente, restringir a área da seção transversal por onde a mesma trafega ao longo do condutor. Por este motivo, este fenômeno irá causar um aumento na resistência real do condutor que, por sua vez, irá aumentar de acordo com o acréscimo da frequência utilizada. Esta nova resistência real e variante é chamada de Resistência AC do condutor e, como diz Knight (2016), pode ser calculada de acordo com a equação 4.

$$R_{AC} = \frac{A_{DC} R_{DC}}{A_{eff}} \quad (4)$$

Onde A_{DC} , R_{DC} e A_{eff} são respectivamente a Área DC (área circular cheia total), Resistência DC do condutor e a Área Efetiva relacionada à nova seção transversal devido ao efeito pelicular. A área efetiva pode ser calculada com a equação 6, a qual é constituída por uma diferença entre áreas.

$$A_{eff} = \pi r^2 - \pi (r - \delta_i')^2 \quad (5)$$

$$A_{eff} = \pi (2r\delta_i' - \delta_i'^2) \quad (6)$$

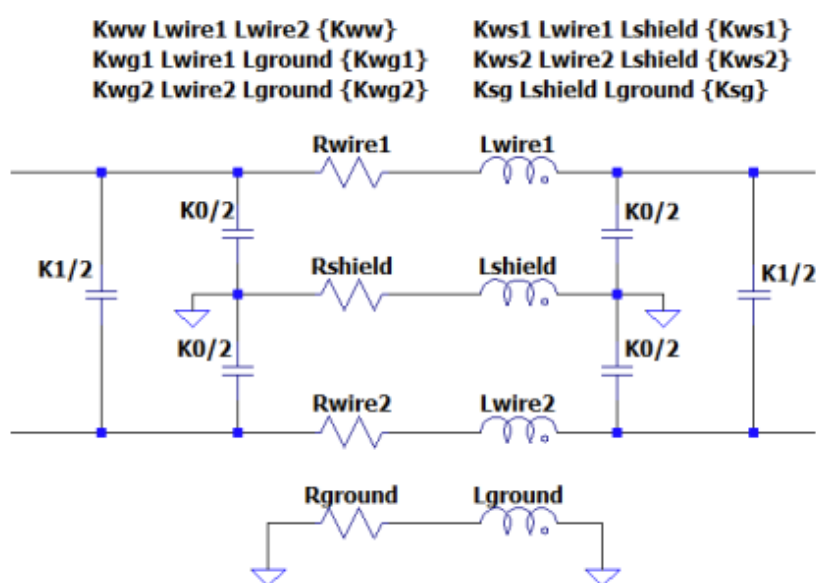
3.2.3 Indutâncias Parciais

Nas próximas seções serão abordados os modelos de parâmetros concentrados dos cabos que serão analisados por este trabalho. A Figura 17 mostra um modelo de um cabo blindado duplo, o qual será comentado em uma seção dedicada para isso. Portanto ele será utilizado apenas como exemplo para a explicação das **Indutâncias Parciais**.

Note que a Figura 17 possui diferentes indutâncias em cada um dos elementos do cabo, estas indutâncias são chamadas de **Indutâncias Parciais** do cabo, as quais são pequenas indutâncias analisadas isoladamente à cada elemento ou conjunto de elementos. Estas podem ser divididas em dois grupos: Indutâncias Próprias Parciais ou Indutâncias Mútuas Parciais (PAUL, 2010). As Indutâncias Próprias Parciais são as indutâncias que cada um dos condutores apresenta naturalmente, já as Indutâncias Mútuas Parciais, são relacionadas ao acoplamento que cada uma das indutâncias próprias tem com as suas adjacentes. Estes elementos são calculados nas próximas seções.

Os parâmetros mostrados na Figura 17, representados pela letra "K", são os fatores de acoplamento entre cada elemento, os quais têm seus cálculos mostrados nas próximas seções. Estes parâmetros são fundamentais na hora de criar o modelo no software LTSpice.

Figura 17 – Modelo do cabo duplo blindado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Indutância Efetiva

A **Indutância Efetiva** é uma combinação de todas as indutâncias parciais de cada elemento do cabo. Ao contrário das parciais, a indutância efetiva pode ser medida com alguns equipamentos especiais e é calculada de acordo com a configuração do cabo a ser analisada, pois cada cabo possui combinações diferentes de indutâncias parciais (PAUL, 2010).

3.2.5 Capacitâncias Parasitas

As **Capacitâncias Parasitas** são pequenas capacitâncias isoladas que aparecem entre cada conjunto de elementos. Elas podem ser comparadas analogamente às indutâncias parciais e são mostradas também na Figura 17. As capacitâncias parasitas sempre irão aparecer quando dois materiais condutores forem colocados próximos um do outro e com um material dielétrico entre ambos.

3.2.6 Capacitância Mútua

De modo análogo à indutância efetiva, a **Capacitância Mútua** é a combinação de todas as capacitâncias de cada elemento ou conjunto de elementos internos do cabo. Ela pode ser medida de modos diferentes e retornar valores diferentes (Capacitância Mútua de Modo Diferencial e Modo Comum) como mostrado na Seção 3.1.4. Cada configuração diferente de cabo irá possuir um modo diferente de cálculo para esta capacitância. Os cálculos serão abordados mais afundo nas próximas seções.

3.3 MODELOS DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

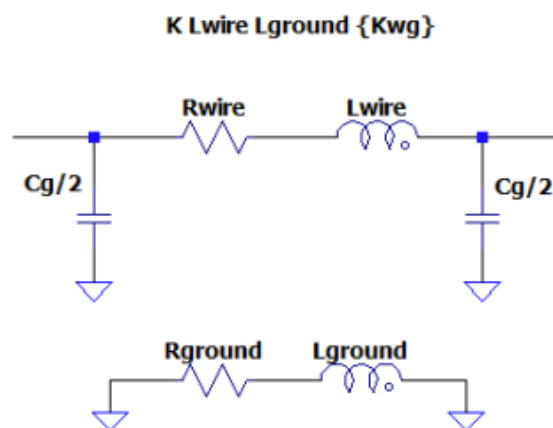
Os modelos de parâmetros concentrados abordam os componentes elétricos de maneira pontual. Assim como mostrado na Figura 17, ela é uma modelagem simplificada dos componentes discretos de um cabo (R, L, C) sem considerar as dimensões de seu comprimento. Eles simplificam a descrição do comportamento de sistemas físicos distribuídos espacialmente em uma topologia que consiste em entidades discretas que aproximam o comportamento do sistema distribuído sob certas premissas. Cada diferente configuração de cabo terá seu modelo de parâmetros concentrados representado com base nos conceitos de linhas de transmissão (modelos π) abordados por Diefenthäler (2019) e Paul (2008). Todos os modelos foram feitos no software *LTSPICE*. Os componentes que apresentam sufixo “*wire*”, “*shield*” e “*ground*” representam, respectivamente, os condutores internos ao cabo, a malha de blindagem e o plano de terra que deve ser alocado 5 cm abaixo da cablagem, como exige a norma.

Todos os modelos apresentados foram produzidos no software *LTSpice* e possuem, acima do circuito elétrico representado pelos cabos, linhas identificando os respectivos acoplamentos entre as indutâncias próprias parciais de cada conjunto de elementos (dois a dois).

3.3.1 Cabo Simples sem Blindagem

A configuração mais simples de todas abordada neste trabalho é a do cabo simples sem blindagem, como o próprio nome diz, é um cabo comum que não apresenta malha de blindagem. Seu modelo é representado pela Figura 18 feito no software *LTSpice*.

Figura 18 – Modelo do cabo simples sem blindagem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

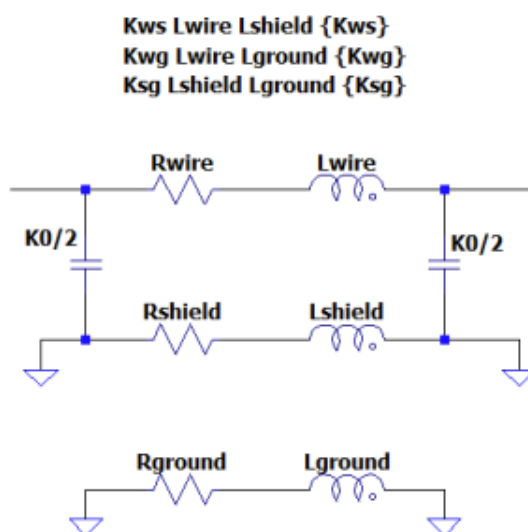
3.3.2 Cabo Simples com Blindagem

O cabo simples com blindagem é similar ao cabo coaxial, ambos podem ter seu modelo representado da mesma forma, como mostra a Figura 19.

Este modelo não apresenta capacitâncias entre os condutores e o solo, pois a capacitância entre condutor e malha de blindagem possui sua magnitude muito maior do que a primeira, tornando-a irrelevante.

Ele também não possui capacitâncias entre a malha de blindagem e o plano de terra, pois suas extremidades estão conectadas em um ponto de aterramento.

Figura 19 – Modelo do cabo simples com blindagem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

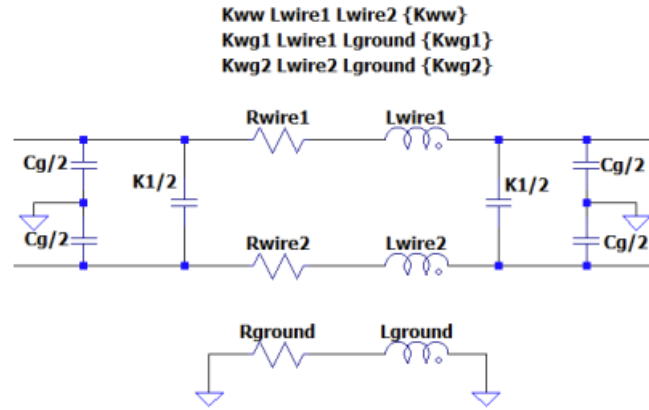
3.3.3 Cabo Duplo sem Blindagem

O modelo do cabo duplo sem blindagem é representado pela Figura 20. Os cabos duplos geralmente são trançados para evitar interferências eletromagnéticas entre eles mesmos. As tranças destes cabos não acarretarão em mudanças nos cálculos e nos modelos, uma vez que há um eixo de simetria entre eles.

3.4 MODELOS DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS

Os modelos de parâmetros concentrados (modelos π) abordados na seção anterior, são modelos que podem representar uma linha de transmissão com determinado comprimento até certas premissas. Segundo Paul (2008) os modelos π de parâmetros concentrados isolados só podem representar uma linha de transmissão se a condição representada pela equação (6) for satisfeita, onde l representa o comprimento da linha de transmissão e λ o comprimento de onda da corrente elétrica que trafega por ela. Isto significa que o comprimento do cabo deve ser no mínimo dez vezes menor que o comprimento de onda da corrente. Portanto, quanto maior a frequência utilizada, mais fora da realidade se torna o modelo π de parâmetros concentrados. Isto se deve ao fato de que o comprimento de onda começa a ter

Figura 20 – Modelo do cabo duplo sem blindagem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

dimensões comparáveis e até menores que o comprimento da linha de transmissão, sendo necessária uma análise onde um número maior de modelos π devem ser colocados em cascata, para tornar o modelo mais fiel.

Os modelos de parâmetros distribuídos em cascata são simplesmente uma quantidade determinada de modelos π agrupados em série para considerar o comprimento de uma linha de transmissão, eles são mostrados na Figura 21. O número n de modelos pode ser facilmente calculado de acordo com a equação (7) deduzida.

$$\lambda = 10l$$

$$v = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Onde v , f , L e C são respectivamente a velocidade da onda, frequência, indutância efetiva e capacitância mútua (de modo diferencial para o cabo blindado duplo). Temos que a frequência máxima que pode representar um modelo π é:

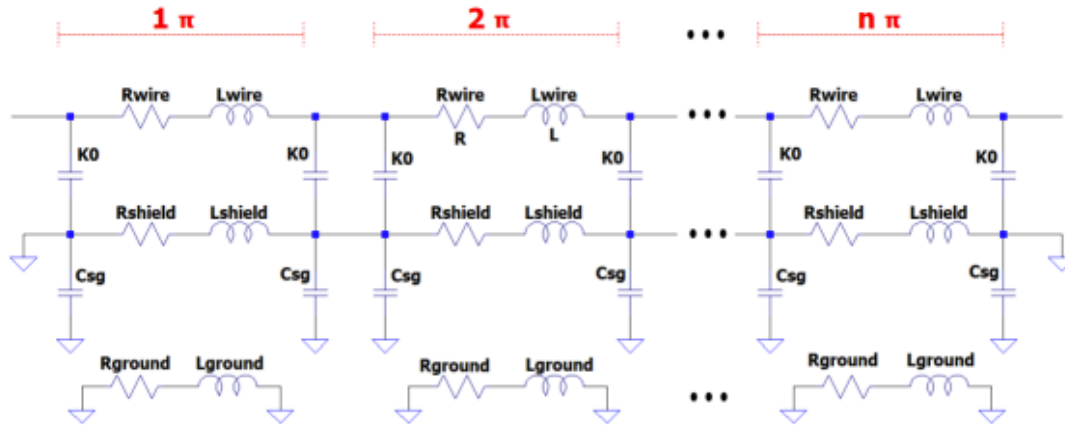
$$f_{max} = \frac{N_{pi}v}{10l}$$

Portanto o cálculo do número de modelos π é representado pela equação (7).

$$N_{pi} = 10lf\sqrt{L_e C_m} \quad (7)$$

Os modelos de parâmetros concentrados agora são agrupados em cascata, formando os parâmetros distribuídos. Uma questão importante a se ressaltar é que agora as capacitâncias entre a malha de blindagem e o plano de terra, não terão mais valores iguais à zero, uma vez que a malha de blindagem não está aterrada ao longo do comprimento do cabo (tirando as extremidades).

Figura 21 – Parâmetros distribuídos cabo simples blindado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS CONCENTRADOS

Esta seção irá abordar o cálculo dos parâmetros concentrados mostrados nos modelos da Seção 3.3. Estes cálculos serão necessários para posteriormente os modelos serem criados e inseridos em uma simulação que possa representar a realidade de modo mais próximo possível. Para estes cálculos serão utilizados algumas das propriedades que são geralmente fornecidas pelos fabricantes e estão abordadas na Seção 3.1. Estas propriedades não são suficientes para se criar um modelo de parâmetros concentrados, por este motivo os cálculos seguintes são necessários.

3.5.1 Resistências dos Condutores e da Blindagem

Como apresentado na Seção 3.2.2, as resistências do condutor e da blindagem dependem diretamente da frequência a ser utilizada, a qual por sua vez irá depender da forma de onda utilizada. As resistências AC do condutor interno e da blindagem podem ser calculadas de acordo com a equação (4), que por sua vez possui as variáveis: R_{DC} (resistência DC), A_{eff} (área efetiva) e A_{DC} (área DC). A resistência DC (R_{DC}) pode ser encontrada facilmente nos e é quase sempre fornecida pelos fabricantes. A área efetiva (A_{eff}) pode ser calculada de acordo com equação (6) tanto para o condutor quanto para a malha de blindagem. A área DC (A_{DC}), é a área completa da seção transversal de cada elemento e pode ser calculada com a equação (8) para o condutor e a equação (9) para a malha de blindagem, onde r_w , r_{se} e r_{si} são respectivamente: raio do condutor, raio externo e interno da malha de blindagem.

$$A_{DC} = \pi r_w^2 \quad (8)$$

$$A_{DC} = \pi (r_{se}^2 - r_{si}^2) \quad (9)$$

3.5.2 Indutâncias Parciais Próprias do Condutor e da Blindagem

As indutâncias parciais próprias de um condutor cilíndrico, segundo Paul (2010), Hayt e Buck (2013), são divididas em duas indutâncias: Indutância Interna (causada pela indução dos campos

internos ao condutor) e Indutância Externa (causada pela indução dos campos externos ao condutor). Portanto, segundo os autores, a Indutância Parcial Própria Total de um condutor pode ser calculada com a equação (10).

$$L = L_{INT} + L_{EXT} \quad (10)$$

Ao analisar condutor e blindagem, o segundo é um condutor cilíndrico oco, enquanto o primeiro é um condutor cilindro preenchido por material. Portanto, neste caso, a indutância externa de cada um deles pode ser calculada da mesma forma, enquanto a indutância interna deve ser feita de outro modo. Segundo Paul (2010) a indutância interna de um condutor cilíndrico preenchido e a indutância externa de um condutor cilíndrico podem ser calculadas com as Equações (11) e (13) e, segundo Capelli e Riba (2016), a indutância interna de um condutor cilíndrico oco (malha de blindagem) pode ser calculada com a equação (12). Na equação (13) a variável r pode receber os valores de r_w (raio do condutor) ou r_{se} (raio externo da blindagem) dependendo do elemento a ser analisado.

$$L_{INT} = \frac{\mu_0 l}{8\pi} \quad (11)$$

$$L_{INT} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\frac{r_{si}^4}{(r_{se}^2 - r_{si}^2)^2} \ln \left(\frac{r_{se}}{r_{si}} \right) - \frac{3r_{si}^2 - r_{se}^2}{4(r_{se}^2 - r_{si}^2)^2} \right] \quad (12)$$

$$L_{EXT} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{l}{r} + \sqrt{\left(\frac{l}{r} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l} \right)^2} + \frac{r}{l} \right] \quad (13)$$

3.5.3 Indutância Parcial Mútua entre Dois Condutores

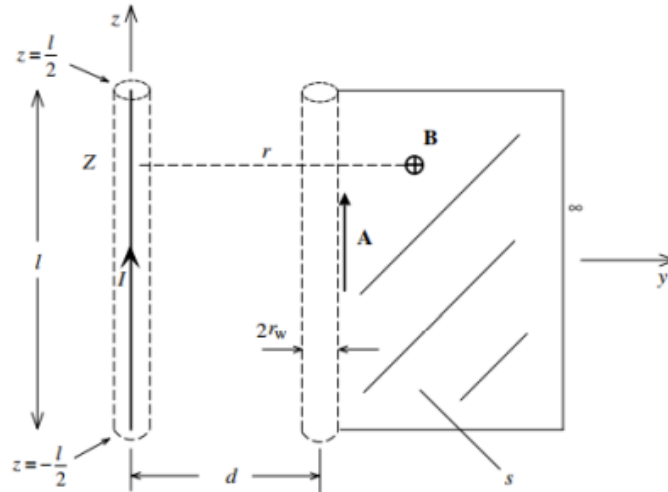
Até agora foram vistos métodos de cálculos de parâmetros concentrados genéricos, ou seja, que podem ser utilizados para qualquer configuração de cabo. A partir desta seção, serão mostrados os cálculos para os casos específicos de cabo. A Indutância Parcial Mútua entre dois condutores, como o próprio nome diz, só é aplicável à configurações de cabos que possuem dois condutores em seu interior. Esta indutância pode ser calculada pela equação (14) como diz Paul (2010), onde s é a distância entre os condutores. A Figura 22 mostra que esta indutância é causada pelos campos magnéticos exteriores aos condutores, ou seja, os campos localizados entre condutores não são considerados para o cálculo. Por este motivo, na equação (14), utiliza-se o termo “ $s + r_w$ ” nas frações mostradas. Isto se dá pelo fato de a integração ocorrer de $y = s + r_w$ até $y = \infty$.

$$M_{WW} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{l}{s + r_w} + \sqrt{\left(\frac{l}{s + r_w} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{s + r_w}{l} \right)^2} + \frac{s + r_w}{l} \right] \quad (14)$$

3.5.4 Indutância Parcial Mútua entre Condutor e Blindagem

Segundo Paul (2010), a indutância mútua entre dois condutores é causada pelo campo magnético alocado externamente aos condutores. De modo análogo, para a indutância mútua entre condutor e

Figura 22 – Indutância Parcial Mútua entre dois condutores causada por campos externos.

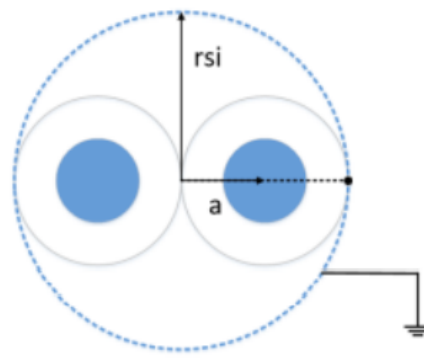


Fonte: Paul (2010).

blindagem utiliza-se o mesmo conceito, onde a blindagem é um condutor e a integração do campo magnético é feita no exterior dos condutores. Portanto a Indutância Mútua entre condutor e blindagem pode ser calculada pela equação (15) apenas para configurações de cabos duplos blindados que não possuem tranças internas, onde as variáveis a e t_s são, respectivamente, a distância do centro da blindagem ao centro do condutor analisado (como mostra a Figura 23) e a espessura da blindagem. Em cabos coaxiais, cabos simples blindados e duplos blindados que possuem tranças internas, o termo “ $a + t_s$ ” pode ser substituído por r_{se} (raio externo da blindagem). No caso de cabos duplos blindados que possuem tranças internas, isto é possível pois estas tranças apresentam um eixo de simetria, o qual está localizado no centro do conjunto inteiro.

$$M_{WS} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{l}{a + t_s} + \sqrt{\left(\frac{l}{a + t_s} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{a + t_s}{l} \right)^2} + \frac{a + t_s}{l} \right] \quad (15)$$

Figura 23 – Seção transversal de um cabo blindado duplo.

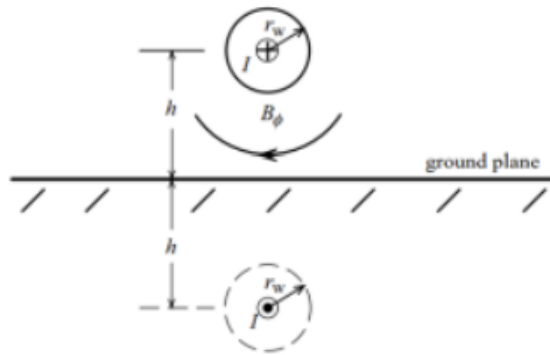


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.5 Indutâncias Parciais Mútuas entre Condutor - Plano de Terra e entre Blindagem - Plano de Terra

Segundo Paul (2010), para fazer este cálculo necessita-se recorrer ao método da imagem, que diz que para se representar um plano de terra (potencial zero) nos cálculos que envolvem campos eletromagnéticos de um condutor em uma altura h do solo, pode-se assumir uma condição equivalente colocando um condutor idêntico ao que está sendo analisado a uma distância $2h$ (o dobro da altura). Este segundo condutor alocado a uma distância $2h$, deve possuir corrente elétrica e cargas opostas ao primeiro condutor, justamente para que entre eles haja um plano onde os campos eletromagnéticos se anulam, como mostra a Figura 24. Portanto as indutâncias mútuas entre condutor e plano de terra (M_{WG}) e entre blindagem e plano de terra (M_{SG}) podem ser calculadas com a equação (14), onde $s = 2h$. Para o conjunto blindagem e plano de terra considera-se a blindagem como um condutor, portanto a mesma equação pode ser utilizada. Neste caso o termo r_w da equação (14) será r_{se} (raio externo da blindagem).

Figura 24 – Método da imagem.



Fonte: Clayton (2010).

3.5.6 Indutância Parcial Própria do Plano de Terra

Por fim calcula-se a última das indutâncias. Para a dedução deste parâmetro será necessária a utilização das indutâncias mútuas anteriores.

Considerando um o circuito mostrado na Figura 25, onde L_{wire} e L_{ground} são respectivamente as indutâncias parciais próprias de um cabo e do plano de terra. O condutor está alocado a uma distância h do plano. Segundo Edminister (1983), a Lei de *Kirchoff* para o elemento plano de terra mostrado na Figura 25, pode ser representada pela equação abaixo:

$$L_{GROUND} \frac{di_2}{dt} - M_{WG} \frac{di_1}{dt} = 0$$

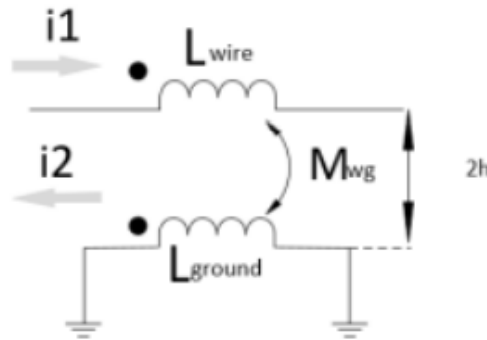
Como a corrente que passa pelo condutor é a mesma corrente que passa pelo plano de terra (corrente de retorno), $i_1 = i_2$, então a indutância parcial própria do solo pode ser calculada com a equação (16) para um condutor isolado alocado acima do solo ou com a equação (17) para uma configuração de

cabo que possui vários elementos (como o cabo blindado duplo), onde a indutância do plano de terra será a soma de todas as indutâncias mútuas relativas à cada um dos elementos e o plano de terra.

$$L_{GROUND} = M_{WG} \quad (16)$$

$$L_{GROUND} = M_{X1G} + M_{X2G} + \dots + M_{XnG} \quad (17)$$

Figura 25 – Modelo de circuito equivalente de um condutor simples acima do solo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.7 Fator de Acoplamento

Um dos parâmetros de entrada do software *LTSpice*, que será utilizado para fazer as simulações, é o fator de acoplamento k de cada um dos conjuntos de indutâncias acopladas. Segundo Edminister (1983) este fator pode ser calculado com a equação (18).

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (18)$$

3.5.8 Capacitância entre Dois Condutores sem Blindagem

Como diz Paul (2008) a capacitância entre dois condutores sem blindagem pode ser calculada com a equação (19). Como o próprio nome diz, esta equação só pode ser utilizada em cabos que não possuem blindagem, uma vez que a mesma irá alterar a composição interna das cargas dos condutores internos, modificando assim o valor real da capacitância entre condutores.

$$K1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\cosh^{-1}\left(\frac{s}{fr_w}\right)} \quad (19)$$

3.5.9 Capacitância entre Condutor e Blindagem - Cabo Simples

A capacitância entre condutor e blindagem para o cabo simples é calculada com um método diferente do cabo duplo. Este parâmetro pode ser calculado com a equação (20), assim como diz Paul

(2008).

$$K0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_{si}}{fr_w}\right)} \quad (20)$$

3.5.10 Capacitâncias entre Condutor - Plano de Terra e entre Blindagem - Plano de Terra

Segundo Paul (2008) as capacitâncias entre condutores cilíndricos e o plano de terra são calculadas segundo o método da imagem que foi citado na Seção 3.5.5.

Este cálculo é feito utilizando a equação (21) onde f é o fator de encalhe, h a altura em relação ao solo e r_w o raio do condutor (no caso da blindagem r_{se}).

$$C_g \text{ ou } C_{sg} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\cosh^{-1}\left(\frac{h}{fr_w}\right)} \quad (21)$$

3.5.11 Capacitâncias Cabo Duplo Blindado

Como já dito anteriormente, o cabo blindado duplo é a configuração mais complexa das abordadas por este trabalho, portanto ele terá uma seção exclusiva e dedicada para o cálculo de suas capacitâncias internas.

Como mostra a Figura 26, o cabo blindado duplo possui dois tipos de capacitâncias: entre condutores $K1$ e entre condutor e blindagem $K0$. Os cálculos destes parâmetros são abordados por Zhang (1994) e calculados de acordo com a matriz dos respectivos coeficientes de potencial α_{ij} e coeficiente de indução eletrostática β_{ij} de cada conjunto.

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \left[\frac{r_{si}^2 - a^2}{fr_w r_{si}} \right] \quad (22)$$

$$\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln [1, 25] \quad (23)$$

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{11}}{\Delta} \quad (24)$$

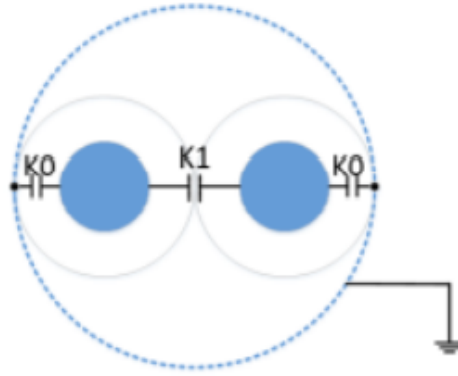
$$\beta_{12} = -\frac{\alpha_{12}}{\Delta} \quad (25)$$

Portanto as capacitâncias $K1$ e $K0$ podem ser calculadas, respectivamente, com as Equações (26) e (27).

$$K1 = -\beta_{12} \quad (26)$$

$$K0 = \beta_{11} + \beta_{12} \quad (27)$$

Figura 26 – Capacitâncias cabo duplo blindado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

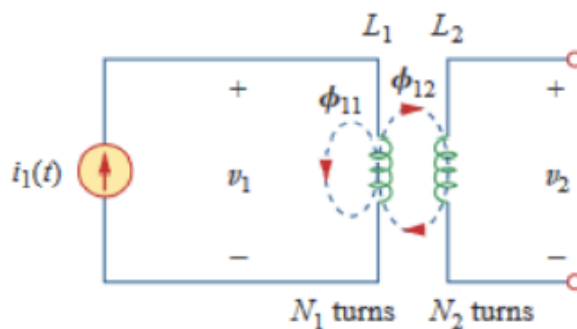
3.6 MODELO DO TRANSFORMADOR DE INJEÇÃO

A criação do modelo do transformador de injeção que é responsável por injetar as formas de onda na cablagem também é necessária. Este transformador foi abordado na Seção 2.3.6 e segue um conceito de indução simples abordado em Alexander e Sadiku (2009) que é mostrado na Figura 27.

O intuito aqui não é modelar perfeitamente o transformador, mas sim os seus efeitos na cablagem. Portanto o modelo que será utilizado para as simulações é mostrado na Figura 28, o qual possuirá um fator de acoplamento 1 para que a mesma forma de onda criada no primário, seja induzida no secundário.

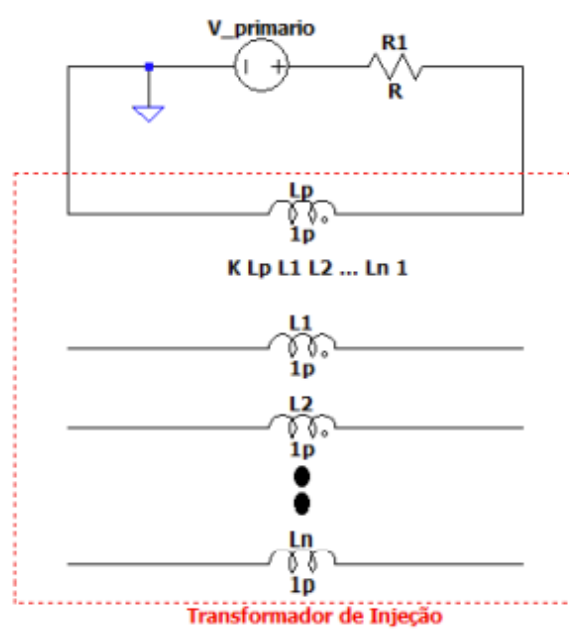
As indutâncias $L1$, $L2$ e L_n representam o secundário do transformador de injeção, ou seja, os cabos onde os transientes serão induzidos. Elas possuirão um valor baixo de $1pH$, para que não haja efeitos de indutâncias próprias na indução das formas de onda transientes.

Figura 27 – Indução eletromagnética em bobinas.



Fonte: Alexander e Sadiku (2009).

Figura 28 – Modelo do transformador de injeção.



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

4 APLICAÇÃO E ANÁLISE EM UM SISTEMA AERONÁUTICO REAL

Neste capítulo será feita uma abordagem prática em um sistema aeronáutico real fornecido por uma fabricante de aeronaves, composto por um circuito de um equipamento que se comunica com um sensor através de um cabo coaxial. O diagrama elétrico real do sistema cedido pela empresa é mostrado na Figura 29, por questões de propriedade intelectual alguns dados foram omitidos como: as funções do equipamento e do sensor, os números de identificação dos condutores e dos conectores utilizados. Portanto todas as partes presentes no sistema possuirão nomes genéricos.

Os modelos do equipamento sob teste e o de suporte, que simula o sinal do sensor, também foram fornecidos e serão representados como uma caixa preta nas simulações localizadas nas próximas seções.

Abaixo estão listadas as informações sobre o sistema cedido pela empresa, necessárias para a realização dos testes.

- Cabo XX1: cabo coaxial com 2,042m de comprimento.
- Cabo XX2: cabo de aterramento com 0,10m de comprimento.
- Conector A: responsável pela conexão do cabo no Equipamento sob Teste.
- Conector B: responsável pela conexão dos cabos no Sensor A.
- Sensor A: responsável pela instrumentação de um sistema da aeronave.
- A parte da fuselagem mais próxima ao condutor não é fechada, possuindo aberturas estruturais que são a maior fonte de indução eletromagnética.
- O sistema está localizado em um ambiente não protegido contra induções eletromagnéticas.

O número de identificação do cabo coaxial não pôde ser divulgado para também omitir as suas dimensões internas. Por este motivo a empresa cedente se dispôs a encontrar um condutor similar presente em um catálogo online localizado em Belden (2021), que também tem aplicações aeronáuticas. Todas as dimensões deste cabo estão explicitadas na Tabela 9.

Figura 29 – Configuração do circuito cedido pela empresa de aeronáutica.



Fonte: Empresa cedente.

Tabela 9 – Permissividade Relativa de alguns materiais mais comuns utilizados em cabos elétricos.

Parâmetro	Variável	Valor	Unidade
Comprimento	l	2,042	m
Fator de Encalhe	f	0,970	—
Diâmetro do Condutor	d_w	0,001016	m
Diâmetro do Isolação	d_i	0,001524	m
Diâmetro do Jaqueta	d_j	0,002514	m
Espessura do Jaqueta	d_j	0,000254	m
Diâmetro Externo da Malha	d_{se}	0,002007	m
Diâmetro Interno da Malha	d_{si}	0,001524	m
Constante Dielétrica	ε_r	2,02	—
Permeabilidade Magnética	μ_r	1	—
Resistência DC do Condutor	R_{DCw}	0,029	Ω/m
Resistência DC da Malha	R_{DCs}	0,039	Ω/m
Capacitância Condutor - Malha	$K0$	469,66	pF
Resistividade do Condutor	ρ	$1,7 \times 10^{-8}$	Ωm

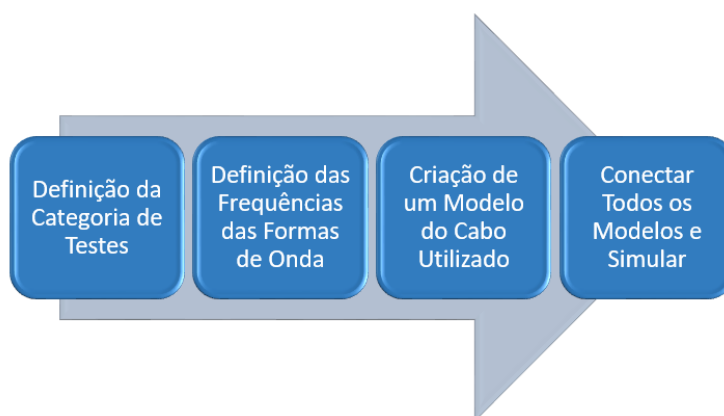
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da empresa cedente.

4.1 DEFINIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA A SIMULAÇÃO

Na Seção 1 foi descrito que um dos objetivos deste trabalho é criar um método robusto a ser seguido para viabilizar as simulações dos testes de cablagem. Portanto nesta seção serão definidos todos os procedimentos necessários para se chegar em um resultado final, que é uma simulação confiável onde se possa coletar dados para a certificação do equipamento sob teste.

O processo a ser seguido é mostrado na Figura 30 e cada uma de suas partes são descritas abaixo.

Figura 30 – Procedimentos para simulação dos testes de cablagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Definição da Categoria de Testes: Aqui será definida a categoria do teste a ser realizado, abordada na Seção 2.4. Este é o primeiro passo, o qual é necessário para a definição das formas de onda que serão injetadas no circuito. A categoria depende das características físicas dos cabos utilizados e da configuração da fuselagem da aeronave que está próxima ao circuito.

Definição das Frequências das Formas de Onda: Uma vez definida a categoria do teste, as formas de onda também serão consequentemente obtidas. Nesta parte do processo serão feitas as

Transformadas de Fourier de cada uma delas explicitando a magnitude de suas frequências, para posteriormente utilizá-las nos cálculos de criação dos modelos dos cabos utilizados.

Criação de um Modelo do Cabo Utilizado: Depois de definir as frequências das formas de onda, seus valores serão colocados nos cálculos abordados no Capítulo 3 junto às demais variáveis necessárias para se criar um modelo do condutor utilizado no sistema.

Conectar Todos os Modelos e Simular: Nesta parte serão conectados todos os modelos que foram disponibilizados pela empresa cedente, junto aos modelos do condutor criado no passo anterior e do transformador de injeção abordado na Seção 3.6. Aqui a simulação final no software *LTSpice* já estará criada e pronta para rodar e analisar os efeitos das descargas elétricas.

Depois de definidas as partes do procedimento para a simulação, o próximo passo é executá-las, que é o que será feito nas próximas seções.

4.2 DEFINIÇÃO DA CATEGORIA DE TESTES

Definir uma categoria é o primeiro passo para a realização dos testes, não só no âmbito da simulação mas também no laboratório real. Como mostrado na Seção 2.4, a definição da categoria de um teste irá resultar no nível do teste e no conjunto de formas de onda que deve ser utilizado. A categoria depende do local onde o sistema está localizado e da configuração do cabo utilizado.

Analisando primeiramente o local, a norma DO160G diz que há diferentes mecanismos que podem induzir transientes dentro da aeronave causados por descargas elétricas. Estes são divididos em duas categorias: acoplamento por aberturas ou acoplamento resistivo. O acoplamento por aberturas é causado quando a fiação está inserida próxima a pontos da fuselagem que contém aberturas na estrutura, já o acoplamento resistivo é causado quando a mesma está inserida em um ponto da fuselagem onde não há aberturas. Ainda analisando o local, deve-se saber também se este sistema está alocado em um ambiente protegido ou vulnerável em relação à indução eletromagnética. Esta análise é necessária pois os diferentes acoplamentos irão resultar em transientes distintos e a vulnerabilidade do ambiente pode causar em uma maior magnitude dos campos eletromagnéticos induzidos pelas descargas.

Analisando agora a configuração do cabo utilizado, a norma DO160G diz que há dois diferentes tipos a serem considerados para se definir uma categoria de testes: cabos com blindagem ou cabos sem blindagem.

Ao reunir todas as informações descritas nesta seção com as mostradas no começo do Capítulo 4, onde foram apresentadas as características do sistema cedido pela empresa, conclui-se que o condutor utilizado possui malha de blindagem e o sistema está localizado em um ambiente que não possui proteção eletromagnética e próximo a um ponto da fuselagem que possui aberturas estruturais.

Portanto, seguindo a Seção 2.4, as categorias que podem ser utilizadas neste caso são as listadas abaixo, onde as letras representam o conjunto das formas de onda e os números o nível de severidade do teste. A Tabela 10 mostra em detalhes as informações de cada conjunto.

- A4E4L4
- A4J4L4

- A5E5L5
- A5J5L5

Tabela 10 – Conjuntos de formas de onda e seus diferentes testes e repetições

Conjunto de Formas de Onda	Teste	Repetição	Formas de Onda
A	Injeção por pinos	Pulso Único	1, 3 e 4
E	cablagem	Pulso Único	1, 3
J	cablagem	Pulsos Único e Múltiplos	1, 3
L	cablagem	Rajadas Múltiplas	3

Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

Note que os dois primeiros termos de cada categoria lista acima, representam os testes de injeção por pinos, o qual não é abordado neste trabalho, restando apenas os 4 últimos termos de cada uma.

- E4L4
- J4L4
- E5L5
- J5L5

As configurações dos testes de cablagem de pulsos múltiplos e rajadas múltiplas, são feitas com o intuito de verificar as respostas térmicas nos circuitos de interface dos equipamentos eletrônicos sob teste, devido à repetição das formas de onda injetadas. Como a simulação do software *LTSpice* não possui este recurso, apenas a configuração de pulso único será utilizada. Portanto, dos itens listados anteriormente sobraram apenas as categorias "E4" e "E5", variando apenas o nível de severidade. Para criar uma simulação mais conservadora, será utilizado o nível 5.

Portanto as formas de onda que serão utilizadas relativas à categoria "E5" são: as formas 1 e 3 com níveis 1600A e 3200V, respectivamente.

4.3 DEFINIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DAS FORMAS DE ONDA

Após definida uma categoria de testes e consequentemente as formas de onda que devem ser utilizadas, elas devem ser plotadas no software *LTSpice* para extrair suas frequências com as suas respectivas Transformadas de Fourier. Mas antes é necessária uma validação prévia, para verificar se o que está sendo plotado no software é realmente a forma que está na norma DO160G. Esta ação é muito importante, uma vez que depende apenas do usuário deixar a simulação o mais próximo da realidade possível, tornando-a confiável.

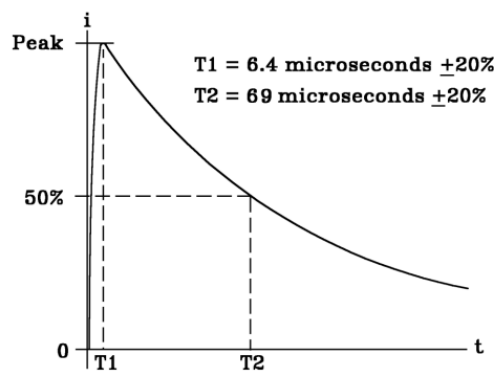
4.3.1 Plotando e validando as formas de onda

A Figura 31 mostra a forma de onda número 1 extraída da norma DO160G, enquanto a Figura 32 mostra a mesma forma, porém plotada *LTSpice*. Primeiramente deve-se comparar os valores plotados no software com os disponibilizados pela norma, para que se possa validar e confirmar que a verdadeira forma de onda está sendo utilizada na simulação.

Analizando a Figura 31 dá para notar que os valores $T1 = 6,4\mu s$ e $T2 = 69\mu s$ se encontram, respectivamente, no valor de pico e na sua metade (50% do valor de pico). Ao analisar os cursores 1 e 2 da Figura 32, pode-se notar que a mesma também atende esta especificação. Como ela é um gráfico de tensão por tempo (V versus T), os cursores 1 e 2 apresentam, respectivamente, $V = 1,002V$, $T = 6,4\mu s$ e $V = 500,39mV$, $T = 68,80\mu s$. Portanto a forma de onda plotada no software é a mesma que a da norma.

Note que há uma baixa porcentagem de erro nestes valores, isto acontece devido ao número de pontos que o software plota na imagem, fazendo a forma de onda não ser perfeitamente contínua. Existe a possibilidade de plotar um número maior de pontos, porém isso demanda um custo computacional muito maior. Portanto serão analisadas apenas aproximações destas medidas.

Figura 31 – Forma de onda número 1 extraída da norma DO160G.



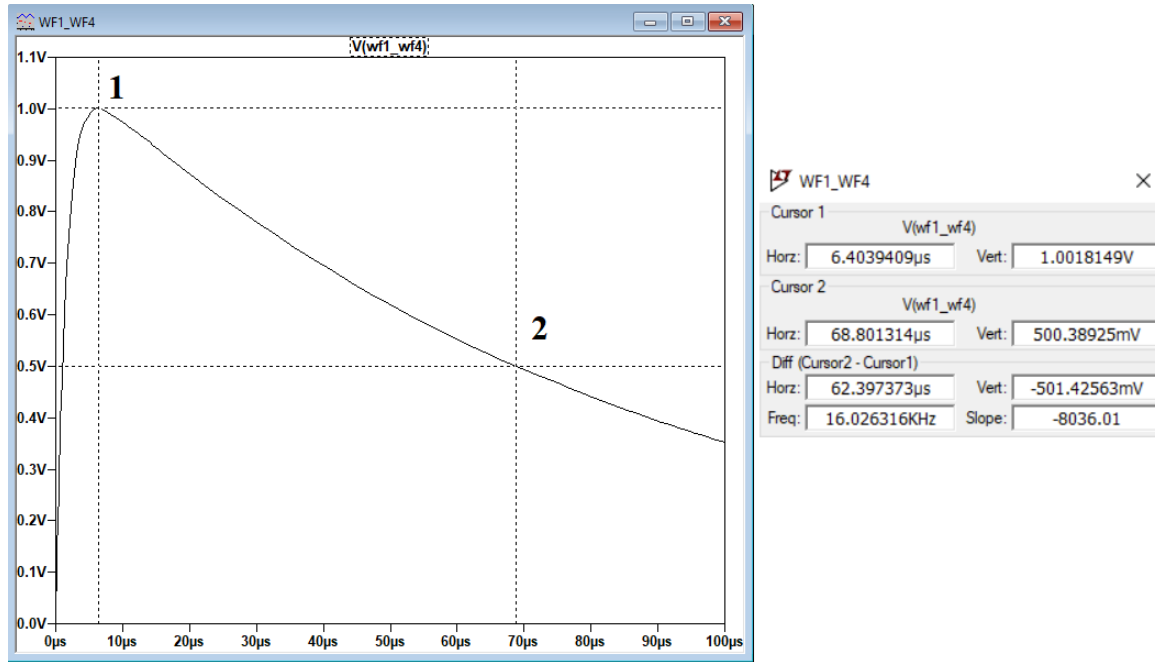
Fonte: RTCA (2010).

O mesmo procedimento que foi feito anteriormente, agora será realizado para a forma de onda 3. A Figura 33 mostra ela extraída direto da norma DO160G. Segundo a norma, a forma de onda número 3 pode possuir diversas configurações diferentes, onde sua frequência (f_{req}) varia de 1 a 10 MHz e sua porcentagem de decaimento (P_D) de 25 a 75%. Diante deste fato apenas os limites serão simulados, como listado abaixo, criando agora 4 variantes para a forma de onda número 3.

A porcentagem de decaimento P_D indica a parcela que o quinto pico da onda possui em relação ao maior pico.

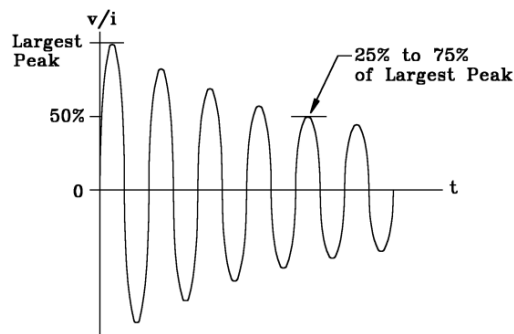
- $f_{req} = 1 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$
- $f_{req} = 1 \text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$
- $f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$
- $f_{req} = 10 \text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$

Figura 32 – Forma de onda número 1 plotada no software *LTSpice*.



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

Figura 33 – Forma de onda número 3 extraída da norma DO160G.



Fonte: RTCA (2010).

A Figura 34 mostra duas variantes da forma de onda número 3 com $f_{req} = 1$ MHz, a de cima com $P_D = 25\%$ e a de baixo com $P_D = 75\%$. Para validá-las, os valores de amplitude dos pontos 1 e 2 de cada uma foram explicitados na mesma figura.

Para a variante localizada na parte de cima da Figura 34, os valores de amplitude do maior e do quinto pico são, respectivamente: 884,28 mV e 217,31 mV. Portanto:

$$P_D = \frac{217,31}{884,28} = 0,2457 = 24,57\%$$

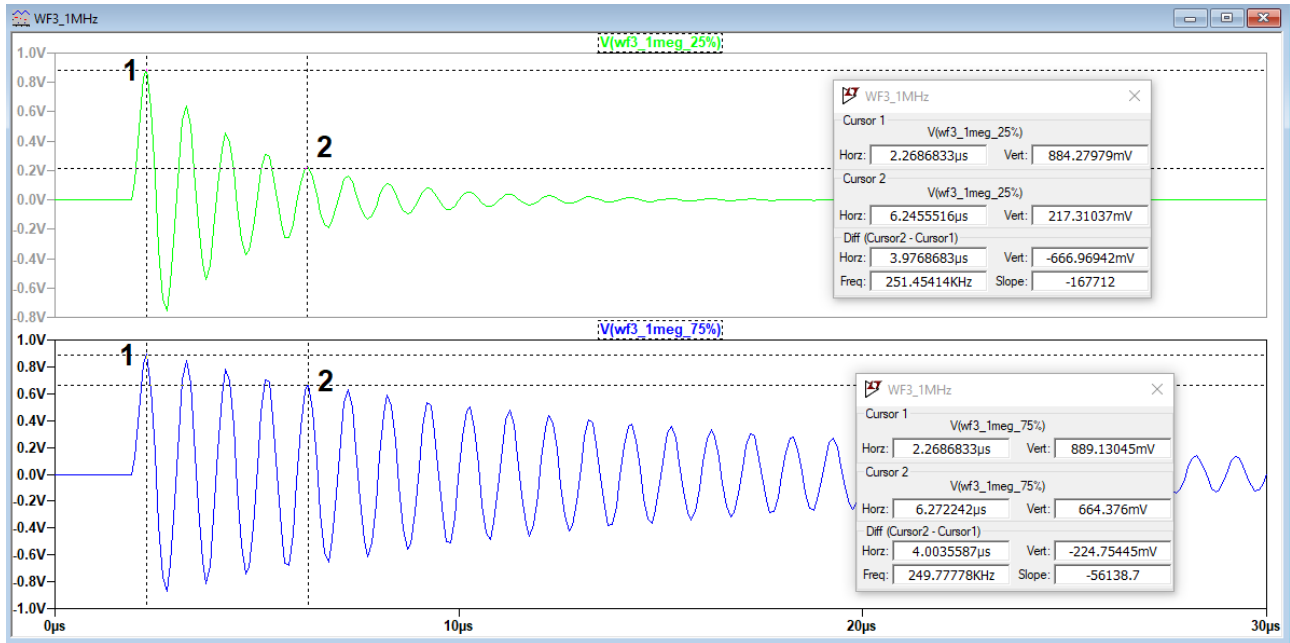
Para a variante localizada na parte de baixo da Figura 34, os valores de amplitude do maior e do quinto pico são, respectivamente: 889,13 mV e 664,38 mV. Portanto:

$$P_D = \frac{664,38}{889,13} = 0,7472 = 74,72\%$$

Estes valores não chegaram a exatos 25% e 75% devido à limitações na medida do cursor do

software *LTSpice*, porém mesmo com essas pequenas variações, as formas de onda podem ser validadas.

Figura 34 – Formas de onda número 3: $f_{req} = 1 \text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$ e 75% plotada no *LTSpice*



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

A Figura 35 mostra duas variantes da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10 \text{ MHz}$, a de cima com $P_D = 25\%$ e a de baixo com $P_D = 75\%$. Para validá-las, os valores de amplitude dos pontos 1 e 2 de cada uma foram explicitados na mesma figura.

Para a variante localizada na parte de cima da Figura 35, os valores de amplitude do maior e do quinto pico são, respectivamente: 877,20 mV e 218,39 mV. Portanto:

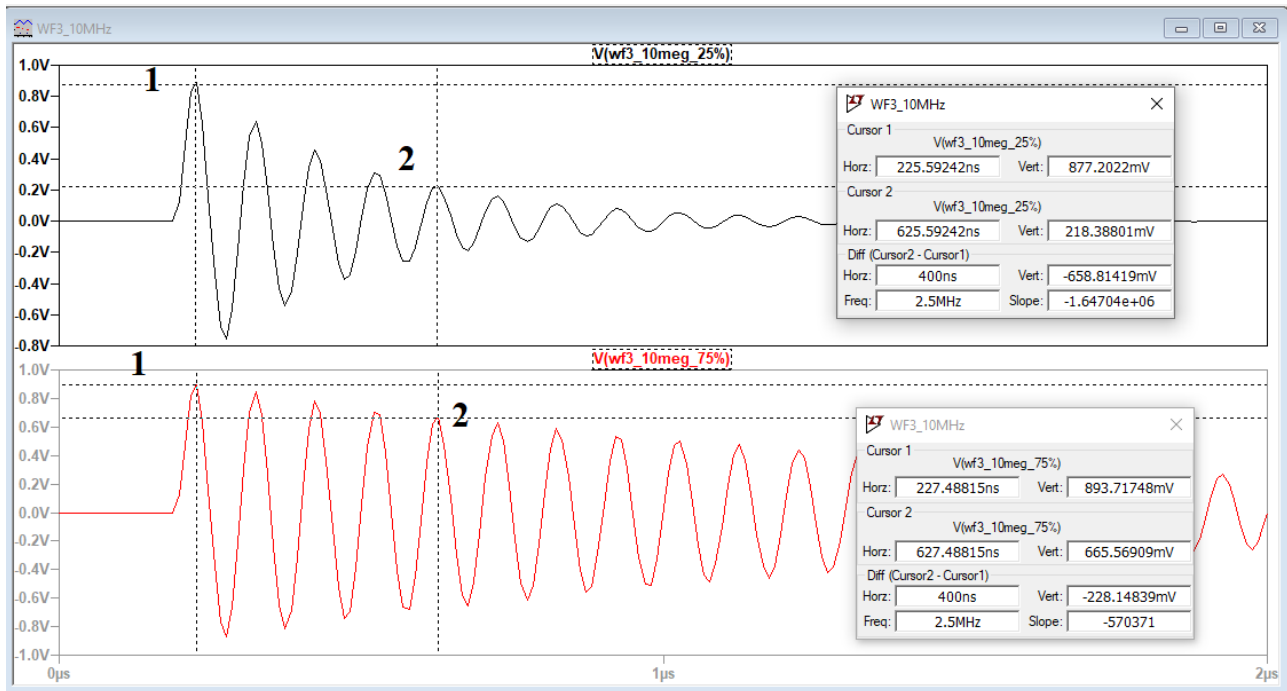
$$P_D = \frac{218,39}{877,20} = 0,249 = 24,9\%$$

Para a variante localizada na parte de baixo da Figura 35, os valores de amplitude do maior e do quinto pico são, respectivamente: 877,20 mV e 218,39 mV. Portanto:

$$P_D = \frac{665,57}{893,72} = 0,7447 = 74,47\%$$

Estes valores não chegaram a exatos 25% e 75% devido à limitações na medida do cursor do software *LTSpice*, porém mesmo com essas pequenas variações, as formas de onda podem ser validadas.

Figura 35 – Formas de onda número 3: $f_{req} = 10\text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$ e 75% plotada no *LTSpice*



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

4.3.2 Extraíndo as frequências das formas de onda

Para extrair as frequências das formas de onda plotadas na Seção 4.3.1, será utilizado um recurso do software *LTSpice* que permite plotar a Transformada Rápida de Fourier.

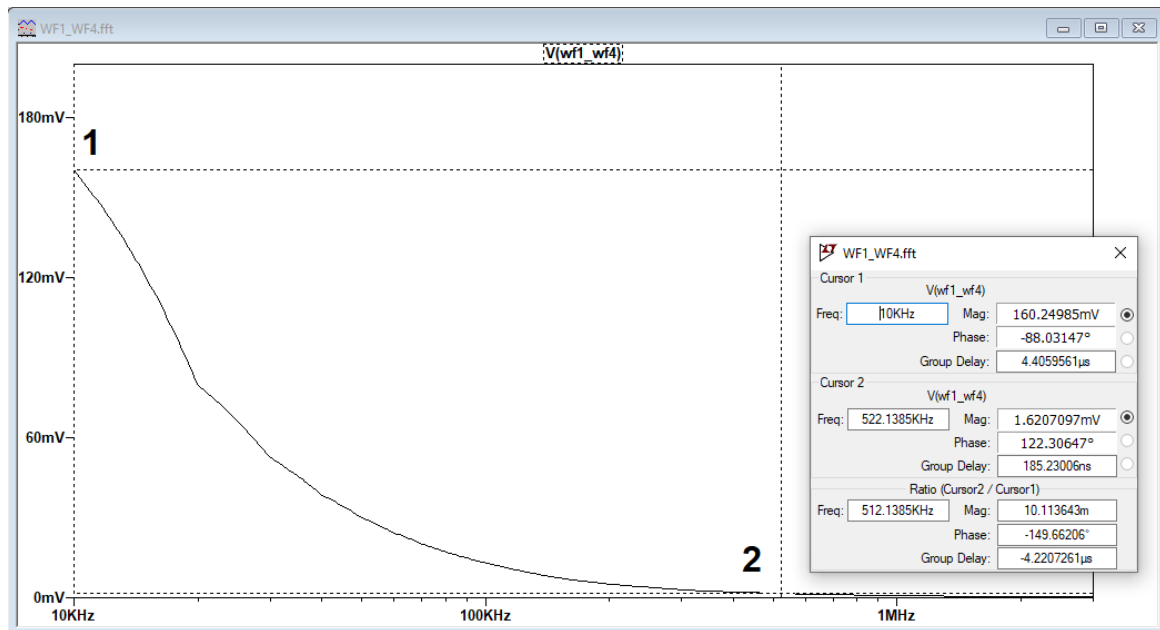
Estas frequências são coletadas com o intuito de colocá-las nos cálculos dos parâmetros concentrados e distribuídos que serão aplicados na próxima seção e que foram abordados no Capítulo 3. Como as formas de onda abordadas pela norma são transientes, ou seja, possuem diversas componentes com diferentes frequências, há a necessidade de escolher um valor específico. Como visto na Seção 3.4, o número de circuitos π (N_{pi}) para se criar o modelo de parâmetros distribuídos é diretamente proporcional a frequência utilizada. Para representar a realidade, o ideal seria tender o número de circuitos (N_{pi}) ao infinito. Como isto não é possível, será utilizado um número limite que atenda a esta aplicação sem interferir nos resultados. Existem 5 diferentes variantes de forma de onda com diversas frequências, todas serão analisadas uma a uma e a componente que possui o maior valor de frequência será utilizada.

A Figura 36 ilustra a Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 1 plotada no software *LTSpice*. Quando a frequência aumenta a amplitude das componentes começa a tender para zero. Para encontrar a componente que possui a maior frequência, será utilizado uma razão máxima de 1% da componente que possui maior amplitude nos gráficos, ou seja, a componente de maior frequência a ser considerada para cada forma de onda, deverá possuir no máximo 1% da amplitude da que possui maior magnitude.

Como mostrado na Figura 36, a razão das magnitudes do cursor 1 e 2 (cursor 2 dividido pelo cursor 1), é aproximadamente 10m que resulta em 1%. Portanto o cursor 2 possui a componente de frequência

mínima a ser considerada da forma de onda número 1, que tem seu valor aproximado de 522 kHz.

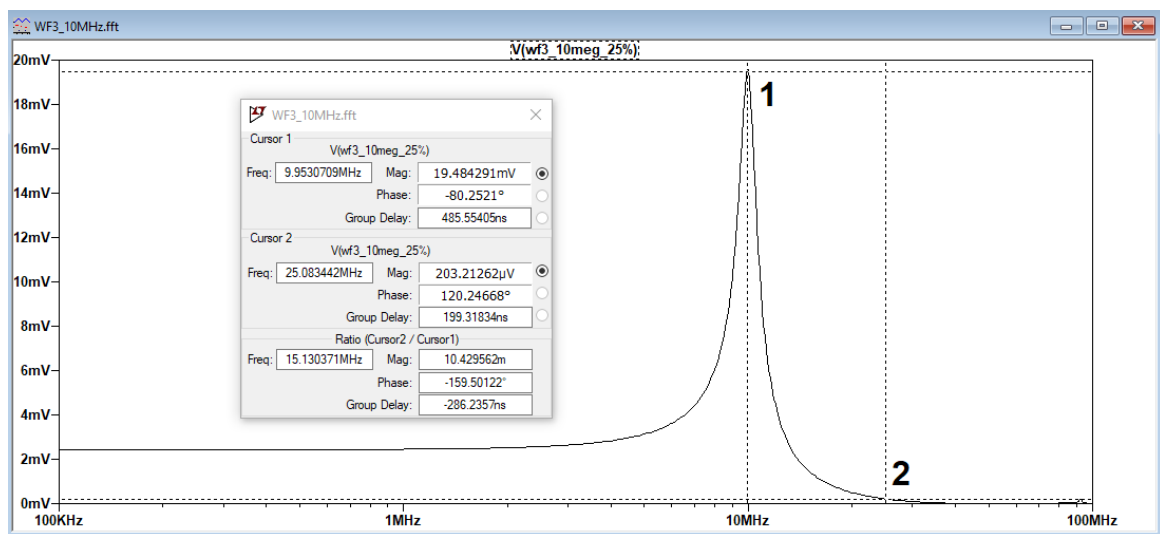
Figura 36 – Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 1.



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

A Figura 37 ilustra a Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 25\%$. Note que ela possui a componente de maior amplitude quando sua frequência é igual a $f_{req} = 10$ MHz, como era de se esperar. A figura mostra que o cursor 2 está alocado na componente que possui aproximadamente 1% da magnitude da de maior amplitude, que tem sua frequência aproximada de $f_{req} = 25,00$ MHz.

Figura 37 – Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 25\%$.

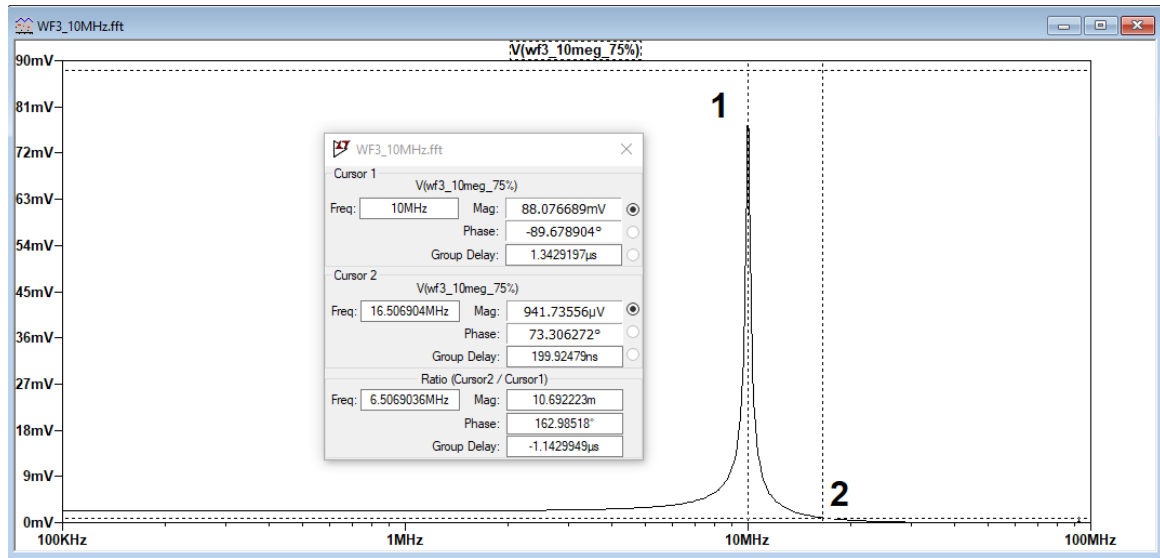


Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

Por fim, a Figura 38 ilustra a Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 75\%$. Note que ela também possui a componente de maior amplitude quando

sua frequência é igual a $f_{req} = 10$ MHz, assim como era de se esperar. A figura mostra que o cursor 2 está alocado na componente que possui aproximadamente 1% da magnitude da de maior amplitude, que tem sua frequência aproximada de $f_{req} = 16,50$ MHz.

Figura 38 – Transformada Rápida de Fourier da forma de onda número 3 com $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 75\%$



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

Note que as formas de onda número 3 que possuem $f_{req} = 1$ MHz não foram abordadas nesta seção. Como elas são variantes de uma mesma forma inicial com frequências e porcentagens de decaimento diferentes, possuindo frequências menores que as de $f_{req} = 10$ MHz, não é necessária a análise de suas Transformadas Rápidas de Fourier, uma vez que é nítido que elas possuem um valor inferior.

Reunindo os valores de frequência mínima que devem ser considerados nos cálculos, obtidos para cada forma de onda e mostrados na Tabela 11, chega-se a conclusão de que a forma que possui maior frequência entre todas as outras, é a número 3 com $f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 25\%$, num valor de frequência de aproximadamente $f_{req} = 25$ MHz. Como dito anteriormente, este é um valor mínimo a ser considerado para calcular o número de circuitos π do modelo de parâmetros distribuídos. Quanto maior este número, melhor irá ser a representação da realidade. Portanto um coeficiente de segurança de 2 MHz será adicionado no valor final, que será $f_{req} = 27$ MHz.

Tabela 11 – Formas de onda e seus limites superiores de frequência

Formas de Onda	Limite Superior de Frequência
Número 1	522kHz
Número 3 ($f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 25\%$)	25 MHz
Número 3 ($f_{req} = 10$ MHz e $P_D = 75\%$)	16,50 MHz

Fonte: Elaborada pelo autor.

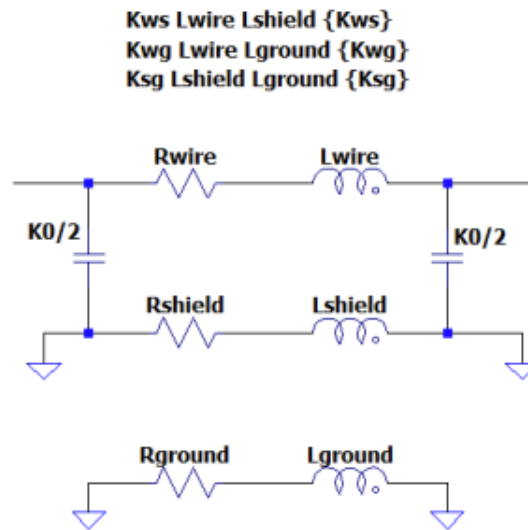
4.4 CRIAÇÃO DO MODELO DO CABO UTILIZADO

Depois de definido o valor de frequência que será utilizado nos cálculos, o próximo passo é criar o modelo do cabo que foi cedido pela empresa do ramo aeronáutico. Para isso todos os cálculos

de parâmetros concentrados e distribuídos que foram abordados no Capítulo 3 devem ser realizados. Todos estes cálculos serão feitos com base nos dados fornecidos na Tabela 9, do valor de frequência obtido na Seção 4.3 (27 MHz) e na distância entre a cablagem e o plano de terra fornecida pela norma DO160G (5 cm).

O modelo do cabo coaxial é mostrado novamente na Figura 39 para servir de auxílio, explicitando os componentes a serem calculados.

Figura 39 – Modelo do cabo coaxial



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

4.4.1 Calculando todos os parâmetros

Resistência total do condutor considerando o Efeito Pelicular (R_{wire}):

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1,7 \times 10^{-8}}{\pi \times (27 \times 10^6) \times (1) \times (1,256 \times 10^{-6})}} = 0,00001262m$$

$$\delta'_i = 0,00001262 \left[1 - \exp\left(-\frac{0,000508}{0,00001262}\right) \right] = 0,00001262m$$

$$A_{eff} = \pi(2 \times 0,000508 \times 0,00001262 - 0,00001262^2) = 3,981 \times 10^{-8}m^2$$

$$A_{DC} = \pi \times 0,000508^2 = 8,107 \times 10^{-7}m^2$$

Portanto:

$$R_{wire} = R_{AC} = \frac{0,029 \times 8,107 \times 10^{-7} \times 2,042}{3,981 \times 10^{-8}} = 1,206\Omega$$

Resistência total da malha de blindagem considerando o Efeito Pelicular (R_{shield}):

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1,7 \times 10^{-8}}{\pi \times (27 \times 10^6) \times (1) \times (1,256 \times 10^{-6})}} = 0,00001262m$$

$$\delta'_i = 0,00001262 \left[1 - \exp \left(-\frac{0,001003}{0,00001262} \right) \right] = 0,00001262m$$

$$A_{eff} = \pi(2 \times 0,001003 \times 0,00001262 - 0,00001262^2) = 7,911 \times 10^{-8}m^2$$

$$A_{DC} = \pi(0,001003^2 - 0,000762^2) = 1,338 \times 10^{-6}m^2$$

Portanto:

$$R_{shield} = R_{AC} = \frac{0,039 \times 1,338 \times 10^{-6} \times 2,042}{7,911 \times 10^{-8}} = 1,347\Omega$$

Indutância Parcial Própria do Condutor (L_{wire}):

$$L_{INT} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{8\pi} = 1,021 \times 10^{-7}H$$

$$L_{EXT} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2,042}{0,000508} + \sqrt{\left(\frac{2,042}{0,000508} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{0,000508}{2,042} \right)^2} + \frac{0,000508}{2,042} \right] = 3,264 \times 10^{-6}H$$

Portanto:

$$L_{wire} = 1,021 \times 10^{-7} + 3,264 \times 10^{-6} = 3,366 \times 10^{-6}H$$

Indutância Parcial Própria da Malha de Blindagem (L_{shield}):

$$L_{INT} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\frac{0,000762^4}{(0,001003^2 - 0,000762^2)^2} \ln \left(\frac{0,001003}{0,000762} \right) - \frac{3 \times 0,000762^2 - 0,001003^2}{4(0,001003^2 - 0,000762^2)^2} \right] = 3,251 \times 10^{-8}H$$

$$L_{EXT} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2,042}{0,001003} + \sqrt{\left(\frac{2,042}{0,001003} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{0,001003}{2,042} \right)^2} + \frac{0,001003}{2,042} \right] = 2,986 \times 10^{-6}H$$

Portanto:

$$L_{shield} = 3,251 \times 10^{-8} + 2,986 \times 10^{-6} = 3,019 \times 10^{-6} H$$

Indutância Parcial Mútua entre condutor e malha de blindagem (M_{WS})

$$M_{WS} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2,042}{0,001003} + \sqrt{\left(\frac{2,042}{0,001003} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{0,001003}{2,042} \right)^2} + \frac{0,001003}{2,042} \right] = 2,986 \times 10^{-6} H$$

Indutância Parcial Mútua entre condutor e plano de terra (M_{WG})

$$M_{WG} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2,042}{2 \times 0,05 + 0,000508} + \sqrt{\left(\frac{2,042}{2 \times 0,05 + 0,000508} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{2 \times 0,05 + 0,000508}{2,042} \right)^2} + \frac{2 \times 0,05 + 0,000508}{2,042} \right] = 1,124 \times 10^{-6} H$$

Indutância Parcial Mútua entre malha de blindagem e plano de terra (M_{SG})

$$M_{SG} = \frac{1,256 \times 10^{-6} \times 2,042}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2,042}{2 \times 0,05 + 0,001003} + \sqrt{\left(\frac{2,042}{2 \times 0,05 + 0,001003} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{2 \times 0,05 + 0,001003}{2,042} \right)^2} + \frac{2 \times 0,05 + 0,001003}{2,042} \right] = 1,122 \times 10^{-6} H$$

Indutância Parcial Própria do Plano de Terra (L_{ground}):

$$L_{ground} = 1,124 \times 10^{-6} + 1,122 \times 10^{-6} = 2,247 \times 10^{-6} H$$

Fator de acoplamento entre condutor e malha de blindagem (k_{WS}):

$$k_{WS} = \frac{2,986 \times 10^{-6}}{\sqrt{(3,366 \times 10^{-6}) \times (3,019 \times 10^{-6})}} = 0,936$$

Fator de acoplamento entre condutor e plano de terra (k_{WG}):

$$k_{WG} = \frac{1,124 \times 10^{-6}}{\sqrt{(3,366 \times 10^{-6}) \times (2,247 \times 10^{-6})}} = 0,409$$

Fator de acoplamento entre malha de blindagem e plano de terra (k_{SG}):

$$k_{SG} = \frac{1,122 \times 10^{-6}}{\sqrt{(3,019 \times 10^{-6}) \times (2,247 \times 10^{-6})}} = 0,431$$

Capacitâncias entre Blindagem e Plano de Terra (C_{sg}):

$$C_{sg} = \frac{2\pi(8,854 \times 10^{-12}) \times (1) \times 2,042}{\cosh^{-1}\left(\frac{0,05}{0,970 \times 0,001003}\right)} = 24,69pF$$

Número de Circuitos π em cascata (N_{pi}):

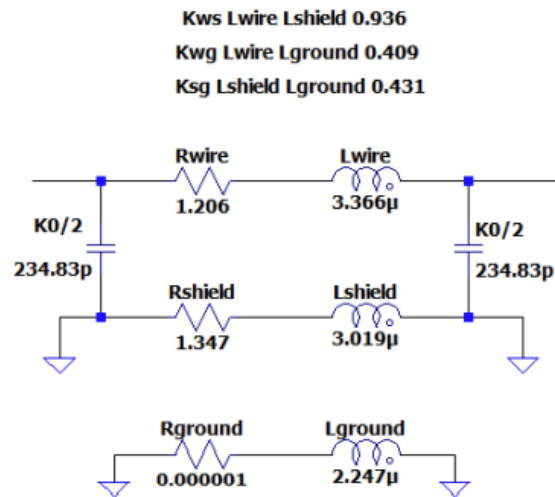
$$L_e = 3,366 \times 10^{-6} - 2,986 \times 10^{-6} = 3,800 \times 10^{-7}H$$

$$N_{pi} = 10 \times 2,042 \times 27 \times 10^6 \sqrt{(3,800 \times 10^{-7}) \times (469,66 \times 10^{-12})} = 8circuitos$$

4.4.2 Criando o modelo de parâmetros concentrados

Com todos os dados obtidos nos cálculos anteriores e com base na Figura 39, o modelo *LTSpice* de parâmetros concentrados do cabo coaxial já pode ter os valores finais inseridos em seus componentes. O modelo final é mostrado na Figura 40. Para a resistência do plano de terra R_{ground} foi atribuído um valor irrisório, representando assim a fuselagem que é composta por metais de baixa resistência.

Figura 40 – Modelo final de parâmetros concentrados do cabo coaxial.



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

4.4.3 Criando o modelo de parâmetros distribuídos

Como explicado na Seção 3.4, os modelos de parâmetros concentrados muitas vezes não são suficientes para representar um determinado cabo ou linha de transmissão sob determinadas situações. Isto vai depender do comprimento do cabo e da frequência e de sua corrente elétrica. Nos cálculos anteriores o valor mínimo do número de circuitos π necessários para se representar esta aplicação, sem

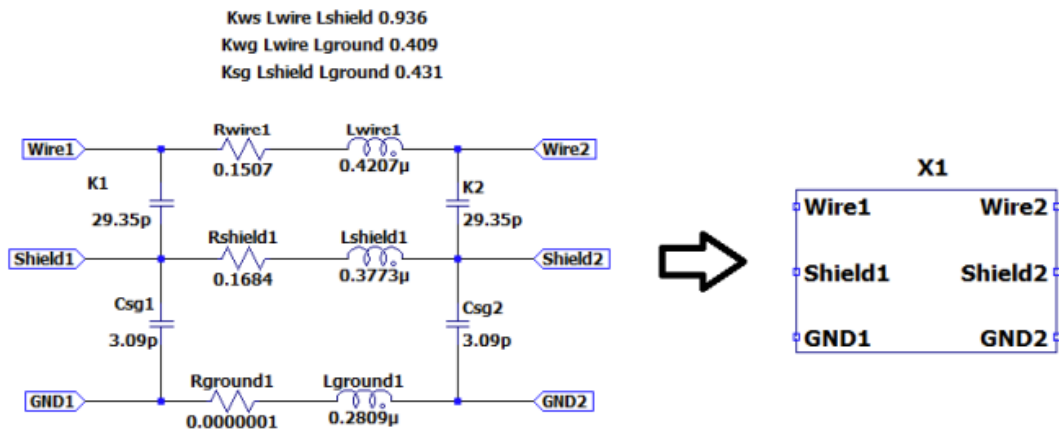
alteração dos resultados finais é $N_{pi} = 8_{\text{circuitos}}$, que deverão ser colocados em cascata para que a simulação seja feita de forma correta.

Para criar um modelo de parâmetros distribuídos no software *LTSpice*, será utilizado um recurso da própria ferramenta que permite o usuário encapsular um circuito de sua escolha em um símbolo fechado, facilitando a replicação e reuso ao longo da simulação. A Figura 41 ilustra a criação deste encapsulamento, onde foram colocados 6 pontos explícitos de conexão no modelo: "wire"1 e 2, "shield"1 e 2 e GND 1 e 2, representando, respectivamente, os pontos de ligação do condutor, malha de blindagem e plano de terra.

Todos os parâmetros concentrados devem ser divididos por 8, devido ao número de circuitos utilizados. Neste modelo também devem ser adicionadas as capacitâncias entre malha de blindagem e plano de terra, uma vez que a malha estará aterrada apenas nas suas extremidades, viabilizando o aparecimento destas capacitâncias ao longo de seu comprimento.

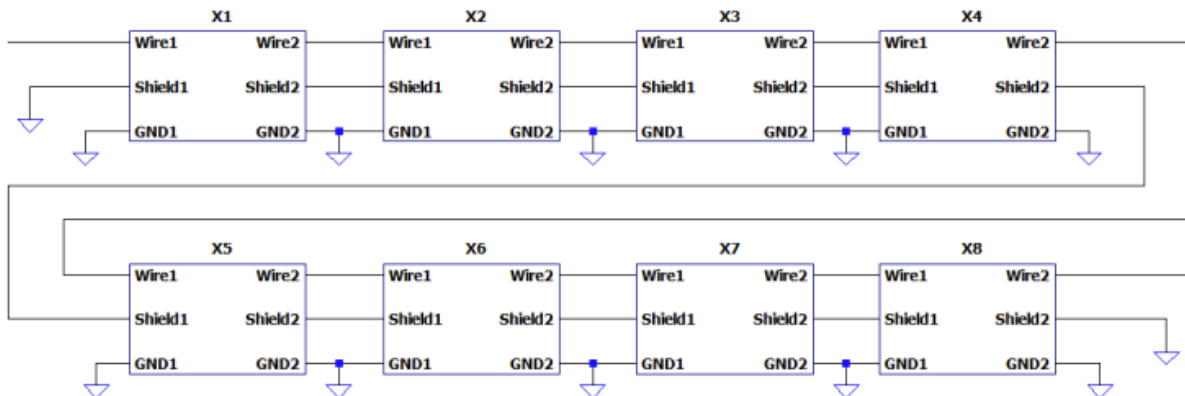
Por fim a Figura 42 mostra todos os circuitos encapsulados da Figura 41 colocados em cascatas. Note que apenas as extremidades da malha de blindagem (*Shield*) estão conectadas ao plano de terra, assim como no circuito fornecido pela empresa, onde as extremidades da malha se conectam à carcaça do conector, que por sua vez está aterrada.

Figura 41 – Encapsulamento do modelo de parâmetros concentrados.



Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

Figura 42 – Modelo final de parâmetros distribuídos do cabo coaxial.



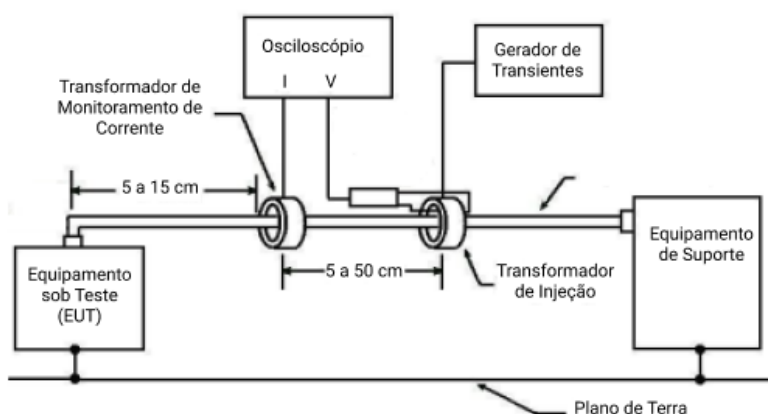
Fonte: Elaborada pelo autor no software *LTSpice*.

4.5 CONECTANDO TODOS OS MODELOS

Por fim o último passo é conectar todos os modelos em uma só simulação. Para isso serão listadas todas as partes fundamentais da simulação, para que ela possa estar semelhante ao teste de cablagem real abordado no Capítulo 2 e que é mostrado novamente na Figura 43.

O osciloscópio e seu respectivo transformador de monitoramento de corrente não serão considerados no modelo final, pois eles são equipamentos que tem uma utilidade apenas no âmbito físico do laboratório, não alterando assim os resultados da simulação final. O software *LTSpice* já possui recursos para a medição de corrente e tensão.

Figura 43 – Configuração do teste de cablagem.



Fonte: RTCA (2010) adaptado pelo autor.

4.5.1 Equipamento sob teste

O modelo do circuito de interface do equipamento sob teste foi fornecido pela empresa cedente e, como dito no começo deste capítulo, ele será representado como uma caixa preta por questões de propriedade intelectual.

Como mostra a Figura 44, este circuito de interface possui 5 diferentes pinos que irão auxiliar as medidas dos resultados finais da simulação.

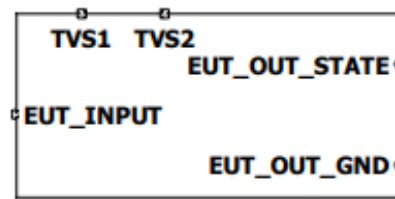
Os pontos TVS1 e TVS2 estão diretamente ligados nas duas extremidades do diodo TVS que é responsável por fazer a proteção contra altas correntes que entram no circuito.

O ponto EUT_INPUT é a entrada do circuito de interface por onde o cabo coaxial será conectado.

O ponto EUT_OUT_STATE é a saída do circuito de interface do equipamento eletrônico, que é conectado nos seus demais circuitos internos. Neste ponto serão feitas as medidas para do estado da saída do circuito de interface para verificar possíveis perturbações funcionais.

Por fim, o ponto EUT_OUT_GND é apenas uma conexão para aterrar todos os circuitos internos da interface do equipamento.

Figura 44 – Modelo encapsulado do circuito de interface do equipamento sob teste.

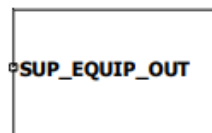


Fonte: Empresa cedente.

4.5.2 Equipamento de suporte

O equipamento de suporte é uma unidade que irá simular o sinal enviado pelo sensor ao equipamento sob teste. Este modelo é representado na Figura 45 e possui apenas um pino, o SUP_EQUIP_OUT, que representa a saída do sinal enviado.

Figura 45 – Modelo encapsulado do equipamento de suporte.

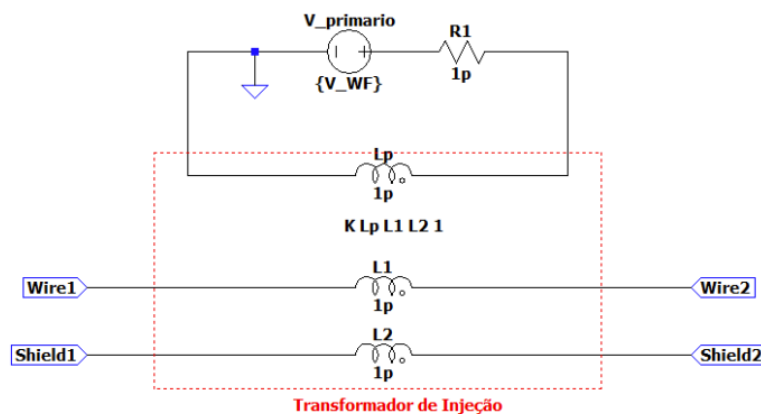


Fonte: Empresa cedente.

4.5.3 Transformador de injeção

O modelo do transformador de injeção foi abordado no Capítulo 3 e é mostrado na Figura 46. Ele é composto por um enrolamento primário que irá estar acoplado com o condutor interno (*wire*) e a malha de blindagem (*shield*). O fator de acoplamento é $k = 1$, pois a mesma onda criada no primário deve penetrar no secundário. Os componentes indutivos representativos na figura, possuem um valor baixo de indutância igual a $1pH$, para não apresentar efeitos relacionados à indução própria.

Figura 46 – Modelo encapsulado do transformador de injeção.



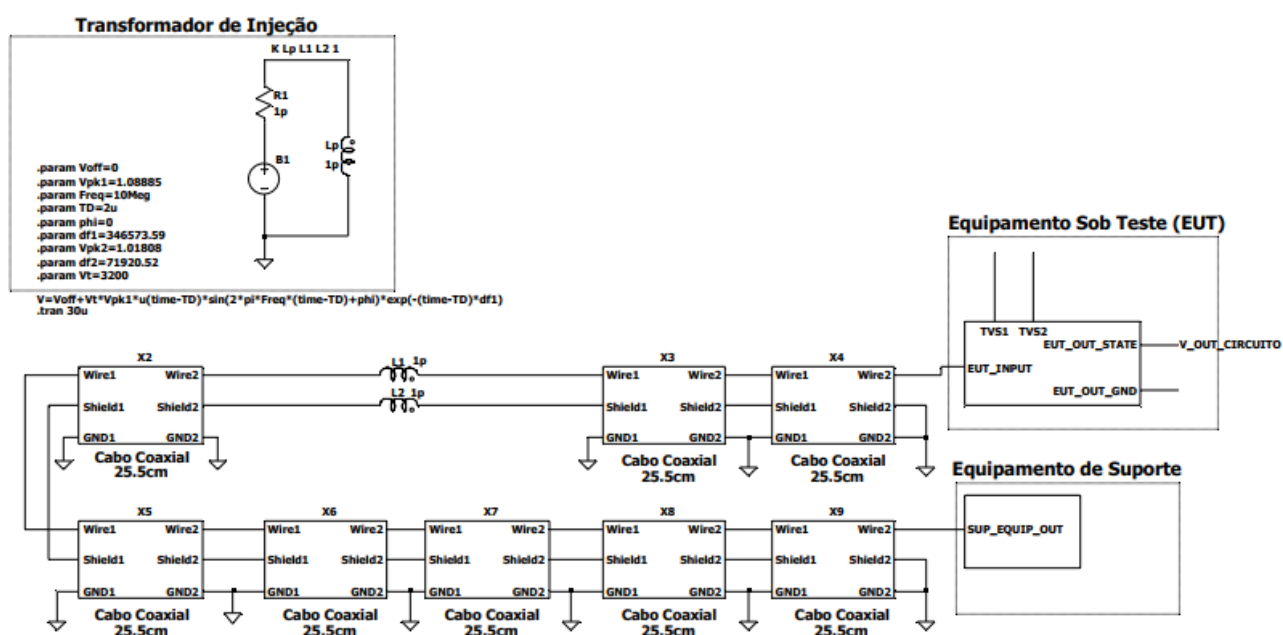
Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

4.5.4 Modelo final dos elementos agrupados

Por fim, o último passo é juntar todos os elementos que foram abordados anteriormente com o modelo de parâmetros distribuídos do cabo coaxial. A Figura 47 mostra a configuração final do teste de cablagem no método de indução por cabos, assim como o representado pela norma DO160G e mostrado na Figura 43 no começo desta seção.

Note que na Figura 43, o transformador de injeção deve ser colocado em uma distância máxima de 65cm do equipamento sob teste. Como cada circuito π que representa cada trecho do cabo coaxial, possui aproximados $25,5\text{cm}$ ($2,042\text{m}/8\text{circuitos}$), o transformador foi inserido logo depois do segundo circuito, apresentando assim uma distância de $50,1\text{cm}$ do equipamento.

Figura 47 – Modelo final do teste de cablagem, método de indução por cabos.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

4.6 SIMULAÇÃO DO TESTE DE CABLAGEM E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o modelo completo em mãos, finalmente a simulação é realizada e os resultados serão analisados nesta seção.

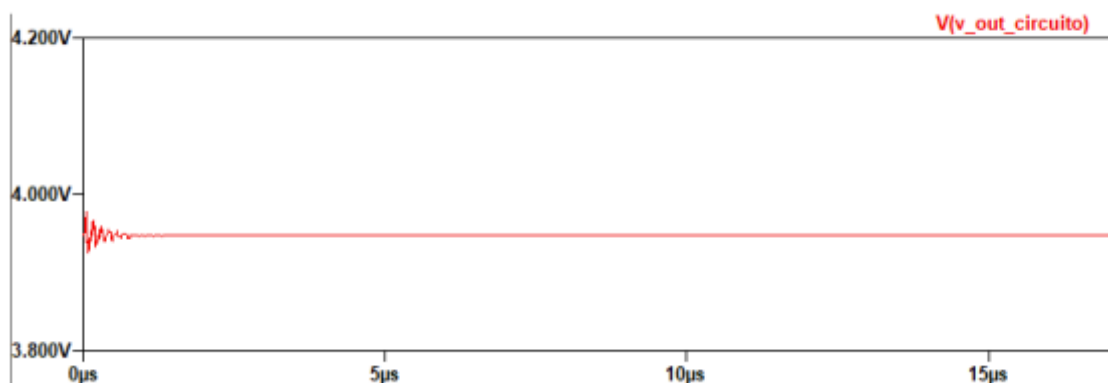
A norma DO160G diz que o equipamento só deverá possuir certificação contra descargas elétricas atmosféricas se o mesmo não apresentar nenhuma perturbação funcional na saída do circuito de interface ou se nenhum componente interno for danificado.

4.6.1 Em busca de perturbações funcionais

Segundo a norma, perturbações funcionais são alterações muito grandes de estado que possam alterar as funções ou leituras feitas pelos equipamentos. Cabe a empresa que está testando-os conhecer seus padrões de performance e confiabilidade, para saber se o que está sendo analisado pode causar algum erro em suas unidades.

O primeiro passo é ir em busca de perturbações funcionais. A Figura 48 mostra o estado em que se encontra a saída EUT_OUT_STATE do circuito de interface sem que as formas de onda estejam aplicadas no cabo coaxial. O gráfico de tensão por tempo é estabilizado em $3,95V$ após passado $1\mu s$. Este sinal será a referência para encontrar possíveis perturbações funcionais quando as formas de onda forem aplicadas.

Figura 48 – Simulação 1 - Sem formas de onda aplicadas.

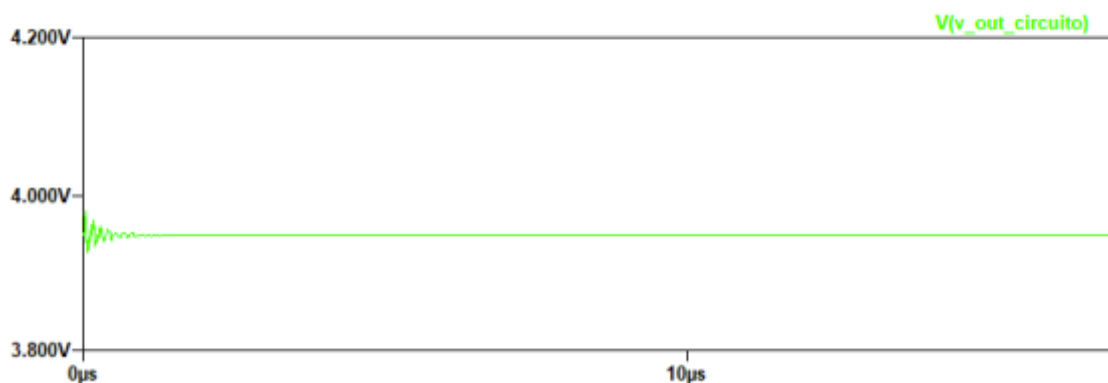


Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

O próximo passo é aplicar todas as formas de onda e analisar a mesma saída (EUT_OUT_STATE) do circuito de interface do equipamento. Lembrando que esta saída representa a entrada de seus circuitos internos.

A Figura 49 mostra a leitura do ponto (EUT_OUT_STATE) com a forma de onda número 1 aplicada na cablagem. Note que há uma alteração bem pequena no ruído mostrado inicialmente na Figura 48.

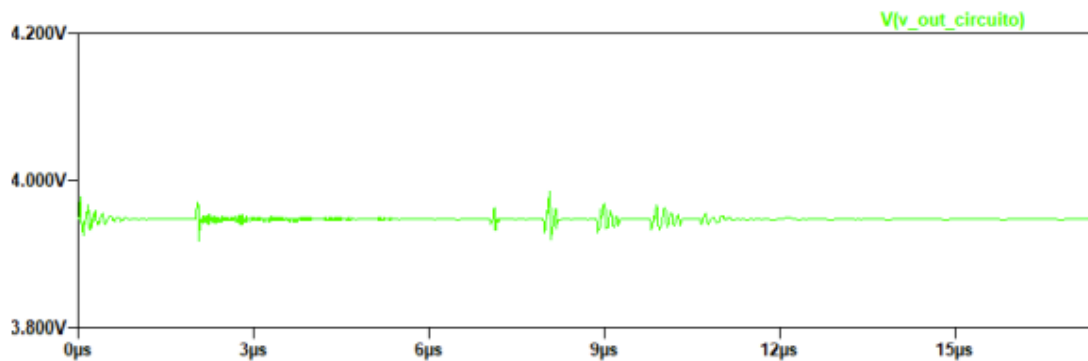
Figura 49 – Simulação 2 - Forma de onda número 1 aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

A Figura 50 mostra a leitura do ponto (EUT_OUT_STATE) com a forma de onda número 3, com $f_{req} = 1\text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$, aplicada na cablagem. Note que agora há uma alteração maior no sinal mostrado inicialmente na Figura 48, que acontece ao longo dos primeiros $15\mu s$.

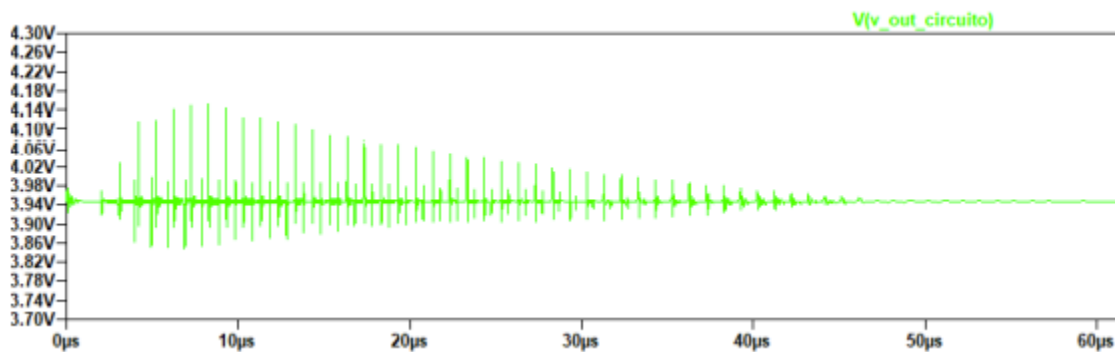
Figura 50 – Simulação 3 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 1\text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$) aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

A Figura 51 mostra a leitura do ponto (EUT_OUT_STATE) com a forma de onda número 3, com $f_{req} = 1\text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$, aplicada na cablagem. Note que agora há uma alteração muito maior no sinal mostrado inicialmente na Figura 48, que acontece ao longo dos primeiros $60\mu s$. É de se esperar uma alteração mais longa que na variante número 3 anterior, pois sua porcentagem de decaimento é igual a 75% , ou seja, ela possui um tempo de vida mais longo.

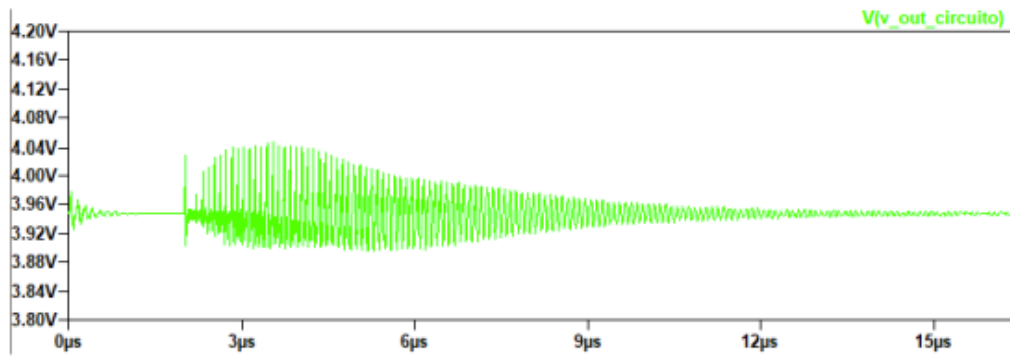
Figura 51 – Simulação 4 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 1\text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$) aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

A Figura 52 mostra a leitura do ponto (EUT_OUT_STATE) com a forma de onda número 3, com $f_{req} = 10\text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$, aplicada na cablagem. Note que agora também há uma alteração muito maior no sinal mostrado inicialmente na Figura 48, que acontece ao longo dos primeiros $15\mu s$.

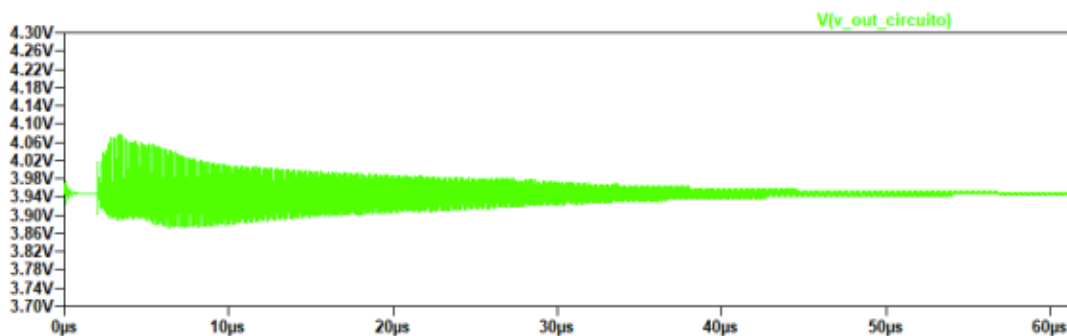
Figura 52 – Simulação 5 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 10\text{ MHz}$ e $P_D = 25\%$) aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

Por fim, Figura 53 mostra a leitura do ponto (EUT_OUT_STATE) com a forma de onda número 3, com $f_{req} = 10\text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$, aplicada na cablagem. Note que agora também há uma alteração muito maior no sinal mostrado inicialmente na Figura 48, que acontece ao longo dos primeiros $60\mu s$.

Figura 53 – Simulação 6 - Forma de onda número 3 ($f_{req} = 10\text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$) aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

Os resultados das simulações anteriores foram apresentados para a empresa que cedeu o sistema e o comentário feito é descrito abaixo.

O circuito de interface realmente irá apresentar sinais dos tipos apresentados após uma descarga elétrica, porém estes são considerados ruídos, uma vez que a maior variação de tensão apresentada em relação ao sinal original foi de aproximadamente 4,5% na forma de onda número 3 com $f_{req} = 1\text{ MHz}$ e $P_D = 75\%$. Estas variações serão posteriormente filtradas pelos demais circuitos de entrada da unidade. Um equipamento eletrônico possui diversas proteções contra efeitos indesejados, além do diodo TVS que protege contra sobrecorrentes de descargas elétricas atmosféricas. Portanto não há perturbações funcionais nas simulações apresentadas.

4.6.2 Verificando se há danos no diodo TVS de proteção

No teste feito em um laboratório real, se algum dos componentes internos do circuito de interface sofrerem algum dano, o resultado será mais perceptível, seja por apresentar algum barulho, cheiro

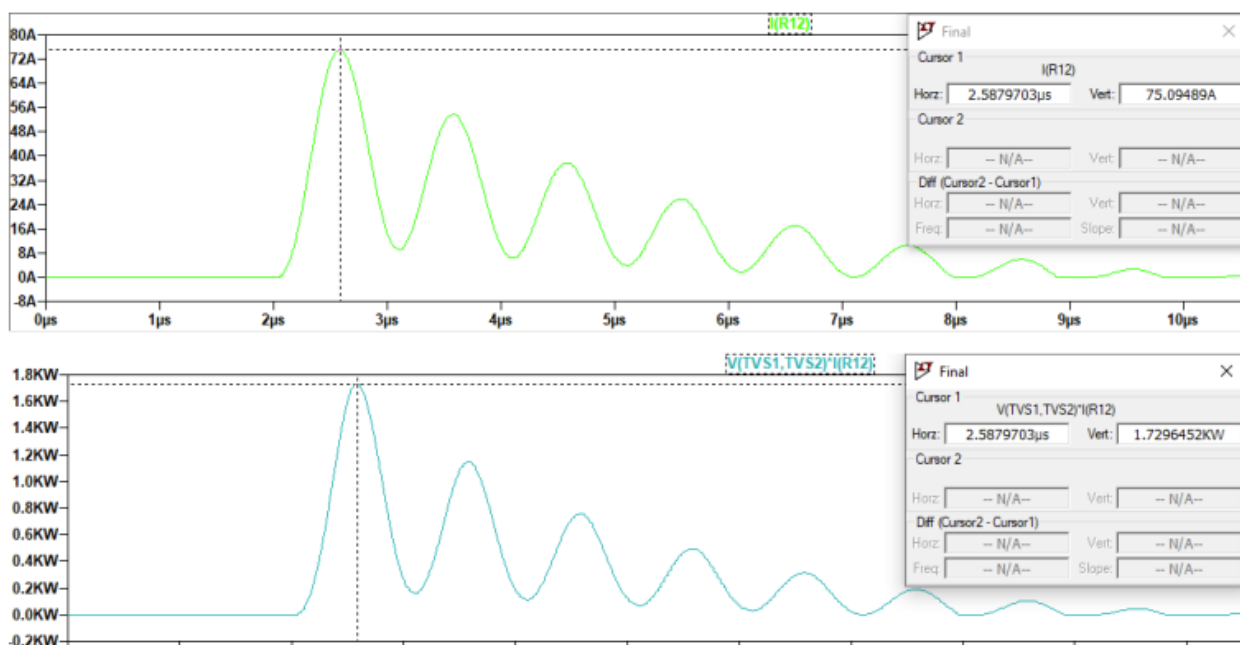
diferente ou até alguma pequena explosão. Já nas simulações isso não acontecerá, pois a maioria dos softwares como o *LTSpice* não possuem recursos que alertem diretamente o dano em algum componente interno. Por isso é muito importante que o usuário se atente e não esqueça de analisar a potência e corrente do diodo TVS, que são as variáveis que podem fazer um componentes ser danificado. Um dos objetivos da criação deste método de simulação, é prever possíveis falhas antes de que a testagem seja feita no laboratório real, evitando danos desnecessários. A análise de potência e corrente é feita a seguir.

O diodo TVS utilizado no circuito de interface deste equipamento, segundo a empresa cedente, é o SMCJ10CA. Como mostra seu catálogo Littelfuse (2020), as máximas corrente e potência de pico que este componente suporta são, respectivamente, 88,3A e 2000W.

A Figura 54 mostra os maiores valores de pico de corrente e potência encontrados entre as 5 formas de onda apresentadas. Duas variantes da forma número 3 apresentaram o mesmo gráfico, que foram as formas com $f_{req} = 1\text{ MHz}$, $P_D = 25\%$ e $f_{req} = 1\text{ MHz}$, $P_D = 75\%$. Os maiores valores encontrados foram $I = 75,09\text{A}$ e $P = 1729,54\text{W}$, que ainda estão dentro dos limites do diodo TVS SMCJ10CA citados anteriormente. Portanto o equipamento eletrônico não apresentou danos em seu circuito de interface.

Com todas as simulações feitas anteriormente, conclui-se que o circuito analisado não apresentou nenhuma falha de certificação nos testes de cablagem, o que era de se esperar pois ele é um sistema que já está em operação nas aeronaves da empresa cedente e já foi testado e certificado anteriormente.

Figura 54 – Simulação 7 - Potência e Corrente - Formas de onda número 3 ($f_{req} = 1\text{ MHz}$).



Fonte: Elaborado pelo autor no software *LTSpice*.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A certificação de equipamentos eletrônicos em relação às descargas elétricas atmosféricas é muito importante pois um avião estará sempre suscetível a ser atingido por um raio, o qual pode causar efeitos indiretos nos sistemas elétricos e eletrônicos de uma aeronave devido à indução de altos campos eletromagnéticos. Por este motivo a norma DO160G padroniza procedimentos de testes de certificação de equipamentos eletrônicos aerotransportados. Estes testes são muito custosos, pois demandam uma mão de obra extremamente qualificada e um laboratório com equipamentos de alta qualidade. Seus resultados também devem ser enviados ao órgão regulador (ANAC) para uma análise e posteriormente receber um certificado de qualificação.

A simulação dos testes de suscetibilidade a descargas elétricas é uma atividade muito importante que pode ser realizada antes e depois da testagem física em laboratório. Se for feita antes, pode prever possíveis falhas e direcionar melhor os engenheiros no momento do teste, podendo economizar tempo e dinheiro ao já ter desenvolvido uma solução prévia para o problema. Se for feita depois, pode validar possíveis contestações dos resultados, feitas pelo órgão regulador, sem a necessidade de refazer o teste em laboratório. Por este motivo um método de simulações é criado para que possa ser replicado por outros engenheiros.

Para o sistema testado e analisado no Capítulo 4, perturbações funcionais foram buscadas ao induzir as formas de onda na cablagem, que são alterações abruptas de estado que podem causar mudanças na leitura ou função do equipamento. Estas mudanças, segundo a norma DO160G, devem seguir um padrão de confiabilidade estabelecido pela própria empresa que está o testando. Após um envio do resultado para a empresa, chegou-se a conclusão de que o mesmo não possui perturbações funcionais, apenas ruídos que serão posteriormente filtrados pelos demais circuitos do equipamento.

Ainda para o mesmo sistema, foram buscados possíveis danos no diodo TVS interno, responsável pela proteção contra sobrecorrentes. Ao analisar os gráficos de potência e corrente no diodo, chegou-se a conclusão de que o mesmo não irá sofrer algum dano no momento do teste físico.

Portanto, conclui-se que o equipamento testado não apresentará problemas no momento do teste em laboratório.

Por fim, os resultados deste trabalho também podem ser utilizados para outras aplicações, uma vez que ele aborda uma modelagem complexa e generalista de cabos, podendo ser reaproveitada por qualquer análise de efeitos eletromagnéticos em condutores.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C.K; SADIKU. M. N. O. **Fundamentals of electric circuits**. 4. Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2009. 1056 p.

AMPHENOL BROADBAND SOLUTIONS. **Saiba a diferença entre fios e cabos elétricos**. Disponível em: <https://amphenolbroadband.com.br/2020/08/13/saiba-as-diferencas-entre-fio-e-cabo-eletrico/>. Acesso em: 22 nov. 2021

ANANYA TECHNOLOGIES. **Electronic LRU products**. Disponível em: https://www.ananyatech.in/electronic_lrus_products.html. Acesso em: 26 jun. 2021.

ASSEMBLY MAG. **Rules for Routing Aircraft Wiring**. Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/93379-rules-for-routing-aircraft-wiring>. Acesso em: 26 jun. 2021

BASSETO, M. **Raios – o que acontece com uma aeronave quando atingida**. Disponível em: <https://www.aeroin.net/raios-o-que-acontece-com-aeronave>. Acesso em: 06 jun. 2021.

BELDEN. **Online Catalog**. Disponível em: https://catalog.belden.com/index.cfm?event=pd&p=PF_83306E. Acesso em: 11 set. 2021

CALMOT. **Wire Gauge Table**. Disponível em: <https://www.calmont.com/resources/wire-gauge-table/>. Acesso em 13 set. 2021

CAPELLI, F; RIBA, JR. Analysis of formulas to calculate the AC inductance of different configurations of nonmagnetic circular conductors. **Electrical Engineering**, v. 99, n. 2, p. 827-837, out. 2016. Disponível em: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100354/Manuscript_Rev1_2016_08_31.pdf. Acesso em: 02 set. 2021.

CHAVES, D.; BRAUN CHAGAS, N. Características e comportamentos do efeito pelicular. **Anais do salão internacional de ensino, pesquisa e extensão**. v. 8, n. 2 fev. 2020.

DIEFENTHÄLER, A. T. **Modelagem matemática de linhas de transmissão baseada em dados reais da rede de distribuição primária de energia elétrica**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2019.

EDMINISTER, J. A. **Coleção Schaum**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. 585 p.

EMBRAER. **Projetos**. Disponível em: <https://embraerx.embraer.com/br/pt/projetos>. Acesso em 22 nov. 2021.

FISCHER CUSTOM COMMUNICATIONS. **Bulk Current Injection Probes**. Disponível em: <https://www.fischercc.com/products/f-140/>. Acesso em 16 set. 2021.

GORE. **Shielded Twisted Pair Cables for Defense Land Systems**. Disponível em: <https://www.gore.com/products/stp-cables-defense-land-systems>. Acesso em: 24 ago. 2021.

HAYT JÚNIOR, W.H.; BUCK, J.A. **Eletromagnetismo**. 8. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 546 p.

JORNAL DA UNICAMP. **Emissões poluentes x eletrificação veicular. Porque o Brasil está perdendo esta corrida?**. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2021/03/02/emissoes-poluentes-x-eletrificacao-veicular-por-que-o-brasil-esta-perdendo>. Acesso em: 22 nov. 2021

KNIGHT, D. W. **Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors**. Não publicado, 2016. 55 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.3865.1284

LIBRANTZ, H. Descargas elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves. **Exacta, Universidade Nove de Julho Brasil**. v. 4. n. 2. p. 247-258. 2006.

LIBRANTZ, H. Efeitos do impacto dos raios nas aeronaves com estrutura composta de materiais compósitos. **Exacta, Universidade Nove de Julho Brasil**. v. 4. n. 2. p. 259-271. 2006.

LITTELFUSE. **TVS Diodes**. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_TV_S_Diode_SMCJ_Datasheet_pdf-1317380.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

MD POLICABOS. **Tipos mais comuns de blindagem para cabos**. Disponível em: <https://www.mdpolicabos.com/tipos-mais-comuns-de-blindagem-para-cabos-md-policabos/>. Acesso em: 22 nov. 2021.

MOUSER ELECTRONICS. **Circuit Protection**. Disponível em: https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/tvs_diodes/littelfuse_tvs_diode_smcj_datasheet.pdf.pdf. Acesso em: 18 set. 2021

PAUL, C. R. **Analysis of multiconductor transmission line**. 2. Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 773 p.

PAUL, C. R. **Inductance loop and partial**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 377 p.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS. **DO160G**: environmental conditions and test procedures for airborne equipment. Washington: RTCA, 2010

STANDARD WIRE AND CABLE CO. **Cable Design Equations**. Disponível em: http://www.standard-wire.com/cable_design_equations.html. Acesso em: 24 ago. 2021.

TRASKOS, M. **Rules for routing aircraft wiring**. Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/93379-rules-for-routing-aircraft-wiring>. Acesso em 22 nov. 2021.

VILAÇA, N. L. **Projeto de um sistema de voo automático para veículos aéreos não tripulados em fase de voo de cruzeiro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.

VINHOLE, T. **Full-fly-by-wire o sistema que revolucionou os aviões da Embraer**. Disponível em: <https://www.airway.com.br/full-fly-by-wire-o-sistema-que-revolucionou-os-avioes-da-embraer/>. Acesso em: 22 nov. 2021

ZHANG, SH. Calculation of the partial capacitance in a system of conductors within the calculable resistor. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**. v. 43, n. 6 p. 929-932, dec. 1994.