

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM DE ESTRUTURAS INDOORS
CONSTRUÍDAS COM LÂMINAS “FINAS” CONDUTORAS ELÉTRICAS,
ATRAVÉS DO MÉTODO FDTD**

RITA DE CÁSSIA FLORÊNCIO ROCHA

DM 24/2009

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RITA DE CÁSSIA FLORÊNCIO ROCHA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM DE ESTRUTURAS INDOORS
CONSTRUÍDAS COM LÂMINAS “FINAS” CONDUTORAS ELÉTRICAS,
ATRAVÉS DO MÉTODO FDTD**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Orientador: Prof. Dr. Carlos
Leonidas da Silva Souza Sobrinho.**

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM DE ESTRUTURAS INDOORS
CONSTRUÍDAS COM LÂMINAS “FINAS” CONDUTORAS ELÉTRICAS,
ATRAVÉS DO MÉTODO FDTD**

AUTORA: RITA DE CÁSSIA FLORÊNCIO ROCHA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

APROVADA EM 25 /09/ 2009

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Leonidas da S. S. Sobrinho
(ORIENTADOR – UFPA)

Prof. Dr. José Felipe Souza de Almeida
(MEMBRO – UFRA)

Prof. Dr. Licinius Dimitri Sá de Alcantara
(MEMBRO – UFRA)

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
(MEMBRO – UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo esforço,
dedicação e apoio em todos os
momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pois é Ele que me fortalece e se cheguei até aqui foi única e, exclusivamente, por Sua vontade, obra e graça.

Aos meus pais pelo apoio e amor dedicado a mim. Aos meus irmãos, Thatiana e Everson, pela companhia e ao meu namorado, Paulo, pela paciência e força.

Ao meu orientador, prof. Dr. Carlos Leonidas, pela dedicação, esforço, conselhos, amizade, paciência e por acreditar em mim e em minha capacidade. Deus lhe abençoe e proteja!

Ao prof. Dr. Rodrigo, que nunca mede esforços em ajudar a qualquer pessoa que esteja precisando de seus ensinamentos. Muito obrigada por tudo, serei sempre grata a você. Que o Espírito Santo continue o iluminando.

Aos companheiros do LANE, em especial, aos amigos Waldir, Thaís e Ricardo pela companhia. Continuem firmes na caminhada!

A todos que me deram força e coragem para continuar e concluir esse trabalho. Muito Obrigada!

“Basta-te a minha graça, pois é na fraqueza que a força se manifesta. Por isso, de bom grado, eu me gloriarei das minhas fraquezas, para que a força de Cristo habite em mim”.
(2Cor 12, 9)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.2. DISPOSIÇÃO DOS CAPÍTULOS	2
CAPÍTULO 2 – TEORIA RELACIONADA	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. O ALGORITMO DE YEE	4
2.3. PRECISÃO, ESTABILIDADE E DISPERSÃO NUMÉRICA	6
2.4. O MODELO DE SUB-CÉLULA PARA PLANOS FINOS	7
2.5. TRUNCAGEM DO MÉTODO FDTD POR UPML	12
CAPÍTULO 3 – BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	18
3.1. INTRODUÇÃO	18
3.2. BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	19
3.3. EFICIÊNCIA DA BLINDAGEM	21
3.3.1. Eficiência da Blindagem – Fontes de Campo Distante	22
3.3.2. Eficiência da Blindagem – Fontes de Campo Próximo	23
3.4. Efeito das Aberturas	23
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	25
4.1. INTRODUÇÃO	25
4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	26
4.2.1. Fonte de Excitação	26
4.2.2. Cálculo da Eficiência da Blindagem: metodologia utilizada	27
4.3. VALIDAÇÃO DO AMBIENTE <i>LANE SAGS</i> COM A IMPLEMENTAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE PLANO FINO	28

4.4. ESTUDO DE CASOS-----	32
4.4.1. Caso 01: Variação das dimensões da caixa nas direções (x,y,z) -----	32
4.4.2. Caso 02: Variação da dimensão da abertura de uma caixa blindada ao longo do comprimento (d_1) e da largura (d_2) e sua influência sobre a eficiência da blindagem-----	34
4.4.3. Caso 03: Análise do espaçamento entre paredes duplas de uma caixa blindada sem abertura e sua influência sobre a eficiência da blindagem -----	36
4.4.4. Caso 04: variação da amplitude da fonte de excitação e sua influência sobre a eficiência da blindagem-----	38
4.4.5. Caso 05: variação da posição da abertura da caixa em relação à posição da fonte de excitação e a sua influência sobre a eficiência da blindagem -----	39
4.4.6. Caso 06: Análise da eficiência da blindagem utilizando um laboratório de alta-tensão construído virtualmente com dimensões reais -----	41
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES-----	47
Referências Bibliográficas -----	49

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 A célula de Yee -----	5
2.2 Comparação entre as malhas espaciais: a) FDTD tradicional, b) Modelo de sub-célula-----	8
2.3 Modelo de uma malha retangular do FDTD mostrando a localização dos campos e o plano fino-----	8
3.1 Blindagem utilizada para conter emissão radiada-----	19
3.2 Blindagem utilizada para evitar que emissões externas cheguem aos equipamentos -----	19
4.1 Função utilizada como fonte de Excitação (domínio do tempo)-----	26
4.2 Função utilizada como fonte de Excitação (domínio da frequência)-----	27
4.3 Estrutura de acordo com o artigo original-----	28
4.4 Representação da Estrutura implementada no ambiente <i>LANE SAGS</i> -----	28
4.5 Registro de Temporal de Tensão no ponto de recepção: (a) Na ausência da sala; (b) na presença da sala-----	29
4.6 Gráfico que apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo de Sub-célula implementado no ambiente <i>LANE SAGS</i> e a comparação dos mesmos com os resultados apresentados em [36] e [37] -----	30
4.7 Gráfico que apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo de Sub-célula implementado no ambiente <i>LANE SAGS</i> utilizando-se diferentes fontes de excitação e a comparação dos mesmos com o resultado apresentado em [36] -----	31
4.8 Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa ao longo da direção x-----	33
4.9 Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa ao longo da direção y-----	33
4.10 Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa ao longo da direção z-----	34
4.11 Visão frontal da sala com a indicação da dimensão d_1 e d_2 -----	35
4.12 Resultados obtidos para $d_1 = 3$ cm, 5 cm e 7 cm-----	35
4.13 Resultados obtidos para $d_2 = 16$ cm, 18 cm e 20 cm -----	36
4.14 Estrutura representada no ambiente <i>LANE SAGS</i> para o caso em que as paredes estão espaçadas de 7 cm-----	37

4.15 Resultados obtidos com a variação do espaçamento entre as paredes duplas -----	37
4.16 Resultados obtidos para a alteração da amplitude da fonte de excitação considerando uma caixa contendo uma abertura -----	38
4.17 Resultados obtidos para variação da amplitude da fonte de excitação considerando uma caixa sem aberturas formada por paredes duplas espaçadas de 3 cm-----	39
4.18 Resultado obtido para a variação da posição da abertura em relação ao posicionamento da fonte de excitação -----	41
4.19 Planta baixa do laboratório de alta-tensão -----	42
4.20 Estrutura modelada utilizando o ambiente <i>LANE SAGS</i> -----	43
4.21 Situação I – Estrutura completamente fechada -----	44
4.22 Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 1”-----	45
4.23 Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 2”-----	45
4.24 Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 3”-----	46

LISTA DE TABELAS

TABELA I – Posições utilizadas da abertura e suas respectivas legendas a serem consideradas nos gráficos dos resultados-----	40
TABELA II – Situações em que foram verificados os valores da eficiência da blindagem-----	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FDTD	Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
LANE	Laboratório de Análises Numéricas em Eletromagnetismo
GUI	Interface Gráfica para o Usuário
ANSI C	Instituto norte-americano de padrões em linguagem C
ABC	Condição de Fronteira Absorvente (<i>Absorbing Boundary Conditions</i>)
PML	Camadas perfeitamente casadas (<i>Perfect Matched Layers</i>)
UPML	Camada uniaxial perfeitamente casada (<i>Uniaxial Perfectly Matched Layers</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{H}	Vetor intensidade de Campo Magnético (A/m)
\vec{E}	Vetor intensidade de Campo Elétrico (V/m)
ϵ	Permissividade elétrica (farads/m)
μ	Permeabilidade magnética (henrys/m)
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica de condução (A/m ²)
x, y, e z	Coordenadas do sistema cartesiano
$\Delta x, \Delta y$ e Δz	Incrementos espaciais no sistema cartesiano
Δt	Incremento temporal
v_{max}	Velocidade máxima
c	Velocidade da luz no vácuo
λ_{min}	Comprimento de onda mínimo
$\sigma_s, \epsilon_s, \mu_s$	Condutividade, permissividade e permeabilidade elétrica do plano fino, respectivamente
ϵ_0, μ_0	Permissividade e permeabilidade elétrica no vácuo
d	Espessura do plano fino
σ_e	Condutividade elétrica
σ_m	Condutividade magnética
ω	Frequência angular
\vec{H}, \vec{E}	Transformadas de Fourier dos vetores intensidade de campo elétrico e intensidade de campo magnético, respectivamente
[S]	Tensor de anisotropia uniaxial na região absorvente
EB	Eficiência de Blindagem
R	Perdas por reflexão.
A	Perdas por absorção.
M	Efeitos adicionais das múltiplas reflexões e transmissões
E_0, H_0	Amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, na ausência da blindagem
E_S, H_S	Amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, na presença da blindagem.
n_0, \hat{n}	Impedância intrínseca do espaço livre e do condutor, respectivamente.
t	Espessura do condutor

δ	Profundidade de penetração (<i>skin depth</i>)
β	Constante de propagação
r	Distância da fonte até a blindagem
$f_{c,mn}$	Frequência de corte de um modo particular.
α_{mn}	Atenuação de um guia de onda em um modo particular
l	Comprimento de um guia de onda
d_1	comprimento da abertura
d_2	largura da abertura
f_r	frequência de ressonância para cavidades ressonantes retangulares
m, n, p	modos ressonantes
a, b, c	dimensões da caixa das direções x, y e z, respectivamente

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados para a análise da Eficiência de Blindagem utilizando estruturas indoor construídas com lâminas “finas” condutoras elétricas. As simulações foram realizadas utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo, FDTD, no qual foi implementada uma formulação de sub-célula para o modelamento de estruturas finas. A simulação foi validada comparando-se os resultados obtidos com os disponíveis na literatura. Assim, várias geometrias foram testadas, modificando-se aberturas e o espaçamento entre paredes duplas blindadas. Por fim, um laboratório de alta-tensão foi construído virtualmente, com dimensões reais, e foram analisados os valores da Eficiência de Blindagem considerando a estrutura completamente fechada e com aberturas.

PALAVRAS-CHAVES: Eficiência de Blindagem, método FDTD, formulação de sub-célula, paredes finas.

ABSTRACT

This work presents results regarding electromagnetic shielding structures using thin conductive sheets. The simulations were performed by using the finite difference time domain method (FDTD), in which a sub-cellular formulation has been implemented for modeling thin steel walls. The implementation was validated via comparison of the obtained results to those available in the literature. Then, several geometries were tested, including apertures on the structures and by changing the space between double shielding walls. Finally, a complete high-voltage laboratory was simulated (by analyzing the shielding efficiency) considering a closed structure and apertures.

KEYWORDS: electromagnetic shielding efficiency, FDTD method, sub-cellular formulation, thin steel walls.

CAPÍTULO 1

Todo equipamento e/ou ambiente está suscetível a presença de radiações indesejadas que podem degradar ou prejudicar, completamente, o seu desempenho [1]. Diversas técnicas podem ser utilizadas para conter ou reduzir esse tipo de interferência [2], [3].

A blindagem eletromagnética é uma dessas técnicas e objetiva reduzir ou conter interferências irradiadas protegendo o espaço de interesse, [4]. Podendo ser utilizada para conter uma fonte de ruído evitando sua interferência com outros equipamentos externos à blindagem [5] e, também, para proteger o equipamento ou estrutura blindada de radiações eletromagnéticas externas [6].

O principal parâmetro que informa o quão eficiente está sendo uma blindagem é denominado Eficiência de Blindagem [7], [8], o qual é definido como a razão entre o valor do sinal recebido sem a blindagem e o valor do sinal recebido com a blindagem em um mesmo ponto do espaço [9], o que será o objeto de estudo desse trabalho .

A modelagem e simulação numérica de estruturas blindadas tornam-se complicadas devido a utilização de materiais super finos, [10]. A representação torna o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) [11] convencional inadequado devido ao alto custo computacional envolvido. Devido a isso, várias técnicas de modelamento de estruturas finas utilizando o método FDTD foram desenvolvidas ao longo do tempo [12-16].

A primeira técnica de modelamento usando estruturas finas, considerando materiais condutores ou dielétricos, foi introduzida em 1990 [12], por Railton e MCGeehan, que considerava somente a componente tangencial do campo elétrico na interface plano/ar. Em 1991, Tirkas e Demarest apresentaram em [13] um modelo para representar estruturas finas que tratava além da componente tangencial do campo elétrico, também, a componente normal do referido campo. Em 1992, Maloney e Smith [14] apresentaram uma formulação que também permitia o modelamento de planos condutores finos, denominada de modelo de sub-célula. Em [15] e [16], também, existe uma formulação para planos finos.

Neste trabalho foi utilizada a técnica proposta em [14] por Maloney e Smith, modelo de sub-célula, implementada no ambiente *LANE SAGS* desenvolvido no Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo (*LANE*).

Esse ambiente contém, [17]: uma interface gráfica para o usuário (GUI) escrita em C++; simulação automática do método FDTD utilizando processamento paralelo escrito em ANSI C (LAM/MPI) e visualização da estrutura escrita em ANSI C (OpenGL). O ambiente é

executado em cluster Linux Beowulf no qual o usuário define a sua estrutura e o número de processadores a ser usado e o sistema divide as tarefas entre os processadores reduzindo, dessa forma, o tempo de processamento e as possibilidades de erro humano. Para problemas em regiões abertas, o domínio de análise é truncado por uma formulação UPML para meios condutivos [18].

1.1.OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho possui como principal objetivo mostrar a análise da eficiência da blindagem em estruturas compostas por paredes super finas (80 μm). Para isso, utilizou-se como principal ferramenta o Método FDTD, implementado com o modelo de sub-célula, implementado no ambiente *LANE SAGS*.

Foram analisadas estruturas menores contendo aberturas e composta por paredes duplas espaçadas de alguns centímetros. Além disso, foi construída virtualmente uma estrutura com dimensões reais onde, futuramente, será construído um laboratório que será usado para ensaios de alta-tensão.

Nesse último caso citado, foram feitas aberturas na estrutura com as dimensões reais de portas e foi verificado o efeito nos valores da eficiência de blindagem.

1.2. DISPOSIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esse trabalho possui 5 capítulos e está dividido da seguinte forma:

- ✓ Capítulo 1: contêm a introdução trabalho ressaltando a sua importância científica e seus objetivos.
- ✓ Capítulo 2: Apresenta a teoria relacionada introduzindo os principais aspectos do método FDTD e do modelo de sub-célula.
- ✓ Capítulo 3: Apresenta uma breve teoria sobre blindagem eletromagnética e sobre o cálculo da eficiência de blindagem.
- ✓ Capítulo 4: Apresenta os resultados numéricos do teste de validação do ambiente e dos valores da eficiência de blindagem obtidos nas simulações.
- ✓ Capítulo 5: Apresenta as conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

TEORIA RELACIONADA

2.1. INTRODUÇÃO

Em 1966, foi introduzida por K. Yee uma técnica capaz de solucionar numericamente as equações acopladas de Maxwell, [11]. Nessa técnica, as componentes dos campos elétrico e magnético são distribuídas de forma geométrica em células, denominadas células de Yee, de forma a satisfazer as formas rotacional e integral dessas equações. Desta forma, nessa técnica, as componentes dos campos elétrico e magnético estão defasadas no tempo e no espaço de forma a satisfazerem as derivadas no tempo e no espaço.

Entretanto, a baixa capacidade computacional dos computadores da época aliada a inexistência de técnicas eficazes de truncagem do domínio de análise limitou a utilização do método. A fim de resolver o referido problema, foram desenvolvidas técnicas de truncagem, quais sejam: a técnica baseada nos operadores de Bayliss-Turkel [19], a técnica de Mür de primeira e segunda ordens [20], a técnica de Hidgon [21] e a técnica de Liao [22].

Essas técnicas de truncagem são conhecidas como ABC (*Absorbing Boundary Conditions*) e objetivam absorver ondas que incidem sobre as interfaces que limitam a região de análise simulando a propagação de ondas para o infinito, caracterizando a simulação de ambientes abertos (problemas de espalhamento).

Em [23], Berenger apresentou uma técnica baseada em camadas perfeitamente casadas (*PML – Perfect Matched Layers*),[24], sendo esta, umas das mais eficiente técnicas de truncagem da região de análise. Nesse trabalho, será explorada a técnica denominada UPML (*Uniaxial Perfectly Matched Layers*) implementada por Gedney [25], a qual deu à formulação de Berenger uma interpretação física.

Também será explorada, nesse trabalho, a técnica de Plano fino (*Thin Sheets*)[26],[14], modelo de Sub-célula, que possibilita a modelagem de estruturas finas. Essa técnica elimina a restrição do método FDTD no qual o incremento espacial deve ser tão pequeno quanto a menor dimensão física da estrutura que se quer modelar; sendo útil na modelagem de problemas de blindagem eletromagnética nos quais a estrutura a ser modelada é, em geral, constituída de materiais com espessuras extremamente pequenas em relação ao comprimento de onda de interesse.

Assim, nesse capítulo, será mostrado o embasamento teórico do método FDTD (algoritmo de Yee), do modelo de sub-célula para Plano Fino e, por fim, da técnica de truncagem por UPML.

2.2. O ALGORITMO DE YEE

As equações de Maxwell para um meio homogêneo, com perdas, no domínio do tempo, são dadas por:

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

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

onde \vec{H} representa o vetor intensidade de campo magnético (A/m), \vec{E} representa o vetor intensidade de campo elétrico (V/m), ε representa a permissividade elétrica (farads/m), μ representa a permeabilidade magnética (henrys/m) e \vec{J} o vetor densidade de corrente elétrica de condução (A/m^2), sendo $\vec{J} = \sigma \vec{E}$.

Expandindo-se as equações (2.1) e (2.2), obtêm-se as equações escalares mostradas abaixo. De (2.1), tem-se:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z. \quad (2.5)$$

De (2.2), tem-se:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} . \quad (2.8)$$

A lei de Ampere, equações (2.3)-(2.5), e a de Faraday, equações (2.6)-(2.8), em que as componentes dos campos elétrico e magnético são funções do tempo e do espaço (coordenadas x , y e z) são os pilares para a distribuição espacial e temporal dessas componentes de campo na denominada célula de Yee, Figura 2.1.

A célula de Yee é representada por arestas iguais a Δx , Δy e Δz e possibilita a discretização do espaço de análise, sendo este, o primeiro passo para a solução de um problema numericamente. Essa célula contém as componentes dos campos distribuídas espacialmente podendo ser localizadas através dos índices i , j , k , Figura 2.1. A notação da célula de Yee para a localização de um ponto é a seguinte:

$$(x, y, z) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) = (i, j, k) . \quad (2.9)$$

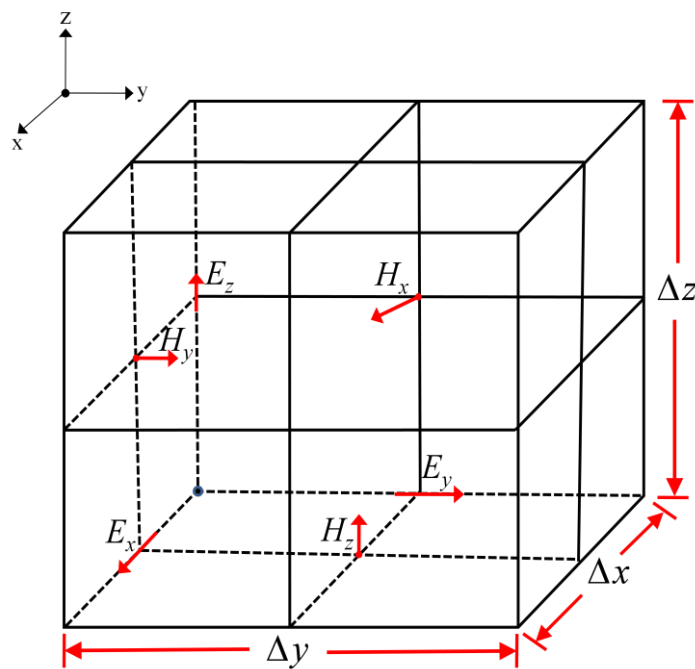


Figura 2.1: A célula de Yee.

O segundo passo para a solução do problema consiste em identificar as equações que regem o problema e transcrevê-las para a forma de diferenças finitas. A transcrição é feita através da equação (2.10), utilizando derivadas centradas:

$$f'(x) \cong \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (2.10)$$

Como exemplo, a seguir, mostram-se as equações (2.5) e (2.8) na forma das diferenças finitas em (2.11) e (2.12), utilizando o conceito de diferenças centradas.

$$\begin{aligned} & \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k)}{\Delta y} \\ &= \varepsilon \frac{E_z^{n+1}(i, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta t} + \sigma \frac{E_z^{n+1}(i, j, k) + E_z^n(i, j, k)}{2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

e

$$\begin{aligned} & \frac{E_y^{n+1}(i+1, j, k) - E_y^{n+1}(i, j, k)}{\Delta x} - \frac{E_x^{n+1}(i, j+1, k) - E_x^{n+1}(i, j, k)}{\Delta y} \\ &= -\mu \frac{H_z^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2.12)$$

respectivamente. As demais equações podem ser obtidas de forma semelhante.

2.3. PRECISÃO, ESTABILIDADE E DISPERSÃO NUMÉRICA

A precisão é a garantia que os resultados numéricos são bem próximos dos valores exatos. As aproximações numéricas que caracterizam o método FDTD necessitam de alguns critérios que garantam a convergência do método para a solução exata. No método FDTD as características dos incrementos espaciais, Δx , Δy e Δz , associados ao incremento temporal Δt é que garantem a estabilidade do método para a solução exata.

Em [27] é estabelecido que para garantir a estabilidade numérica, de forma geral, a Condição de Courant deve ser obedecida, qual seja:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{max} \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.13)$$

Se as células forem cúbicas, tem-se:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{c\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

A dispersão numérica é uma manifestação física espúria devido a diferença entre a velocidade de fase dos modos propagantes e a velocidade da luz que limita o tamanho da célula. Dessa forma, é estabelecido em [28] que os incrementos espaciais Δx , Δy e Δz , devem ser no máximo iguais a décima parte do comprimento de onda da maior frequência significativa (λ_{\min}), ou seja:

$$\Delta_{x,y,z} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (2.15)$$

Vale ressaltar que valores de $\Delta_{x,y,z}$ da ordem de $\frac{\lambda_{\min}}{100}$ é conveniente na solução de alguns tipos de problemas.

2.4. O MODELO DE SUB-CÉLULA PARA PLANOS FINOS

O modelo de sub-célula para a modelagem de planos finos elimina a restrição do método FDTD na qual o menor incremento espacial da malha deve ser menor ou igual a menor dimensão física da estrutura a ser modelada. A eliminação dessa restrição permite a redução da quantidade de dados a serem armazenados e dos passos de tempo necessários para que a condição de estabilidade seja atingida, [9].

Todavia, com a presente formulação (representação por sub-células) [10], é possível levar em conta apenas o menor comprimento de onda propagante para determinar o incremento espacial, reduzindo-se substancialmente os requisitos computacionais, tais como, velocidade de processamento e memória.

A Figura 2.2 ilustra a diferença entre a modelagem pelo método FDTD original (Figura 2.2(a)), e o modelo de sub-célula (Figura 2.2(b)). As Figuras 2.2(a) e 2.2(b) representam uma mesma região. No caso da Figura 2.2(b), verifica-se que é necessário um número menor de células, mas o plano fino precisa de uma formulação especial para ser modelado, o que não é necessário no caso da Figura 2.2(a).

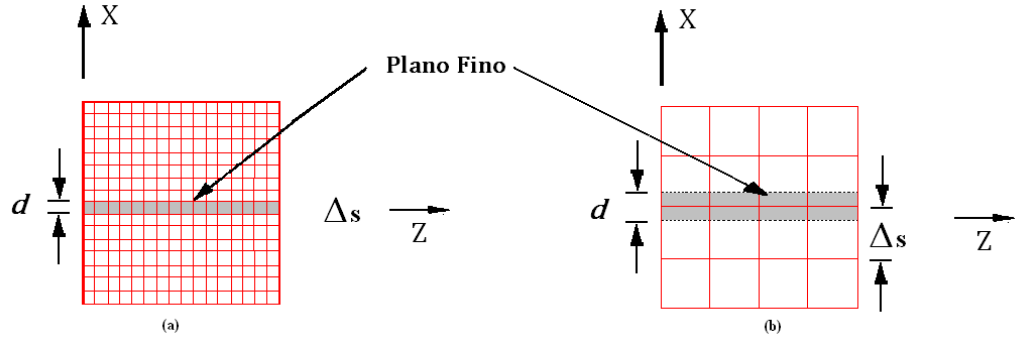


Figura 2.2: Comparação entre as malhas espaciais: a) FDTD tradicional, b) Modelo de sub-celular.

Problemas práticos de blindagem envolvem chapas de aço com espessuras da ordem de micrometros e domínios com dimensões da ordem de vários metros, justificando a necessidade deste tipo de formulação matemática.

Para implementar os planos finos em nível de sub-células, é necessário introduzir modificações nas equações de atualização dos campos contidos nas células que contém os planos finos, as quais chamaremos, nesse trabalho, de células especiais. Desta forma, considere um plano fino com espessura d composto por um material com os seguintes parâmetros: σ_s , ϵ_s , μ_s . Tal placa está no espaço livre (ϵ_0 , μ_0), tal como ilustra a Figura 2.3.

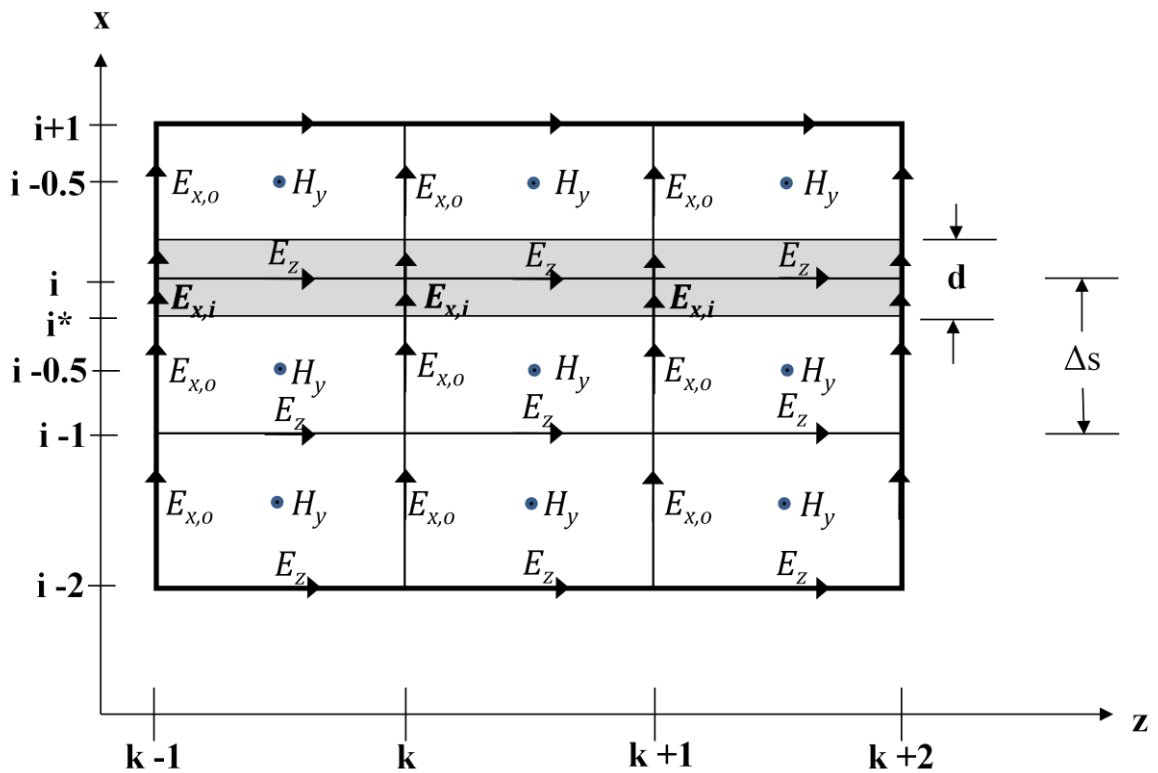


Figura 2.3: Modelo de uma malha retangular mostrando a localização dos campos e o plano fino

Nas células especiais a componente de campo elétrico normal ao plano, E_x , está dividida em duas partes: $E_{x,i}$ e $E_{x,o}$, já que as características elétricas são diferentes dos valores dos parâmetros elétricos do espaço livre. As componentes tangenciais de campo, tais como, E_y , E_z , H_y e H_z , não são divididas, pois são contínuas através do contorno do material. A componente normal do campo magnético, H_x também é dividida em duas partes: $H_{x,o}$ e $H_{x,i}$, já que, de uma forma geral, $\mu_s > \mu_0$. Para as componentes normais ao plano (H_x e E_x), os índices i e o indicam, respectivamente, interno (*in*) e externo (*out*), em relação ao plano fino.

As atualizações das equações para as células especiais são obtidas a partir das equações de Maxwell na forma integral (2.16) e (2.17).

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \right) \cdot d\vec{S} \quad (2.16)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.17)$$

Considere a componente $E_{x,o}$ no ponto (i, j, k) . Observe que a componente H_y em $(i, j, k-1)$ e (i, j, k) , tal como a componente H_z em (i, j, k) e $(i, j-1, k)$, não mostradas na Figura 2.3, estão em um caminho retangular fechado em torno da componente $E_{x,o}$ e que, além disso, não contêm o plano fino do material. Assim, a atualização da componente $E_{x,o}$ é a mesma utilizada para as células do FDTD usual, ou seja:

$$\begin{aligned} E_{x,o}^{n+1}(i, j, k) &= E_{x,o}^n(i, j, k) \\ &- \frac{\Delta t}{\epsilon_0} \left[\frac{H_z^{n+0.5}(i, j, k) - H_z^{n+0.5}(i, j-1, k)}{\Delta y} \right. \\ &\quad \left. - \frac{H_y^{n+0.5}(i, j, k) - H_y^{n+0.5}(i, j, k-1)}{\Delta z} \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Agora, considere a componente $E_{x,i}$ no ponto (i, j, k) , as componentes utilizadas para atualizá-la, H_y e H_z , são as mesmas que atualizaram a componente $E_{x,o}$ (o campo magnético

tangencial é contínuo através da interface entre os meios). Entretanto, a região fechada está dentro do plano do material. Assim, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
E_{x,i}^{n+1}(i, j, k) &= \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_s}{2\varepsilon_s}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_s}{2\varepsilon_s}} \right) E_{x,i}^n(i, j, k) \\
&+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_s}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_s}{2\varepsilon_s}} \right) \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \left[\frac{H_z^{n+0.5}(i, j, k) - H_z^{n+0.5}(i, j - 1, k)}{\Delta y} \right. \\
&\left. - \frac{H_y^{n+0.5}(i, j, k) - H_y^{n+0.5}(i, j, k - 1)}{\Delta z} \right]
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Destaca-se que a equação acima é simplesmente a equação usual do método FDTD para a componente x do campo elétrico, com os parâmetros elétricos do meio material ε_s e σ_s .

Nesse momento, será mostrado como são obtidas as componentes de campo elétrico tangenciais ao plano (E_z, E_y). Considere a componente E_z no ponto (i, j, k); a componente H_y em ($i-1, j, k$) e (i, j, k), assim como, a componente H_x em ($i, j-1, k$) e (i, j, k), não mostrada na Figura 2.3, formam um caminho retangular fechado em torno do ponto que contém a componente E_z . No entanto, apenas, uma pequena parte da área limitada por este caminho, ($d/\Delta s$), corresponde ao plano fino do material. Então, obtém-se as equações para a componente E_z usando (2.16). Para isto, deve-se utilizar um esquema de médias ponderadas para os parâmetros elétricos e para compor H_x (que foi dividido em duas partes $H_{x,o}$ e $H_{x,i}$). Procedimento idêntico é feito para a componente E_y . Assim, tem-se:

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}(i, j, k) &= \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}} \right) E_z^n(i, j, k) \\
&+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{av}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}} \right) \left[\frac{H_y^{n+0.5}(i, j, k) - H_y^{n+0.5}(i - 1, j, k)}{\Delta x} \right. \\
&\left. - \frac{H_x^{n+0.5}(i, j, k) - H_x^{n+0.5}(i, j - 1, k)}{\Delta y} \right]
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j, k) &= \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}} \right) E_y^n(i, j, k) \\
&+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{av}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{av}}{2\varepsilon_{av}}} \right) \left[\frac{H_x^{n+0.5}(i, j, k) - H_x^{n+0.5}(i, j, k-1)}{\Delta z} \right. \\
&\left. - \frac{H_z^{n+0.5}(i, j, k) - H_z^{n+0.5}(i-1, j, k)}{\Delta x} \right]
\end{aligned} \tag{2.21}$$

na qual,

$$\varepsilon_{av} \equiv \left(1 - \frac{d}{\Delta x} \right) \varepsilon_0 + \left(\frac{d}{\Delta x} \right) \varepsilon_s \tag{2.22}$$

$$\sigma_{av} \equiv \left(\frac{d}{\Delta x} \right) \sigma_s \tag{2.23}$$

As equações de atualização para as componentes de campo magnético tangenciais ao plano (H_y, H_z) são obtidas da seguinte forma. Considere a componente H_y em (i, j, k) , a componente $E_{x,o}$ em (i, j, k) e $(i, j, k+1)$ e $E_{x,i}$ em (i, j, k) e $(i, j, k+1)$, assim como, a componente E_z em (i, j, k) e $(i+1, j, k)$ formam um caminho fechado em torno da componente H_y . Dessa forma, obtêm-se a equação d atualização para a componente H_y usando (2.17). De forma similar, segue-se o mesmo procedimento para a obtenção das componentes tangenciais do campo magnético H_z . Assim, tem-se:

$$\begin{aligned}
H_y^{n+0.5}(i, j, k) &= H_y^{n-0.5}(i, j, k) \\
&- \left(\frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x \Delta z} \right) \left[(\Delta x - d) \left(E_{x,o}^n(i, j, k+1) - E_{x,o}^n(i, j, k) \right) \right. \\
&+ d \left(E_{x,i}^n(i, j, k+1) - E_{x,i}^n(i, j, k) \right) - \Delta z \left(E_z^n(i+1, j, k) \right. \\
&\left. \left. - E_z^n(i, j, k) \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+0.5} = H_z^{n-0.5} & \\
& - \left(\frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x \Delta y} \right) \left[\Delta y \left(E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k) \right) \right. \\
& - (\Delta x - d) \left(E_{x,o}^n(i, j+1, k) - E_{x,o}^n(i, j, k) \right) \\
& \left. - d \left(E_{x,i}^n(i, j+1, k) - E_{x,i}^n(i, j, k) \right) \right] \quad (2.25)
\end{aligned}$$

2.5. TRUNCAGEM DO MÉTODO FDTD POR UPML

A utilização de técnicas numéricas requer a necessidade da truncagem da região de análise quando se trata de problemas abertos, ou seja, cujas ondas se propagam para o infinito. Assim, diversas técnicas de truncagem foram propostas, as mais eficientes são as conhecidas por ABC (*Absorbing Boundary Conditions*). A idéia principal dessas técnicas é criar uma câmara anecóica virtual capaz de absorver as ondas que chegam aos limites da região de análise simulando uma propagação para o infinito.

A técnica baseada em PML, camadas perfeitamente casadas com a região sob análise, foi desenvolvida por Berenger [23], cujo trabalho foi inspirado na proposta anterior publicada por Holand [29]. Para Holand, se a condição

$$\frac{\sigma_e}{\varepsilon} = \frac{\sigma_m}{\mu} \quad (2.27)$$

em que σ_e representa a condutividade elétrica e σ_m a condutividade magnética, for satisfeita, há o casamento de impedâncias e a onda é totalmente transmitida. No entanto, essa formulação só é válida para ondas incidentes normalmente à interface com o meio truncador.

Em 1994, a formulação publicada por Berenger eliminou a restrição existente na formulação anterior. A técnica proposta por Berenger era independente de fatores como ângulo de incidência, polarização e frequência da onda incidente na região de truncagem.

Em [25], Gedney publicou uma técnica que segue o mesmo padrão proposto por Berenger, no entanto, apresenta-se matematicamente mais simples. A técnica proposta por Gedney, a UPML- *Uniaxial Perfectly Matched Layers*, será mostrada a seguir.

Considere um meio anisotrópico. As equações de Maxwell, no domínio da frequência são mostradas a seguir:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \varepsilon [S] \vec{E} \quad (2.28)$$

$$\nabla_x \vec{E} = -j\omega\mu[S]\vec{H} \quad (2.29)$$

Em que ω representa a frequência angular, \vec{H} e \vec{E} são, respectivamente as transformadas de Fourier dos vetores intensidade de campo elétrico e intensidade de campo magnético e $[S]$ é o tensor que define a anisotropia uniaxial na região absorvente. O tensor $[S]$ é definido da seguinte forma:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{SySz}{Sx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{SxSz}{Sy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{SxSy}{Sz} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Substituindo (2.30) em (2.28) e (2.30) em (2.29), a Lei de Ámpere e a Lei de Faraday, respectivamente, são vistas da seguinte forma na UPML:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\varepsilon \frac{SySz}{Sx} E_x \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon \frac{SxSz}{Sy} E_y \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon \frac{SxSy}{Sz} E_z \quad (2.33)$$

e

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega \frac{SySz}{Sx} H_x \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega \frac{SxSz}{Sy} H_y \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega \frac{SxSy}{Sz} H_z \quad (2.36)$$

Sabendo-se que:

$$S_k = 1 + \frac{\sigma_k}{j\omega\epsilon_0}, \quad (2.37)$$

em que $k = x, y, z$.

Fazendo:

$$\epsilon \frac{S_z}{S_x} \mathbf{E}_x = \mathbf{D}_x, \quad (2.38)$$

$$\epsilon \frac{S_x}{S_y} \mathbf{E}_y = \mathbf{D}_y, \quad (2.39)$$

$$\epsilon \frac{S_y}{S_z} \mathbf{E}_z = \mathbf{D}_z, \quad (2.40)$$

e

$$\mu \frac{S_z}{S_x} \mathbf{H}_x = \mathbf{B}_x, \quad (2.41)$$

$$\mu \frac{S_x}{S_y} \mathbf{H}_y = \mathbf{B}_y, \quad (2.42)$$

$$\mu \frac{S_y}{S_z} \mathbf{H}_z = \mathbf{B}_z, \quad (2.43)$$

Substituindo (2.38), (2.39) e (2.40) em (2.31), (2.32) e (2.33) e (2.41), (2.42) e (2.43) em (2.34), (2.35) e (2.36), respectivamente, têm-se:

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} = j\omega S_y \mathbf{D}_x, \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} = j\omega \epsilon S_z \mathbf{D}_y, \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial y} = j\omega \epsilon S_x \mathbf{D}_z, \quad (2.46)$$

e

$$\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} = -j\omega S_y \mathbf{B}_x, \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{E}z}{\partial x} = -j\omega S_z \mathbf{B}y, \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{E}x}{\partial y} = -j\omega S_x \mathbf{B}z. \quad (2.49)$$

Substituindo (2.37) em (2.44) e (2.41) em (2.47):

$$\frac{\partial \mathbf{H}z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{H}y}{\partial z} = j\omega \mathbf{D}x + \frac{\sigma_y}{\epsilon} \mathbf{D}x \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{E}y}{\partial z} = -j\omega \mathbf{B}x - \frac{\sigma_y}{\epsilon} \mathbf{B}x \quad (2.51)$$

Transformando as equações (2.50) e (2.51), respectivamente, para o domínio do tempo, têm-se:

$$\frac{\partial \mathbf{H}z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{H}y}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{D}x}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\epsilon} \mathbf{D}x \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}y}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{E}z}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{B}x}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\epsilon} \mathbf{B}x \quad (2.53)$$

Discretizando-se as equações (2.52) e (2.53) utilizando o método FDTD, obtêm-se:

$$\begin{aligned} & \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1)}{\Delta z} \\ & = \frac{D_x^{n+1}(i, j, k) - D_x^n(i, j, k)}{\Delta t} + \frac{\sigma_y D_x^{n+1}(i, j, k) + D_x^n(i, j, k)}{2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} & \frac{E_y^{n+1}(i, j, k+1) - E_y^{n+1}(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^{n+1}(i, j+1, k) - E_z^{n+1}(i, j, k)}{\Delta y} \\ & = \frac{B_x^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) - B_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} + \frac{\sigma_y B_x^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) + B_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)}{2} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Arrumando as equações (2.54) e (2.55), têm-se:

$$\begin{aligned}
D_x^{n+1}(i, j, k) &= D_x^n(i, j, k) \left[\frac{2\varepsilon - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_y \Delta t} \right] \\
&+ \frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_y \Delta t} \left(\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k)}{\Delta y} \right. \\
&\left. - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1)}{\Delta z} \right)
\end{aligned} \tag{2.56}$$

$$\begin{aligned}
B_x^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) &= B_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \left[\frac{\frac{1}{\Delta t} - \frac{\sigma_y}{2\varepsilon}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_y}{2\varepsilon}} \right] \\
&+ \frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_y \Delta t} \left(\frac{E_y^{n+1}(i, j, k+1) - E_y^{n+1}(i, j, k)}{\Delta z} \right. \\
&\left. - \frac{E_z^{n+1}(i, j+1, k) - E_z^{n+1}(i, j, k)}{\Delta y} \right)
\end{aligned} \tag{2.57}$$

Das equações (2.38) e (2.41), têm-se, respectivamente:

$$\varepsilon S_z \mathbf{E} \mathbf{x} = S_x \mathbf{D} \mathbf{x} \tag{2.58}$$

$$\mu S_z \mathbf{H} \mathbf{x} = S_x \mathbf{B} \mathbf{x} \tag{2.59}$$

Substituindo (2.38) em (2.58) e (2.41) em (2.59), têm-se:

$$\varepsilon \left(j\omega \mathbf{E} \mathbf{x} + \frac{\sigma_z}{\varepsilon} \mathbf{E} \mathbf{x} \right) = j\omega \mathbf{D} \mathbf{x} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon} \mathbf{D} \mathbf{x} \tag{2.60}$$

$$\mu \left(j\omega \mathbf{H} \mathbf{x} + \frac{\sigma_z}{\varepsilon} \mathbf{H} \mathbf{x} \right) = j\omega \mathbf{B} \mathbf{x} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon} \mathbf{B} \mathbf{x} \tag{2.61}$$

Transformando as equações (2.60) e (2.61) para o domínio do tempo e, em seguida discretizando-as para o método das diferenças finitas no domínio do tempo, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i, j, k) &= E_x^n(i, j, k) \left[\frac{\frac{\varepsilon}{\Delta t} - \frac{\sigma_z}{2}}{\frac{\varepsilon}{\Delta t} + \frac{\sigma_z}{2}} \right] + D_x^{n+1}(i, j, k) \left[\frac{\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_x}{2\varepsilon}}{\frac{\varepsilon}{\Delta t} + \frac{\sigma_z}{2}} \right] \\
&\quad - D_x^n(i, j, k) \left[\frac{\frac{1}{\Delta t} - \frac{\sigma_x}{2\varepsilon}}{\frac{\varepsilon}{\Delta t} + \frac{\sigma_z}{2}} \right]
\end{aligned} \tag{2.62}$$

$$\begin{aligned}
H_x^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) &= H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \frac{\left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{\sigma_z}{2\varepsilon} \right]}{\left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_z}{2\varepsilon} \right]} \\
&\quad + \frac{1}{\mu \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_z}{2\varepsilon} \right]} \left\{ B_x^{n+\frac{3}{2}}(i, j, k) \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_x}{2\varepsilon} \right] - B_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{\sigma_x}{2\varepsilon} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.63}$$

As demais equações de atualização de Campo Elétrico e as de Campo Magnético podem ser obtidas de forma similar.

CAPÍTULO 3

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

3.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de forma coerente de equipamentos eletrônicos, tais como, celular, eletrodomésticos, televisão, rádio, dentre outros, tem aumentado a emissão de radiofrequências e, conseqüentemente, as fontes de interferências [30]. Para que a interferência causada por tais equipamentos não venha a prejudicar o funcionamento de dispositivos eletrônicos devem ser usadas técnicas de controle para torná-los compatíveis eletromagneticamente.

Três técnicas básicas de controle podem ser utilizadas em conjunto, ou separadamente, para que se consiga controlar ou suprimir a interferência eletromagnética [31]. São elas: aterramento, filtragem e blindagem.

O primeiro consiste em estabelecer um caminho condutor de eletricidade que assegure uma continuidade elétrica, [32]. O segundo, filtragem, é a técnica que reduz a interferência através de um desvio do sinal interferente por meio de capacitores [33]. E por fim, a blindagem, que é utilizada no domínio do espaço a fim de reduzir ou conter interferências, a qual será o principal objeto de estudo desse trabalho [34].

Assim, a blindagem eletromagnética é utilizada para reduzir a emissão de sinais indesejáveis ou para aumentar a imunidade de equipamentos eletrônicos, [35]. O parâmetro para verificar o quão útil está sendo uma blindagem é denominado Eficiência de Blindagem e é definido como a razão entre as amplitudes dos campos elétricos ou magnéticos na ausência e na presença da estrutura blindada, [7].

Neste capítulo, serão abordados os conceitos introdutórios sobre blindagem eletromagnética, bem como, as definições para o cálculo da Eficiência de Blindagem considerando fonte de campos próximos, fontes de campo distantes e aberturas.

3.2. BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Blindagem é a técnica utilizada para conter ou reduzir a interferência radiada formando uma barreira para impedir a transmissão de campos eletromagnéticos. Pode ser utilizada para atender, de forma geral, a duas propostas distintas, [1]:

1^a) Para impedir que as emissões provocadas por um produto ultrapassem os limites físicos do mesmo, confinando-as em uma região específica do espaço, Figura 3.1, evitando que o referido produto cause interferência em outros equipamentos.

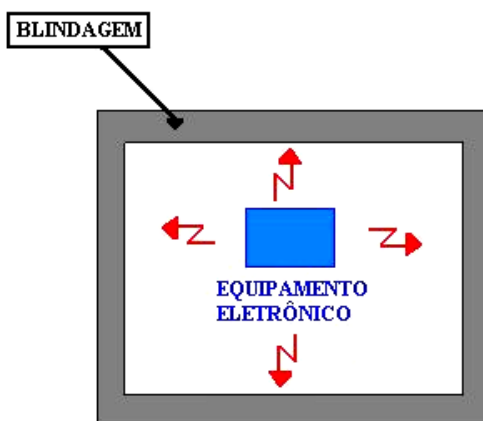


Figura 3.1: Blindagem utilizada para conter emissão radiada.

2^a) Para evitar que emissões radiadas externas penetrem em uma determinada região e/ou equipamento causando interferência, Figura 3.2.

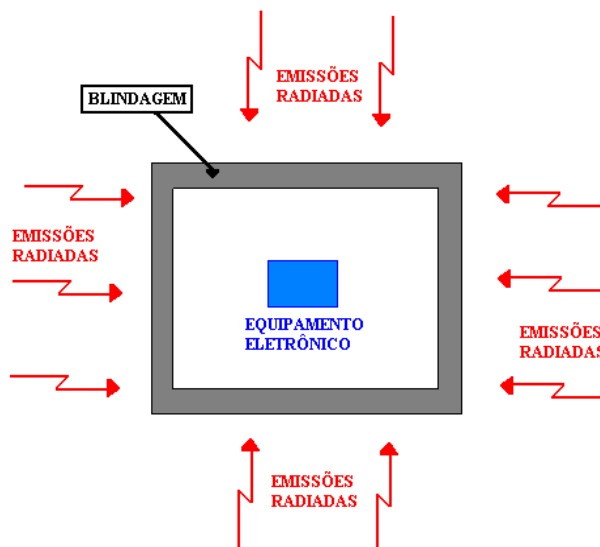


Figura 3.2: Blindagem utilizada para evitar que emissões externas cheguem aos equipamentos.

O tipo de blindagem é escolhido de acordo com o objetivo proposto ou o uso do equipamento a ser blindado. Blindagem de alto desempenho é requerida quando equipamentos muito sensíveis devem ser protegidos; em outros casos, blindagens moderadas podem ser adequadas para controlar o ambiente eletromagnético [9].

Uma grande variedade de tipos de blindagens pode ser utilizada para controlar o ambiente de teste. As blindagens mais comuns são aquelas feitas por metal forrado, pré-fabricado ou soldado. Esses tipos de materiais podem ser utilizados, em geral, da seguinte forma, nas construções de estruturas blindadas, [9]:

- ✓ Painéis de madeira compensadas laminadas em um ou ambos os lados com metal galvanizado são comumente usados em estruturas pré-fabricadas. Outros metais, tais como folha ou tela de cobre, são também utilizados de forma similar.
- ✓ Várias espessuras de metal são soldadas sobre a estrutura de suporte de aço.
- ✓ Folhas de alumínio são instaladas com adesivo de contato.
- ✓ Folha de cobre com um papel forrado, que é colocado com um papel adesivo ou com um apoio de material de cobre, pode ser utilizado da mesma forma como é feito para um sistema de blindagem simples.
- ✓ A blindagem de cobre é montada com pregos de madeira e pontos de solda.
- ✓ Metal galvanizado é montado em paredes de madeira compensada.
- ✓ Uma combinação entre os diversos usos citados acima é usado para aplicações especializadas.

Uma estrutura blindada deve assegurar que a entrada de equipamentos e pessoas, ventilação e aquecimento, portas e janelas, ou seja, a presença de aberturas não degrade o seu desempenho e a Eficiência de Blindagem. Além disso, a estrutura deve possuir um bom projeto de aterramento e de proteção contra incêndio.

3.3. EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM

Quando uma onda incide sobre uma barreira parte da energia é refletida e parte é transmitida o que gera perdas por reflexão, absorção e, também, por múltiplas reflexões que ocorrem entre o meio e a barreira de blindagem. Assim, o cálculo da Eficiência de Blindagem (EB, dB) pode ser feito conforme a equação (3.1):

$$EB_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \quad (3.1)$$

Onde: R – perdas por reflexão.

A – perdas por absorção.

M – efeitos adicionais das múltiplas reflexões e transmissões.

De forma geral, a Eficiência de Blindagem (EB), em dB, é definida como a razão da magnitude entre o campo elétrico (ou magnético) incidente em um espaço sem a blindagem e a magnitude do campo elétrico (ou magnético) incidente em um espaço com a blindagem, ambos capturados no mesmo ponto do espaço, como pode ser visto na equação (3.2):

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{E_0}{E_S} \right) \quad (3.2)$$

Da mesma forma para campos Magnéticos, equação (3.3):

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{H_0}{H_S} \right) \quad (3.3)$$

Onde: E_0, H_0 – amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, na ausência da blindagem.

E_S, H_S – amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, na presença da blindagem.

As definições para o cálculo da Eficiência de Blindagem para campos elétricos e magnéticos são idênticas quando a onda incidente é plana e os meios nos dois lados são idênticos, pois os campos elétricos e magnéticos estão relacionados a impedância intrínseca

do meio. No entanto, para regiões de campo próximo e/ou meios diferentes, as equações mostradas acima não são idênticas. Assim, nos próximos tópicos essas equações serão mostradas considerando regiões de campo próximo e distante, as demonstrações das mesmas podem ser encontradas em [8] e não serão tratadas nesse trabalho.

3.3.1. Eficiência de Blindagem – Fontes de Campo Distante

Para esse caso será considerado que a fonte está suficientemente distante e que consiste em uma fonte de Onda Plana, ou seja, possui a mesma magnitude E (ou H) ao longo de qualquer plano transversal.

A equação (3.4) mostra a equação exata para o cálculo da Eficiência de Blindagem (EB, em dB), para esse caso [1].

$$EB_{dB} = \underbrace{20 \log_{10} \left| \frac{n_0}{4\hat{n}} \right|}_{R_{dB}} + \underbrace{20 \log_{10} e^{\frac{t}{\delta}}}_{A_{dB}} + M_{dB} \quad (3.4)$$

Onde:

$$M_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{n_0 - \hat{n}}{n_0 + \hat{n}} \right)^2 e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-j2\beta t} \right| \cong 20 \log_{10} \left| 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-\frac{j2t}{\delta}} \right| \quad (3.5)$$

Em que: n_0, \hat{n} – impedância intrínseca do espaço livre e do condutor, respectivamente.

t – espessura do condutor

δ – profundidade de penetração (*skin depth*)

β – constante de propagação.

As perdas por múltiplas reflexões (M_{dB}) podem ser eliminadas quando: as blindagens são construídas com bons condutores, $\hat{n} \ll n_0$ e as espessuras dos condutores são muito maiores que o *skin depth* ($t \gg \delta$). Essas perdas são, aproximadamente, iguais a zero quando $t \gg \delta$; e são negativas quando $t \ll \delta$.

É importante destacar, que para fontes de campos distantes o mecanismo de blindagem predominante, em baixas frequências, é a perda por reflexão, e em altas frequências, o mecanismo predominante é a perda por absorção.

3.3.2. Eficiência de Blindagem – Fontes de Campo Próximo

Para campos próximos a técnica de blindagem dependerá do tipo de fonte a ser utilizada: fonte de campo elétrico ou fonte de campo magnético. Fontes de campo próximo possuem mais componentes de campo que as de campo distante e não variam, simplesmente, com o inverso da distância, mas dependem desse fator. Para fontes de campo próximo, o campo elétrico é proporcional a $1/r^3$ e o campo magnético a $1/r^2$, onde r é a distância da fonte até a blindagem.

Considerando-se fontes de campo Elétrico, a perda por absorção não é afetada, sendo que, a perda por reflexão ($R_{e,dB}$), para um bom condutor, pode ser aproximada de acordo com a equação (3.6) [1].

$$R_{e,dB} = 322 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right), \quad (3.6)$$

onde f é a frequência.

Para fontes de campo magnético, a perda por absorção, também, não sofre alterações. A perda por reflexão é dada, de acordo, com a equação (3.7).

$$R_{m,dB} = 14.57 + 10 \log_{10} \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad (3.7)$$

Destaca-se que para fontes de campo Elétrico, campo próximo, o mecanismo de blindagem predominante, em baixas frequências, é a perda por reflexão e, para altas frequências, a perda por absorção. Para as fontes de campo magnético, campo próximo, o mecanismo predominante é a perda por absorção em todas as frequências. Entretanto, as perdas por reflexão e absorção são bastante pequenas, em baixas frequências.

3.4. EFEITO DAS ABERTURAS

Em situações práticas, é, praticamente, impossível evitar a existência de aberturas em estruturas blindadas. Um dos usos mais comuns é a utilização de aberturas para ventilação, portas e janelas.

As aberturas em estruturas blindadas podem ser protegidas pelo uso do princípio do guia de onda operando abaixo da frequência de corte. A atenuação de um guia de onda retangular para modos de alta ordem podem ser computadas determinando a sua constante de atenuação efetiva que é dada por [1]:

$$\alpha_{mn} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2 - 1} \quad (3.8)$$

Onde: $f_{c,mn}$ - frequência de corte de um modo particular.

Como a frequência da onda incidente é muito menor que a frequência de corte para o modo, a equação pode ser simplificada para:

$$\alpha_{mn} = \frac{2\pi f_{c,mn}}{c}, \quad (3.9)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo.

A atenuação de um guia de comprimento l é proporcional a $e^{-\alpha l}$. Então a atenuação ou a Eficiência de Blindagem em guia é dada por, considerando o modo de menor ordem TE_{10} :

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} e^{-\alpha l} \quad (3.10)$$

CÁPITULO 4

RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

A técnica de blindagem, atualmente, tem sido uma das soluções utilizadas para proteger o espaço físico de interesse de radiações indesejadas [1]. Para verificar o funcionamento de um sistema blindado um dos principais parâmetros utilizados é o cálculo da Eficiência de Blindagem [26].

Este capítulo mostra diferentes estruturas para as quais foram feitas as análises da Eficiência de Blindagem. Primeiramente, serão mostrados os parâmetros utilizados nas simulações, tais como, a fonte de excitação utilizada e a metodologia utilizada para o cálculo da Eficiência de Blindagem. Posteriormente, será mostrado o resultado do teste validação do ambiente *LANE SAGS* implementado com o modelo de sub-célula.

Para o estudo da Eficiência de Blindagem alguns casos foram analisados, sendo estes:

1. Caso 01: Variação das dimensões de uma caixa nas direções (x,y,z) contendo uma e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem.
2. Caso 02: Variação das dimensões da abertura de uma caixa blindada ao longo do comprimento (d_1) e da largura (d_2) e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem
3. Caso 03: Análise do espaçamento entre paredes duplas de uma caixa blindada sem abertura e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem
4. Caso 04: Variação da amplitude da fonte de excitação e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem
5. Caso 05: Variação da posição da abertura da caixa em relação a posição da fonte de excitação e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem.
6. Caso 06: Análise da Eficiência de Blindagem utilizando um laboratório de alta-tensão construído virtualmente com dimensões reais.

4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

4.2.1. Fonte de Excitação

A fonte de excitação utilizada foi um pulso gaussiano modificado, Figura. 4.1, excitado com uma onda plana paralela ao plano yz , *componente Ez*, com frequência máxima de 1GHz. Esse pulso foi obtido pela soma de um pulso gaussiano com a sua derivada (monociclo), de forma que o sinal resultante possui espectro significativo tanto em altas como em baixas frequências, na faixa de interesse. Ressalta-se que a fonte foi implementada tal como uma fonte de onda plana do tipo *Hard*, penetrando pela região absorvente UPML. A FIGURA 4.2, mostra o espectro da função utilizada no como fonte de excitação.

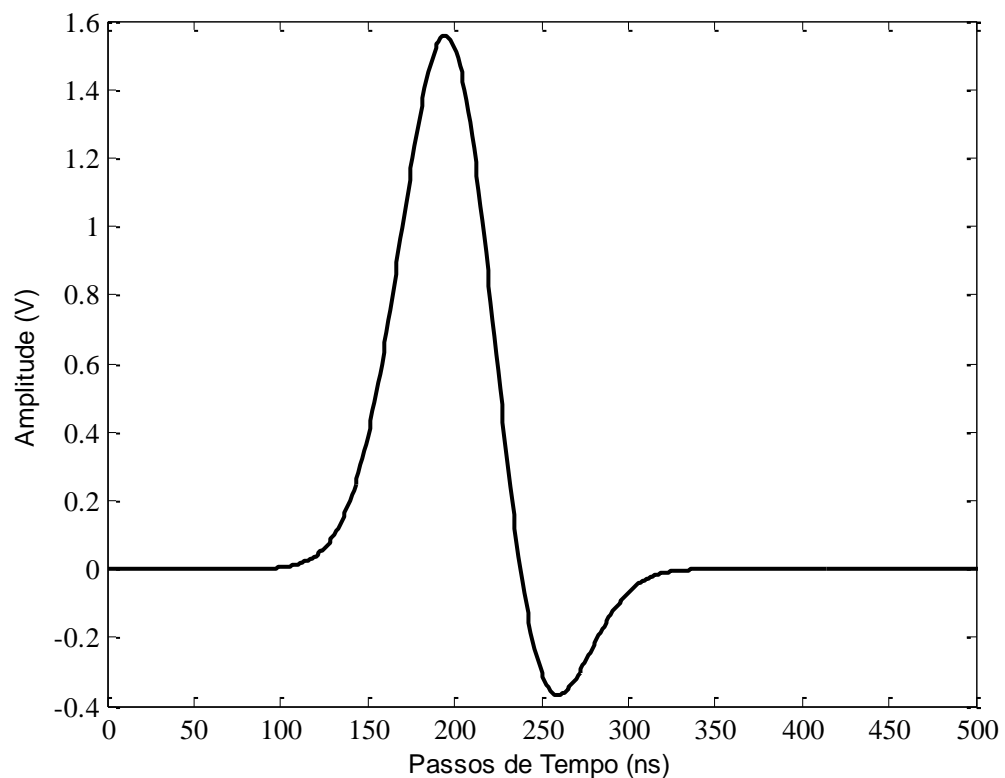


Figura. 4.1 : Função utilizada como fonte de Excitação (domínio do tempo)

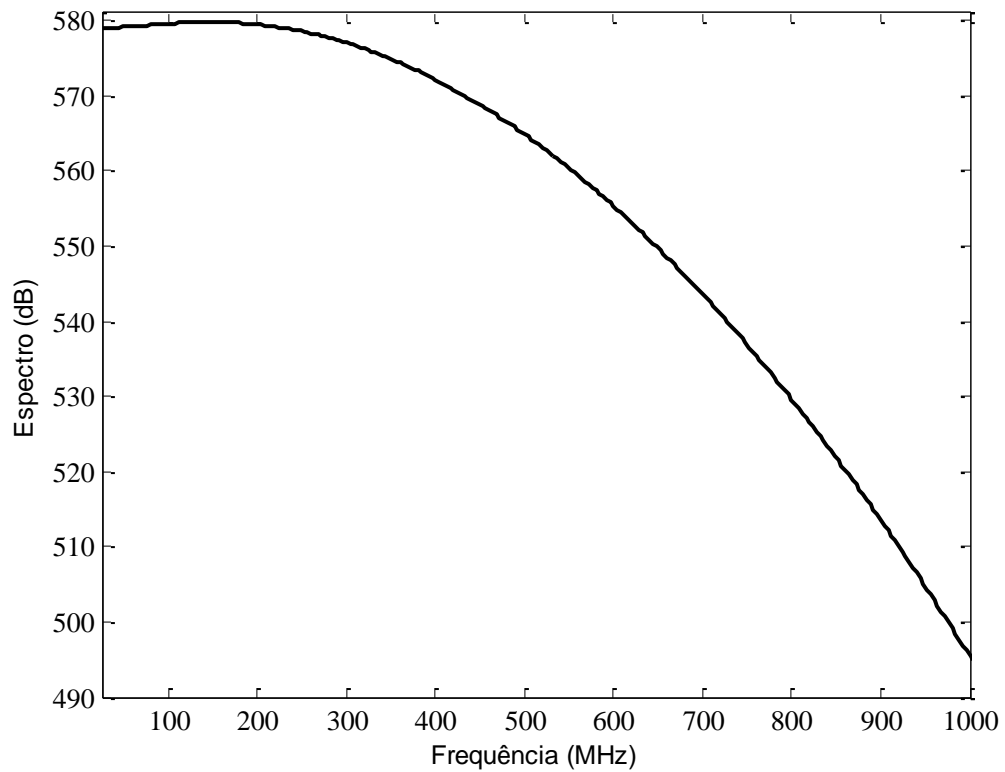


Figura. 4.2 : Função utilizada como fonte de Excitação (domínio da frequência)

4.2.2. Cálculo da Eficiência de Blindagem: Metodologia Utilizada

O sinal para o cálculo da Eficiência de Blindagem foi captado no *centro da caixa*, tanto na ausência quanto na presença da caixa blindada, obtendo-se dessa forma o valor da componente E_z do campo elétrico para os dois casos; para que, a partir de então, fosse feito o cálculo da transformada de Fourier (Filon) para possibilitar a análise do problema no domínio da frequência. Por fim, foi feita a aplicação da equação abaixo:

$$EB = 20 \log_{10} \left(\frac{E_0}{E_s} \right) \quad (4.1)$$

na qual E_0 representa a amplitude do sinal recebido sem a blindagem e E_s a amplitude do sinal recebido no interior da sala blindada (ambos no mesmo ponto do espaço), [1].

4.3. VALIDAÇÃO DO AMBIENTE *LANE SAGS* COM A IMPLEMENTAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE PLANO FINO

O ambiente *LANE SAGS* foi testado considerando a estrutura de uma caixa blindada com dimensões de 30x30x12 cm com uma abertura de 20x3 cm. O domínio de análise foi discretizado com células com arestas de 1 cm de comprimento.

O teste de validação foi feito para a banda de frequências de 100 a 1000MHz. De acordo com o artigo original [36], a parede da caixa deve possuir as seguintes características elétricas : $\mu=1000\mu_0$, $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m, $\epsilon=\epsilon_0$ e espessura de 80 μm . A Figura 4.3, abaixo, representa a estrutura utilizada para os testes e a Figura 4.4 mostra a estrutura implementada utilizando o ambiente *LANE SAGS*.

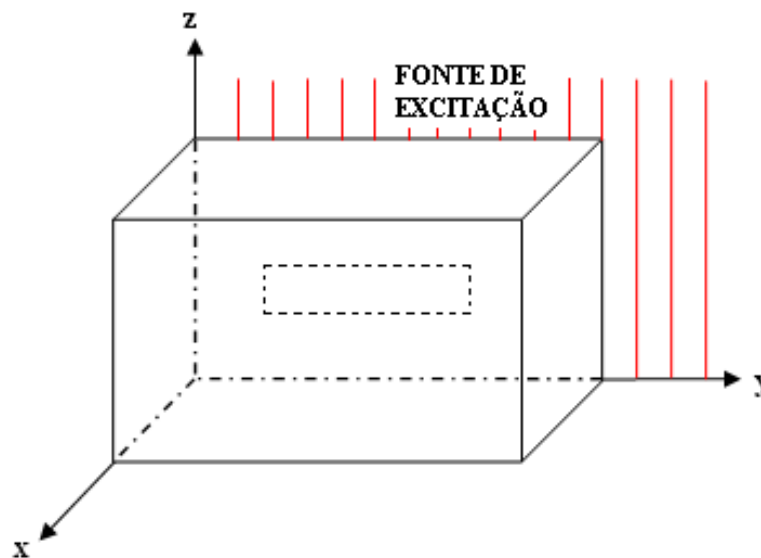


Figura 4.3: Estrutura de acordo com o artigo original, [36].

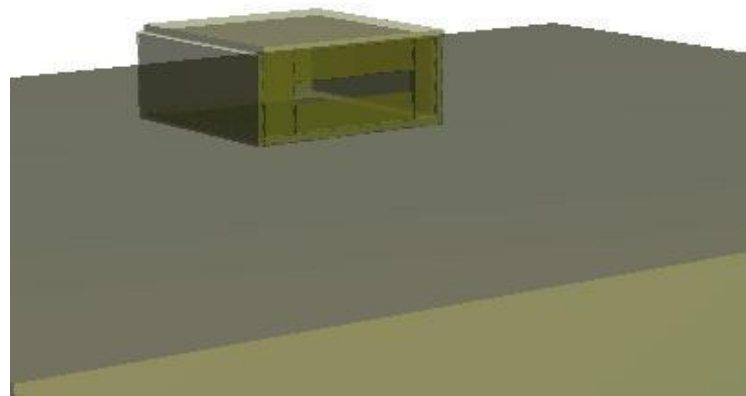
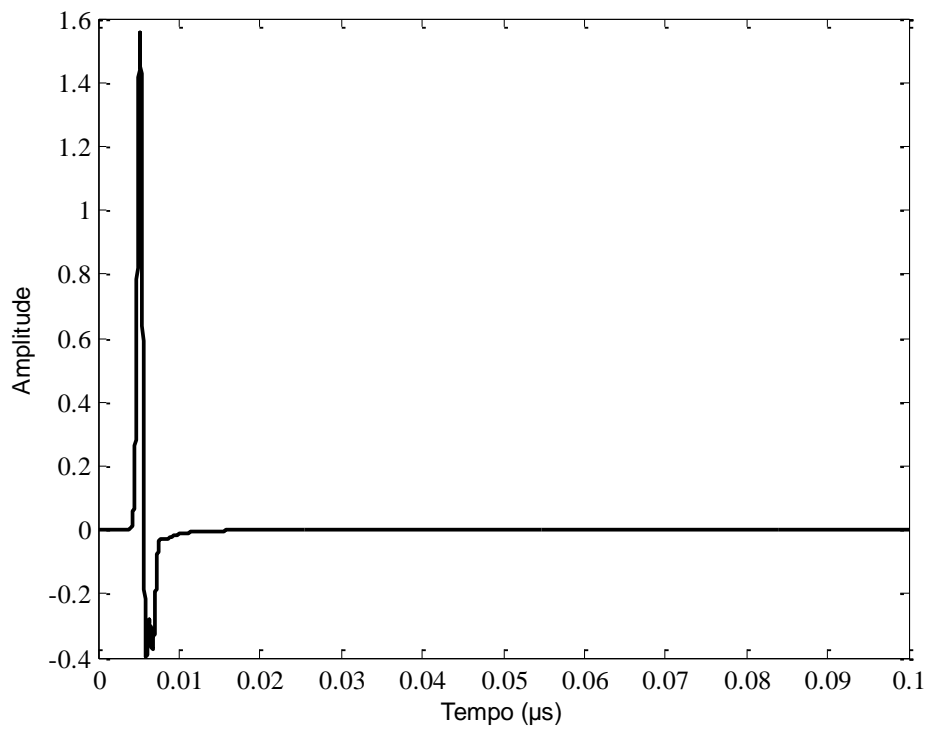
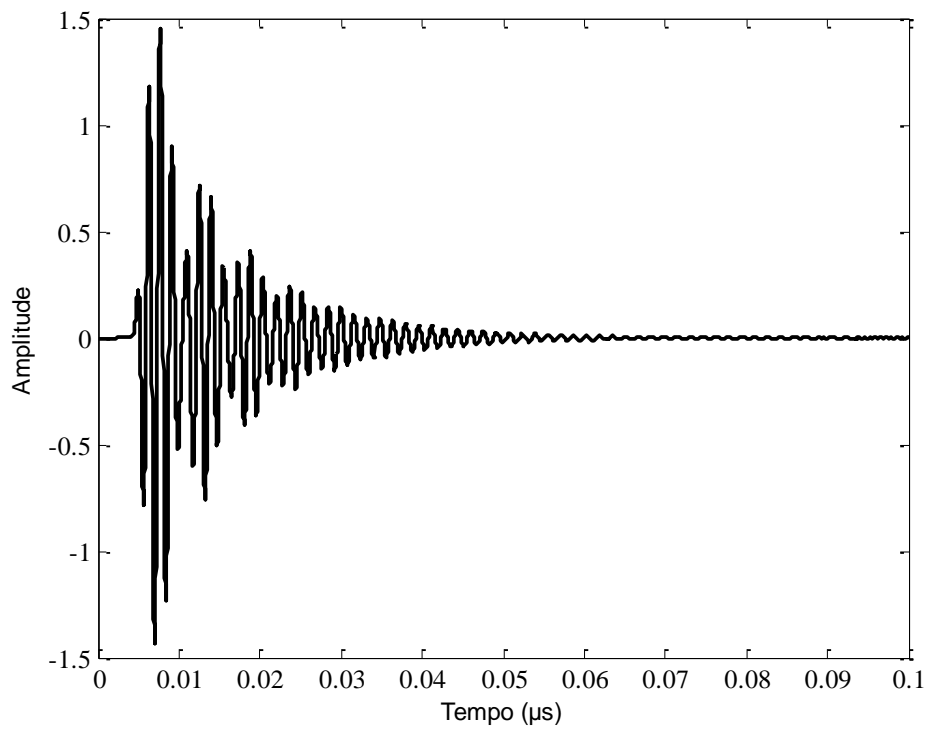


Figura 4.4 : Representação da Estrutura implementada no ambiente *LANE SAGS*

As Figuras 4.5a-b, abaixo, mostram o registro de tensão temporal na ausência e na presença da caixa blindada, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.5: Registro Temporal de Tensão no ponto de recepção: (a) Na ausência da caixa; (b) na presença da caixa.

A Figura 4.6, abaixo, mostra os resultados obtidos a partir da componente E_z do campo elétrico na ausência e presença da caixa, nas quais foi feito o cálculo da transformada de Fourier e, posteriormente, a equação (4.1); e a comparação deste com os resultados obtidos no artigo original, com resultados experimentais (medidos) e com a formulação analítica. O gráfico com a linha cheia em preto representa os resultados gerados através da versão do modelo de sub-célula implementada no ambiente *LANE SAGS*, o gráfico com quadrados na cor verde representa os resultados experimentais (medidos) e o gráfico com a linha cheia em vermelho representa o resultado obtido com a formulação analítica apresentados em [37] e o gráfico com a linha cheia em azul representa os dados apresentados no artigo de referência [36] com o modelo de subcélula.

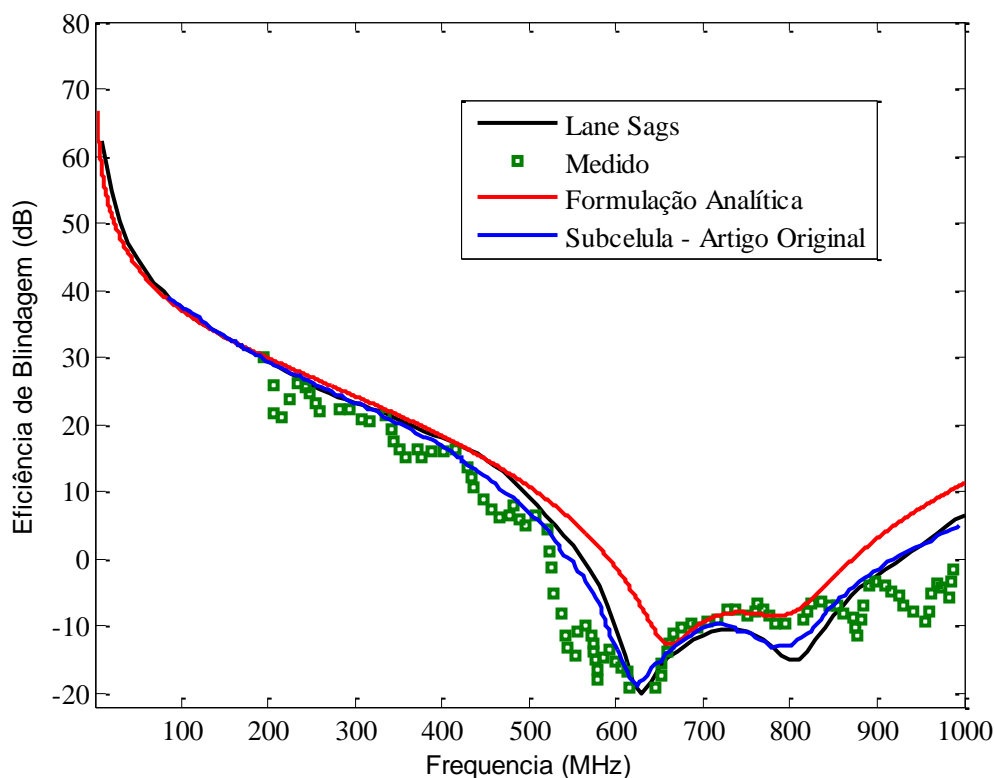


Figura 4.6: Gráfico que apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo de Sub-célula implementado no ambiente *LANE SAGS* e a comparação dos mesmos com os resultados apresentados em [36] e [37]

Pode-se observar através dos gráficos apresentados acima que os resultados obtidos com o ambiente *LANE SAGS* estão compatíveis com os dados apresentados no artigo original [36], validando a presente implementação; bem como, com os resultados obtidos experimentalmente e com a formulação analítica permitindo, dessa forma, a investigação de projetos de blindagem, com diferentes configurações, de forma precisa e confiável.

Além disso, se utilizarmos a equação abaixo, (4.2) [31], para obtenção da frequência de ressonância de cavidades ressonantes retangulares para o modo de mais baixa ordem, TM_{z110} será obtido o valor de, aproximadamente, 707 MHz que está bem próximo do valor da frequência de ressonância obtido nos resultados numéricos, Figura 4.6.

$$fr = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (4.2)$$

onde: m, n,p – modos ressonantes

a, b, c – dimensões da caixa nas direções x, y e z, respectivamente.

Além do teste de validação feito utilizando-se como fonte de excitação um pulso gaussiano somado com a sua derivada (monociclo); o teste de validação também foi realizado utilizando-se, apenas, um monociclo gaussiano como fonte de excitação, Figura. 4.7, o qual também apresentou uma boa concordância com o resultado apresentado no artigo original, [36], e com o resultado obtido utilizando-se um pulso gaussiano somado com a sua derivada.

A Figura 4.7, mostra em preto o gráfico obtido com o ambiente *LANE SAGS* utilizando um pulso gaussiano somado com a sua derivada como fonte de excitação, o gráfico em verde mostra o resultado obtido no artigo original, [36], e, finalmente, o gráfico com círculos em vermelho o gráfico obtido utilizando-se o ambiente *LANE SAGS* tendo como fonte de excitação um monociclo gaussiano.

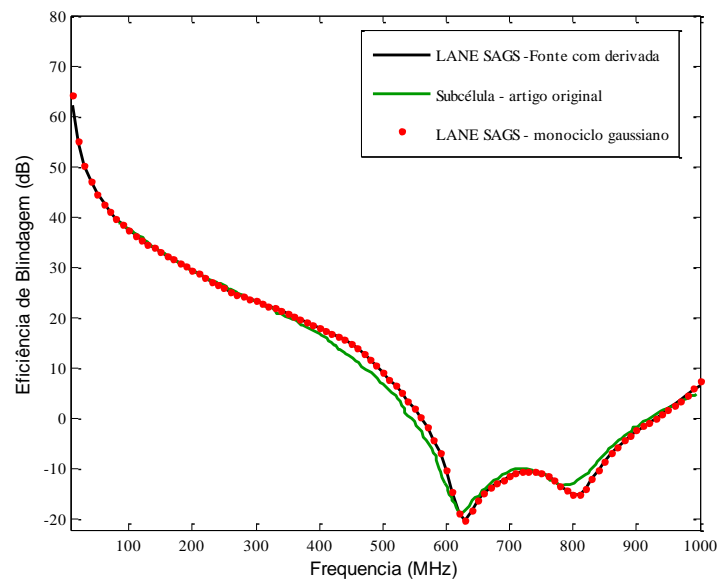


Figura 4.7: Gráfico que apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo de Sub-célula implementado no ambiente *LANE SAGS* utilizando-se diferentes fontes de excitação e a comparação dos mesmos com o resultado apresentado em [36].

4.4. ESTUDO DE CASOS

Nos casos analisados a seguir, as características elétricas do material foram as mesmas utilizadas no processo de validação do ambiente.

4.4.1. Caso 01: Variação das dimensões da caixa nas direções (x, y, z)

Para esse caso, foram feitas alterações ao longo das dimensões da caixa (x,y,z), Figura 4.2, sendo que, as dimensões da abertura foram mantidas constantes, ou seja, 20x3 cm. Considerando-se, apenas, a variação ao longo da dimensão-x, as dimensões utilizadas para a caixa foram: a) 30x30x12 cm, b) 40x30x12 cm e c) 50x30x12 cm. Para as variações ao longo da dimensão-y, as dimensões foram: d) 30x30x12 cm, e) 30x40x12 cm e f) 30x50x12 cm. Para a variação ao longo da coordenada z, as dimensões utilizadas foram: g) 30x30x12 cm, h) 30x30x24 cm e i) 30x30x36 cm.

Nas Figuras 4.8-4.10 abaixo, são mostrados os resultados obtidos em relação ao valor da Eficiência de Blindagem com os campos capturados no centro da caixa.

A Figura 4.8 mostra os resultados para a variação ao longo da dimensão-x: a linha em preto representa o resultado obtido para a caixa com as condições apresentadas em a); a linha em azul para a caixa com as condições apresentadas em b) e, por fim, a linha em vermelho representa a caixa com as condições apresentadas em c).

A Figura 4.9 mostra os resultados para a variação ao longo da dimensão-y: a linha em preto representa o resultado obtido para a caixa com as condições apresentadas em d); a linha em azul para a caixa com as condições apresentadas em e) e, por fim, a linha em vermelho representa a caixa com as condições apresentadas em f).

A Figura 4.10 mostra os resultados para a variação da caixa da dimensão-z: a linha em preto representa o resultado obtido para a caixa com as condições apresentadas em g); a linha em azul para a caixa com as condições apresentadas em h) e, por fim, a linha em vermelho representa a caixa com as condições apresentadas em i).

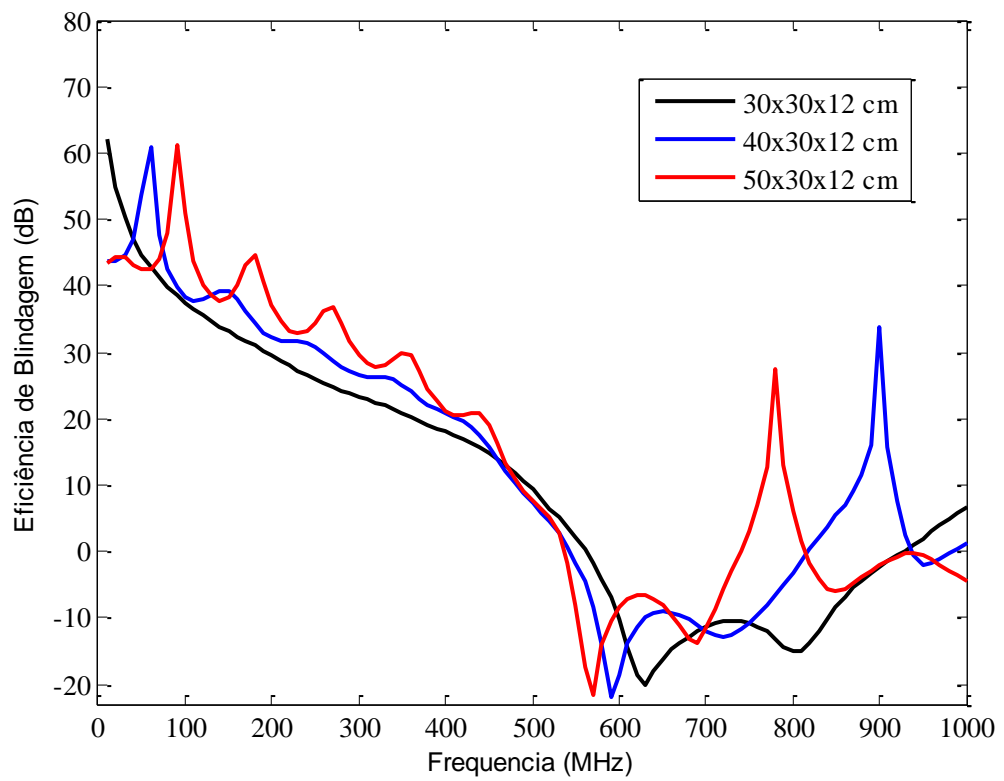


Figura 4.8: Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa: ao longo da direção x.

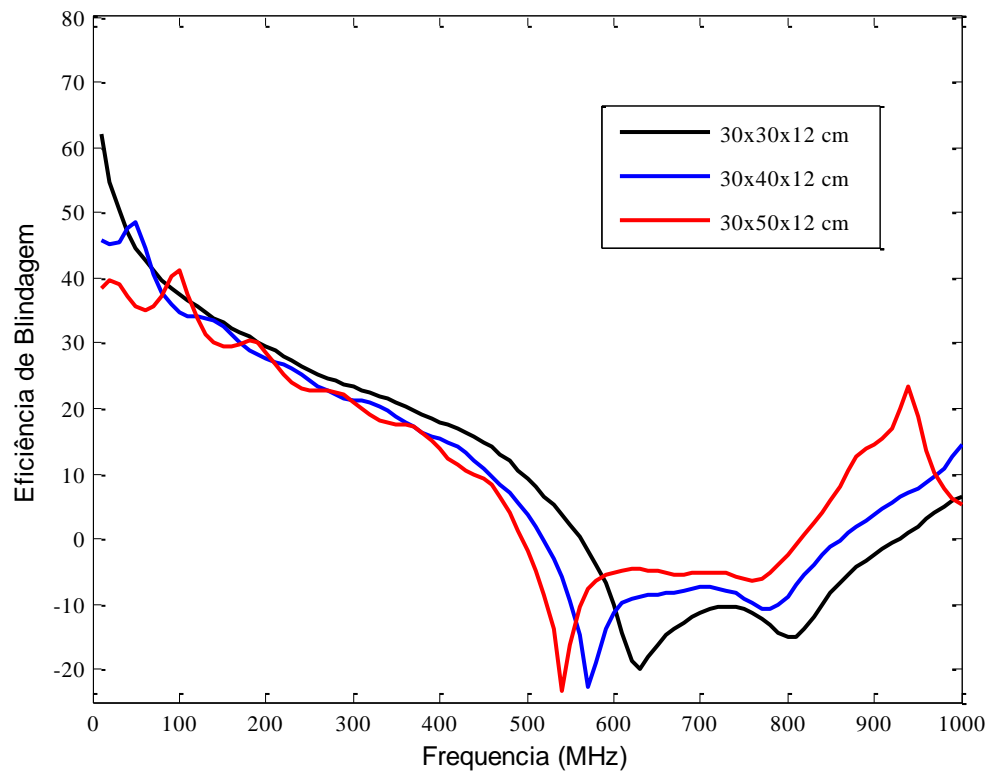


Figura 4.9: Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa: ao longo da direção y.

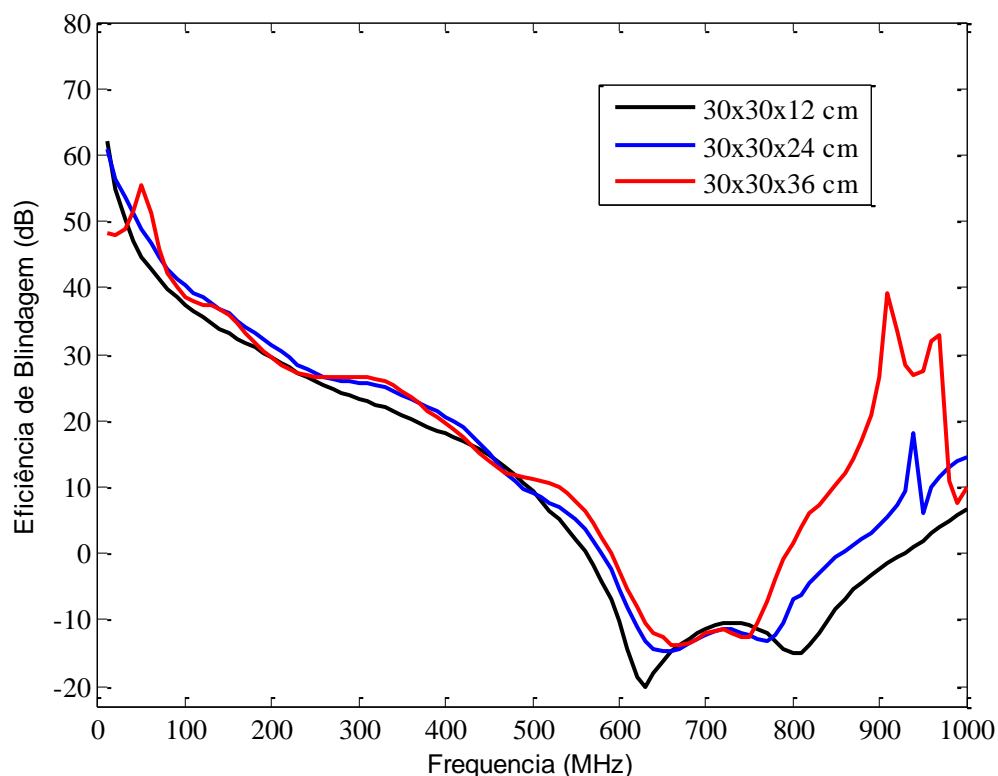


Figura 4.10: Gráfico da Eficiência de Blindagem com alterações nas dimensões da caixa: ao longo da direção z.

Das Figuras 4.8-4.9, pode-se observar que quando as dimensões-x e -y da caixa são aumentadas, a frequência de ressonância desloca-se para valores mais baixos. Por outro lado, quando a dimensão-z é aumentada, Figura 4.10, são observadas mudanças insignificantes na frequência de ressonância, pois a onda possui polarização-z; além disso, observa-se, também, que, para este caso, a Eficiência de Blindagem é menos afetada para baixas do que para altas frequências.

4.4.2. Caso 02: Variação das dimensões da abertura de uma caixa blindada ao longo do comprimento (d_1) e da largura (d_2) e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem

Para este caso, a abertura possui um comprimento d_1 e uma largura d_2 ; a Figura 4.11 mostra uma visão frontal da abertura com a indicação das dimensões. Na primeira situação analisada, a largura d_2 da abertura foi fixada com um tamanho de 20 cm e variou-se o comprimento d_1 para os valores de 3 cm, 5 cm e 7 cm. Na segunda situação, foi feito o processo inverso, ou seja, o comprimento d_1 foi fixado em 3 cm e a largura d_2 foi alterada para os valores de 16 cm, 18 cm e 20 cm.

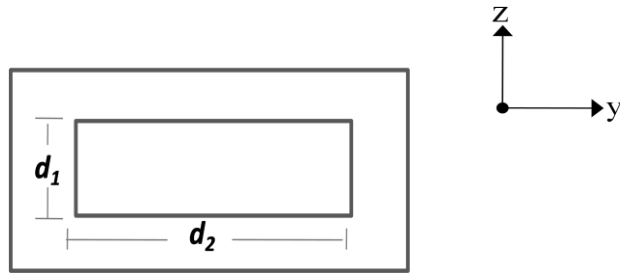


Figura 4.11: Visão frontal da caixa com a indicação da dimensão d_1 e d_2 .

A Figura 4.12, abaixo, mostra os resultados obtidos da forma descrita acima para diferentes valores de d_1 utilizados. A linha em preto mostra o resultado obtido para $d_1 = 3$ cm; a linha em azul para $d_1 = 5$ cm e a linha em vermelho para $d_1 = 7$ cm.

A Figura 4.13, abaixo, mostra os resultados obtidos da forma descrita acima para diferentes valores de d_2 utilizados. A linha em preto mostra o resultado obtido para $d_2 = 16$ cm; a linha em azul para $d_2 = 18$ cm e a linha em vermelho para $d_2 = 20$ cm.

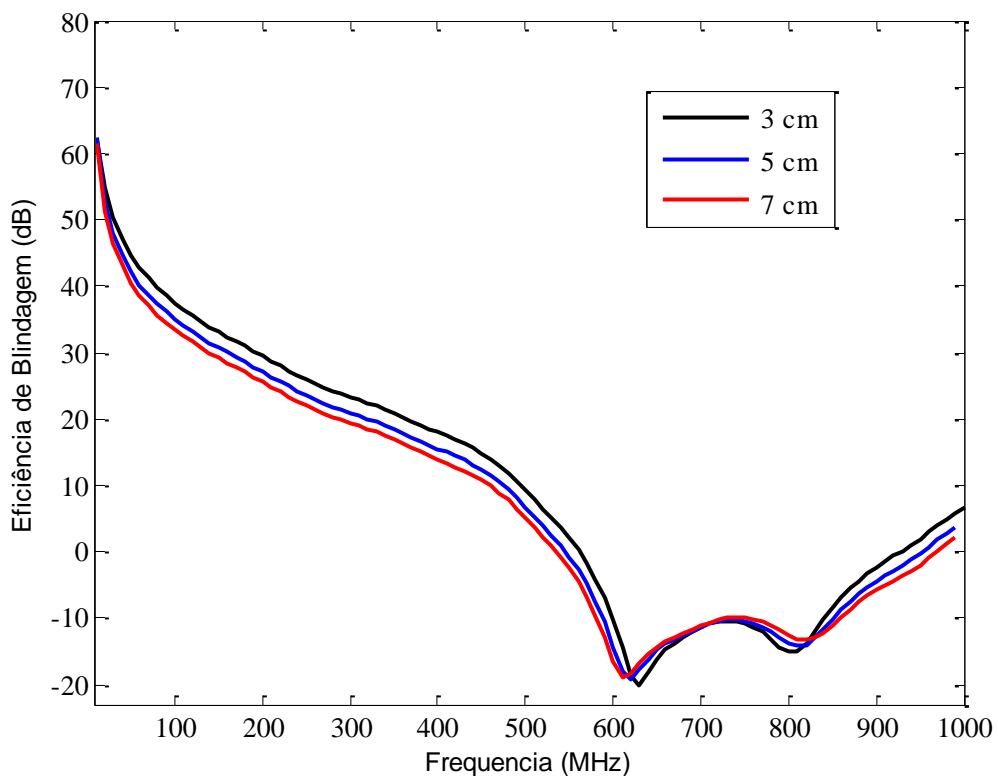


Figura 4.12: Resultados obtidos para $d_1 = 3$ cm, 5 cm e 7 cm.

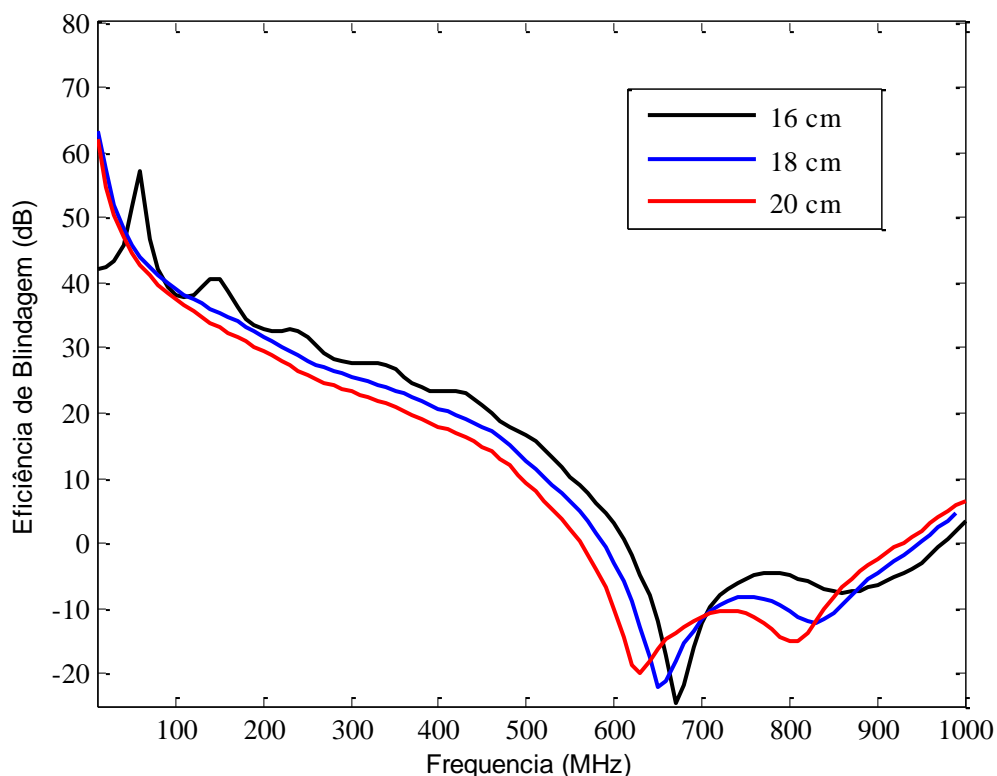


Figura 4.13: Resultados obtidos para $d_2 = 16$ cm, 18 cm e 20 cm.

Das Figuras 4.12-4.13, pode-se observar que quando as dimensões d_1 e d_2 são aumentadas, a frequência de ressonância é deslocada para valores menores. Conseqüentemente, para frequências mais baixas que a frequência de ressonância a Eficiência de Blindagem, em geral, decresce.

Para frequências acima da frequência de ressonância não há um padrão em relação aos valores da Eficiência de Blindagem, pois ora aumenta e ora diminui quando as dimensões são aumentadas.

4.4.3. Caso 03: Análise do espaçamento entre paredes duplas de uma caixa blindada sem abertura e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem

Para este caso, foi utilizada uma caixa blindada sem aberturas constituída por paredes duplas. O afastamento utilizado entre as paredes duplas foi de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 7 cm. A Figura 4.14, abaixo, mostra a representação da estrutura obtida com no ambiente *LANE SAGS* para o caso em que as paredes estão espaçadas de 7 cm.

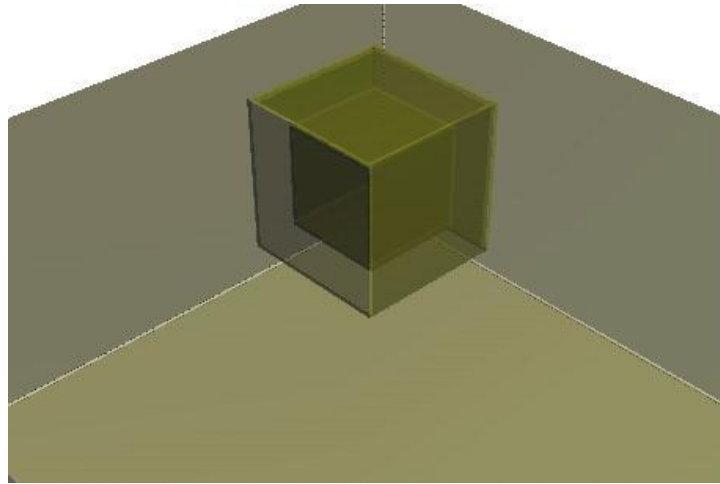


Figura 4.14: Estrutura representada no ambiente *LANE SAGS* para o caso em que as paredes estão espaçadas de 7 cm.

A Figura 4.15, abaixo, mostra o resultado obtido da forma descrita acima para os espaçamentos mencionados. A linha em preto mostra o resultado obtido para a caixa com um espaçamento entre as paredes de 1 cm, a linha em vermelho para um espaçamento de 3 cm, a linha azul para o espaçamento de 5 cm e a linha em verde para o espaçamento de 7 cm.

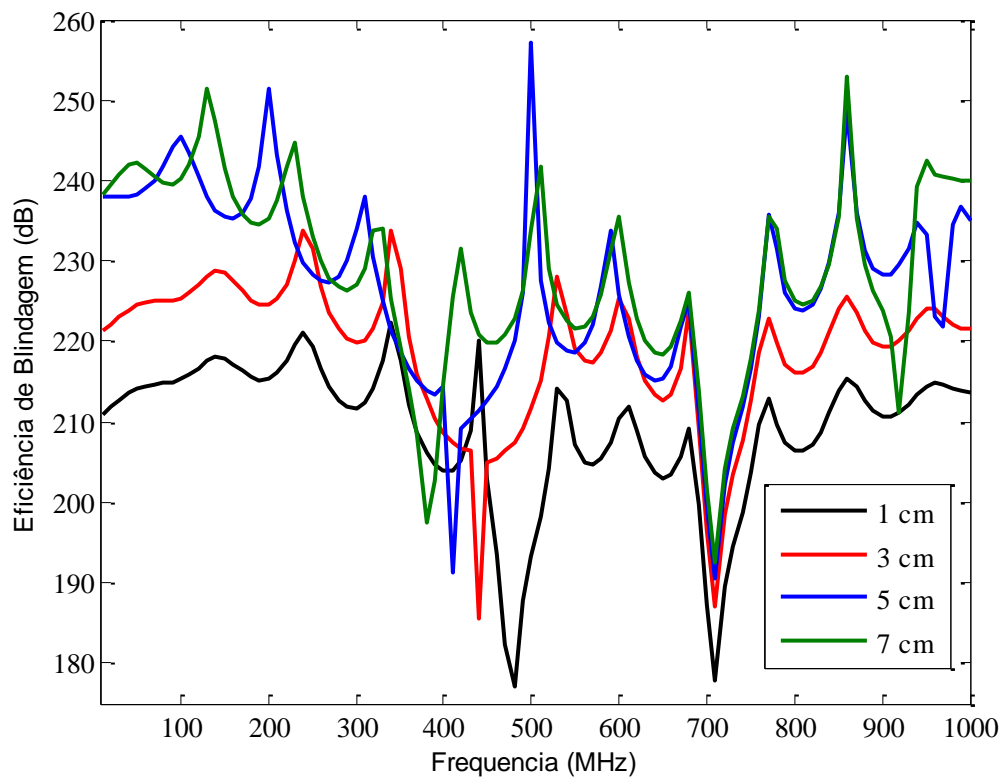


Figura 4.15: Resultados obtidos com a variação do espaçamento entre as paredes duplas

Através da Figura 4.15, observa-se que a Eficiência de Blindagem aumenta, consideravelmente, em relação aos casos com blindagem simples apresentados anteriormente. Além disso, ressalta-se que quando o espaçamento entre as paredes é aumentado a Eficiência de Blindagem também aumenta com tendência a saturação.

4.4.4. Caso 04: Variação da amplitude da fonte de excitação e sua influência sobre a Eficiência de Blindagem

Para este caso, foram feitas alterações na amplitude da fonte de excitação e analisou-se a sua influência nos valores da Eficiência de Blindagem. No primeiro teste, a caixa utilizada possuía as mesmas dimensões e características da caixa usada o durante processo de validação (30x30x12 cm com uma abertura de 20x3 cm). Assim, a amplitude da fonte de excitação foi alterada para 1 V, 3 V, 5 V e 10 V.

No segundo teste, foi utilizada uma caixa fechada composta por paredes duplas sem aberturas, como mostrado no caso 03, item (4.4.3); no entanto, foi considerada, apenas, a caixa contendo as paredes duplas espaçadas de 3 cm. As amplitudes utilizadas para a fonte de excitação foram de 1 V, 5 V e 10 V.

Na Figura 4.16 são mostrados os resultados obtidos no primeiro teste. A linha em preto representa o resultado para a amplitude de 1 V; os círculos vermelhos os resultados para 3 V; os “x” em azul para 5 V e os quadrados em verde para 10 V.

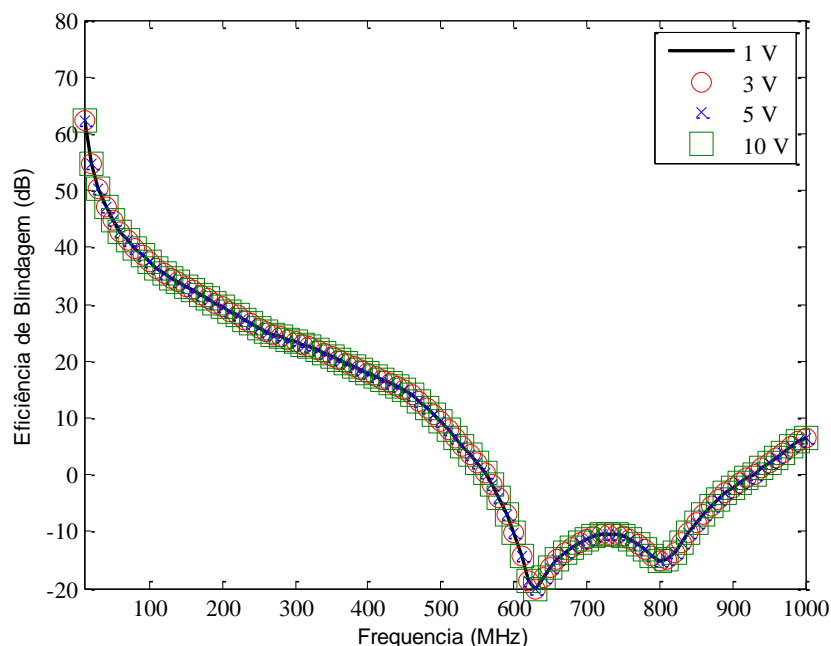


Figura 4.16: Resultados obtidos para a alteração da amplitude da fonte de excitação considerando uma caixa contendo uma abertura

Na Figura 4.17, observa-se os resultados obtidos para a caixa composta por paredes duplas espaçadas de 3 cm. O gráfico com a linha em preto representa a amplitude de 1 V; o gráfico com círculos azuis representa a amplitude de 5 V e o gráfico com cruz vermelha representa a amplitude de 10 V.

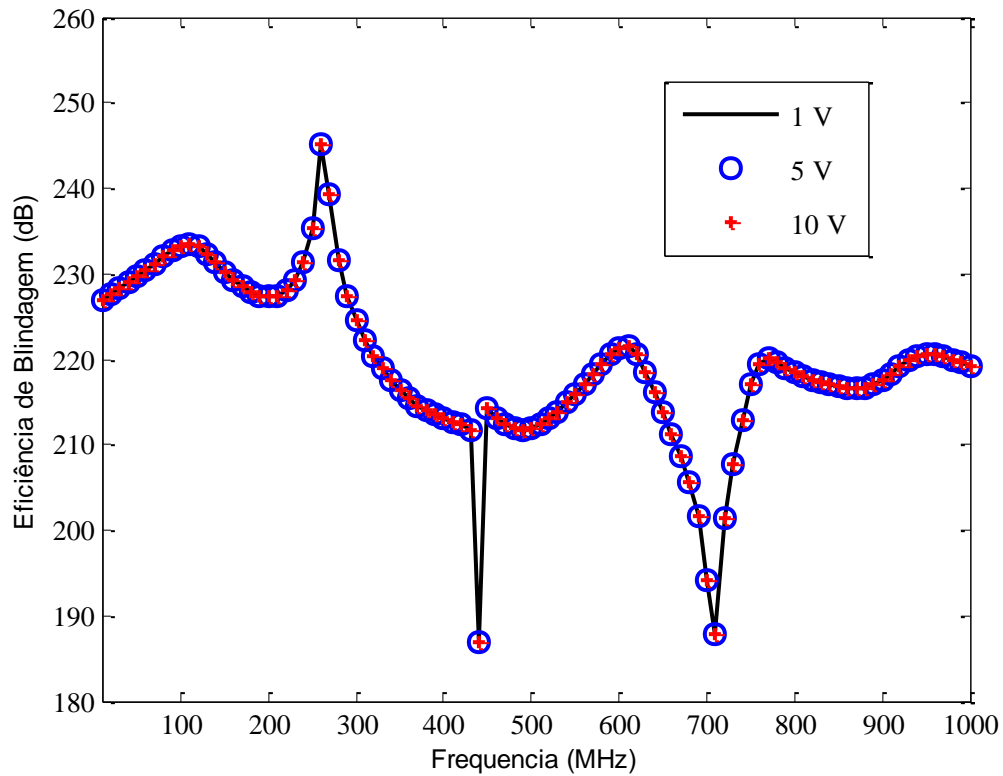


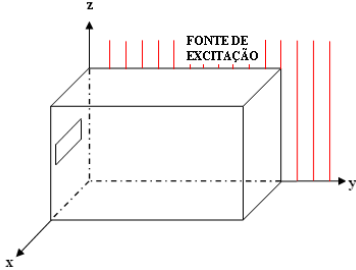
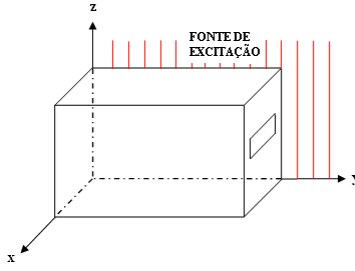
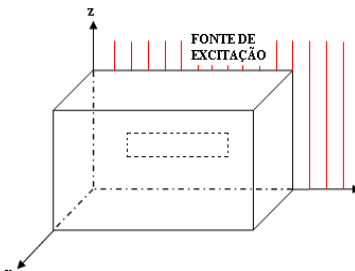
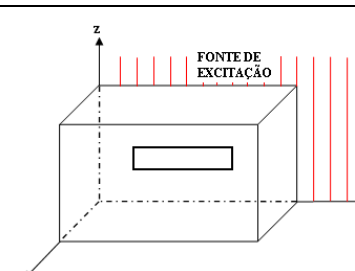
Figura 4.17: Resultados obtidos para a variação da amplitude da fonte de excitação considerando uma caixa sem aberturas formada por paredes duplas espaçadas de 3 cm.

Das Figuras 4.16-4.17, observa-se que alterações na amplitude da fonte de excitação não têm influência sobre os resultados obtidos nos valores da Eficiência de Blindagem. O resultado era esperado, pois o meio é tratado como linear sendo, também, esse resultado usado como validação do ambiente.

4.4.5. Caso 05: Variação da posição da abertura da caixa em relação à posição da fonte de excitação e a sua influência sobre a Eficiência de Blindagem

Para este caso, variou-se a localização da abertura da caixa em relação a posição da fonte de excitação. A fonte é excitada como uma onda plana paralela ao plano- yz . A tabela I mostra as posições em que a abertura foi utilizada.

TABELA I – Posições da abertura em relação à fonte de excitação e suas respectivas legendas a serem consideradas nos gráficos dos resultados

ABERTURA	PLANO	POSIÇÃO RELATIVA
Paralela ao plano-xz	xz-1	
Paralela ao plano-xz	xz-2	
Paralela ao plano-yz	yz-1	
Paralela ao plano-yz	yz-2	

A Figura 4.18 mostra os resultados obtidos, sendo que, a linha em azul representa a abertura paralela ao plano xz, referenciada como xz-1e os “x” em vermelho a abertura referenciada como xz-2. A linha em preto representa os resultados para a abertura paralela ao plano yz, referenciada como yz-1 e a linha em cor laranjada para a abertura referenciada como yz-2.

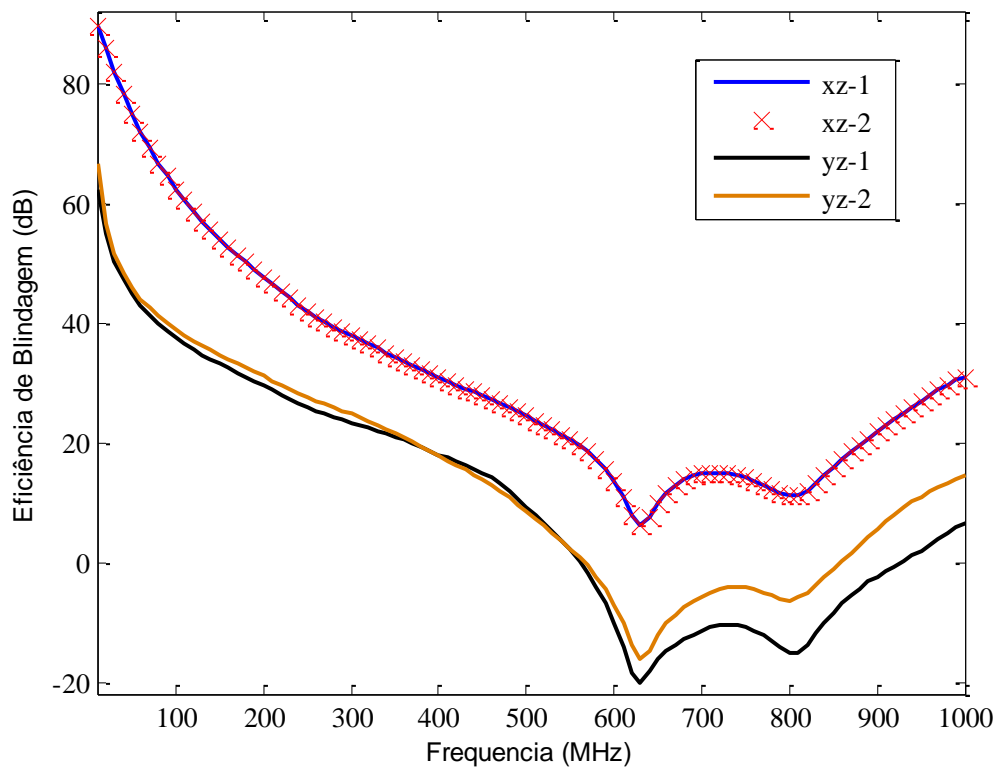


Figura 4.18: Resultado obtido para a variação da posição da abertura em relação ao posicionamento da fonte de excitação

Da Figura 4.18, pode-se observar que o pior caso (baixa Eficiência de Blindagem) acontece quando a onda incide frontalmente sobre a abertura (yz-1). Os resultados xz-1 e xz-2 apresentam resultados idênticos devido à equivalência geométrica.

4.4.6. Caso 06: Análise da Eficiência de Blindagem utilizando um laboratório de alta-tensão construído virtualmente com dimensões reais.

Neste caso, será mostrado o resultado para análise da Eficiência de Blindagem de um laboratório de alta-tensão implementado computacionalmente utilizando o ambiente *LANE SAGS*. Foi utilizada como modelo a planta baixa de um laboratório de alta-tensão que será construído em breve, o qual servirá para a realização de medidas de alta-tensão na Eletronorte como, por exemplo, detecção de descargas parciais.

O laboratório possui as dimensões de 53.7x36.4x33 m. O domínio de análise foi discretizado com células com arestas de 10 cm de comprimento.

O material usado para a construção virtual do laboratório foi o mesmo utilizado nos casos anteriores, bem como, a espessura das paredes (80 μm) e a forma de excitação da fonte.

A análise da Eficiência de Blindagem foi feita entre as frequências de 0.1 a 300 MHz devido o alto custo computacional e a memória requerida para simulação.

A Figura 4.19, mostra a planta baixa do laboratório. O local identificado como “PONTO 1” faz referência ao centro do compartimento onde funcionará o laboratório de alta tensão; o local referenciado como “PONTO 2” faz referência ao centro do local onde funcionará uma área de montagem e desmontagem; e o “PONTO 3” refere-se ao centro do local onde funcionará um laboratório de materiais. Os números que contidos em círculo indicam as posições das portas que em algumas simulações serão consideradas como estando abertas.

Vale ressaltar que os campos elétricos para análise da Eficiência de Blindagem foram capturados nos centros de cada um dos compartimentos: “PONTO 1”, “PONTO 2” e “PONTO 3”.

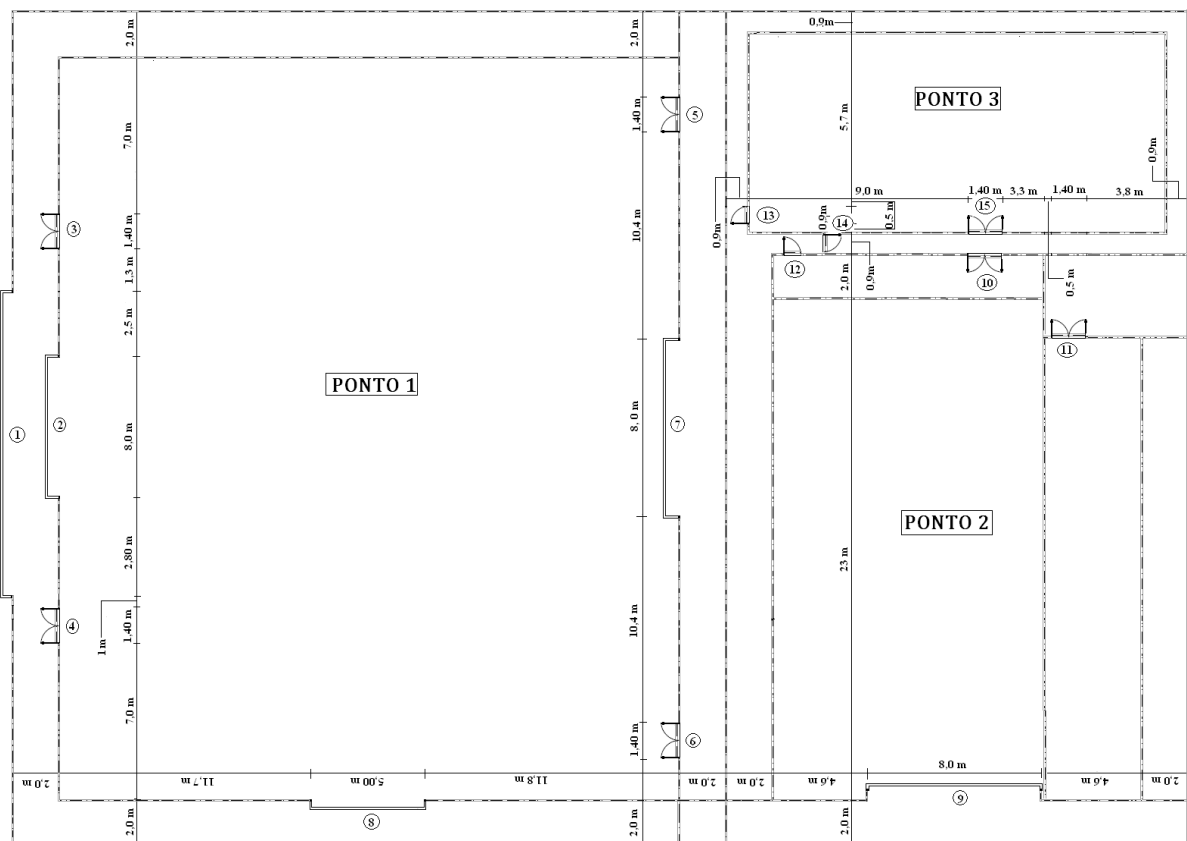


Figura 4.19: Planta baixa do laboratório de alta-tensão

A Figura 4.20 mostra a estrutura apresentada na Figura 4.19; porém implementada com o ambiente *LANE SAGS*.

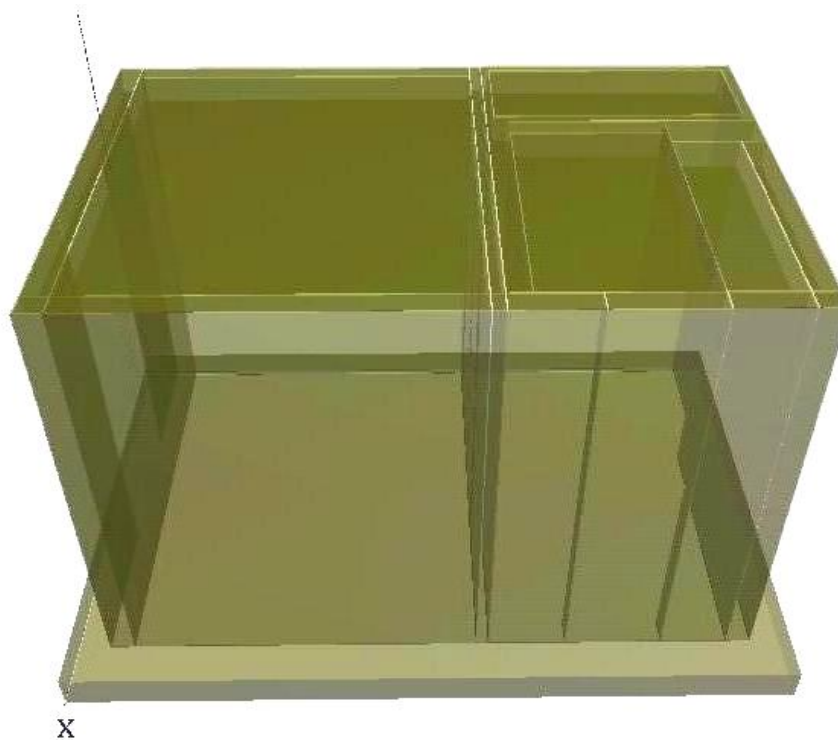


Figura 4.20: Estrutura modelada utilizando o ambiente *LANE SAGS*

Para a análise da Eficiência de Blindagem na estrutura mostrada foram considerados os casos descritos na Tabela II.

TABELA II – Situações em que foram verificados os valores da Eficiência de Blindagem

SITUAÇÃO	DESCRIÇÃO
I	Estrutura completamente fechada
II	Porta 02 aberta (8.0x2.50 m)
III	Porta 03 aberta (1.40x2.10 m)
IV	Porta 05 aberta (1.40x2.10 m)
V	Porta 07 aberta (8.0x15 m)
VI	Porta 08 aberta (5.0x9.0 m)
VII	Portas 03 (1.40x2.10 m) e 04 (1.40x2.10 m) abertas
VIII	Portas 03 (1.40x1.20 m) e 05 (1.40x2.10 m) abertas
IX	Portas 05 (1.40x2.10 m) e 06 (1.40x2.10 m) abertas
X	Portas 12 (0.9x2.10 m), 13 (0.9x2.10 m) e 14 (1.40x2.10 m) abertas
XI	Portas 09 (8.0x18 m), 10 (1.40x2.10 m) e 11 (1.40x2.10 m) abertas

A Figura 4.21, mostra o resultado obtido para a situação I, sendo que, a linha em preto representa o “PONTO 1”, a linha em azul o “PONTO 2” e a linha em vermelho o “PONTO 3”. A Figura 4.22 mostra os resultados obtidos para o “PONTO 1” para as situações de II-XI,

sendo que, a linha em preto representa a situação II, a linha em azul a situação III, os pontos verdes a IV, a linha em verde a V, a linha em cor-de-rosa a VI, a linha em cor-de-rosa escuro a VII, a linha em azul a VIII, os pontos em lilás a IX, o pontilhado em preto a X e, finalmente, os pontos em azul a situação XI.

A Figura 4.23 mostra os resultados obtidos para o “PONTO 2” para as situações de II-XI, sendo que, a linha em preto representa a situação II, a linha em lilás a situação III, os pontos em verde a IV, a linha em verde a V, o pontilhado em cor-de-rosa a VI, a linha em cor-de-rosa escuro a VII, o pontilhado em azul a VIII, os pontos em vermelhos a IX, o pontilhado em preto a X e, finalmente, a linha em verde claro a situação XI.

A Figura 4.24 mostra os resultados obtidos para o “PONTO 3” para as situações de II-XI, sendo que, a linha em preto representa a situação II, o pontilhado em azul a situação III, os pontos em verde a IV, a linha em verde a V, o pontilhado em cor-de-rosa a VI, a linha em cor-de-rosa escuro a VII, o pontilhado em azul claro a VIII, os pontos em cor-de-rosa escuro a IX, o pontilhado em preto a X e, finalmente, a linha em verde claro a situação XI.

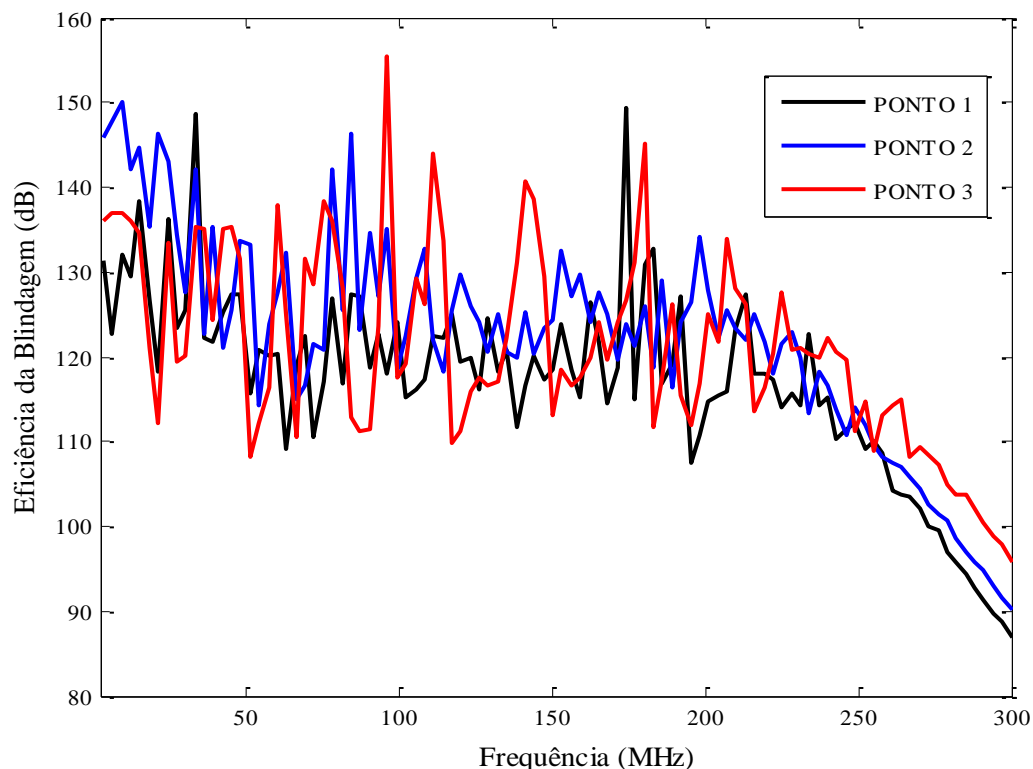


Figura 4.21: Situação I – Estrutura completamente fechada

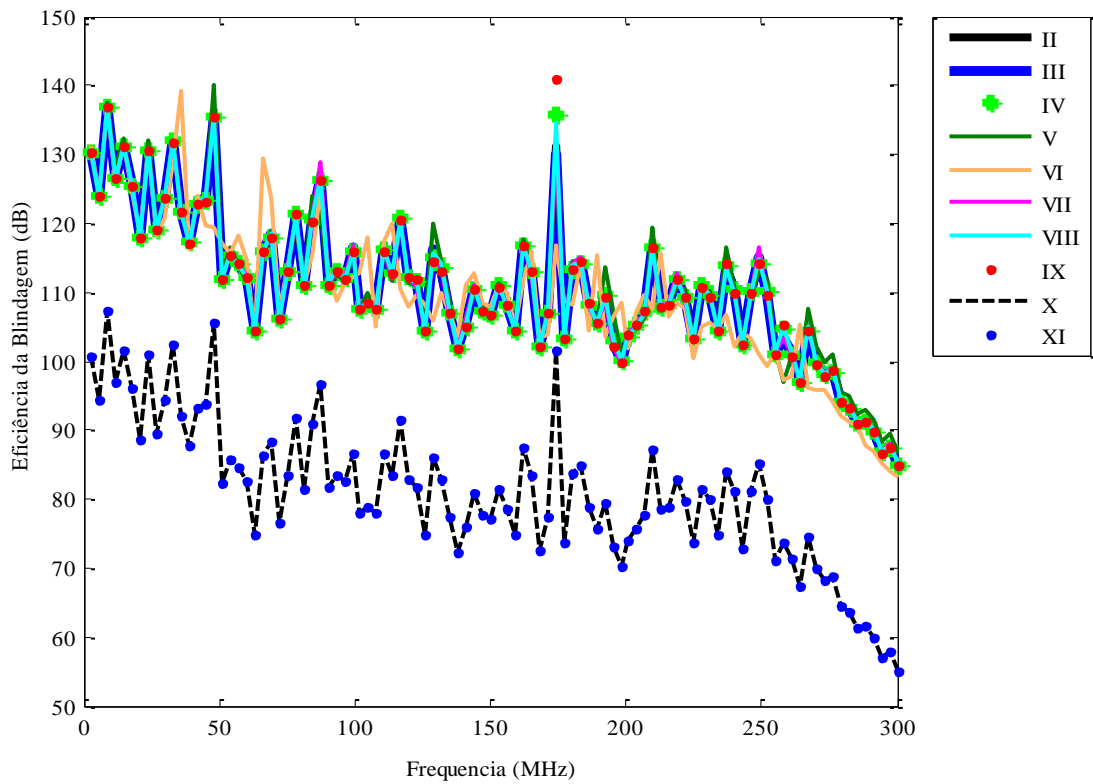


Figura 4.22: Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 1”

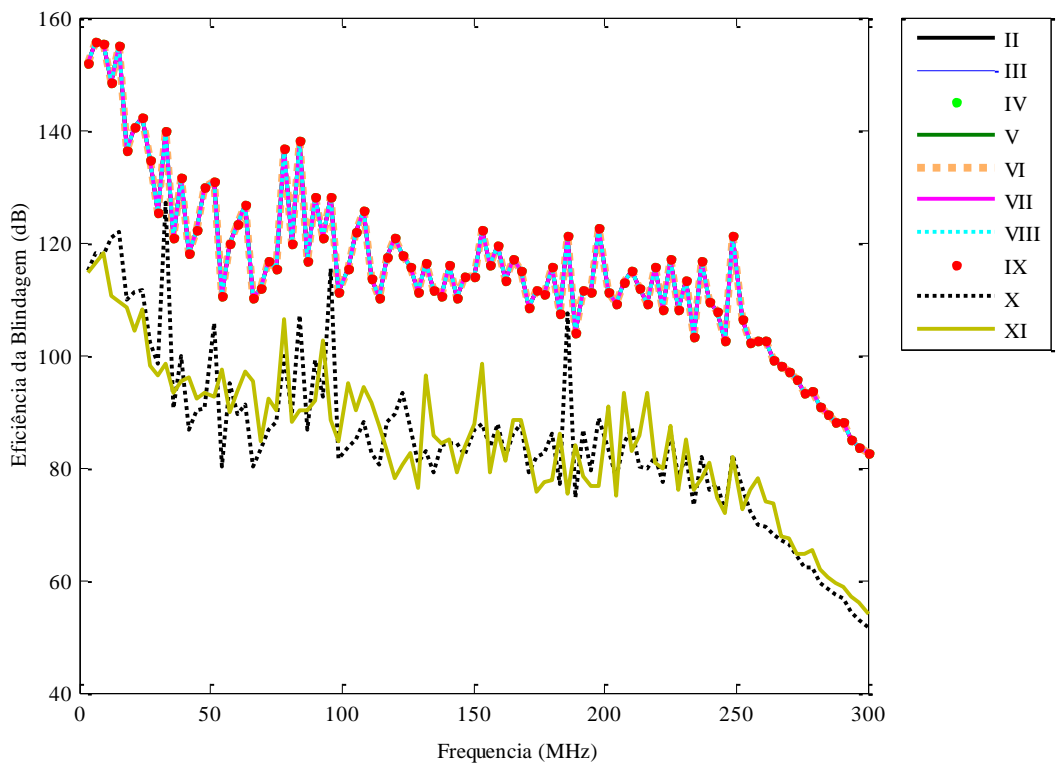


Figura 4.23: Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 2”

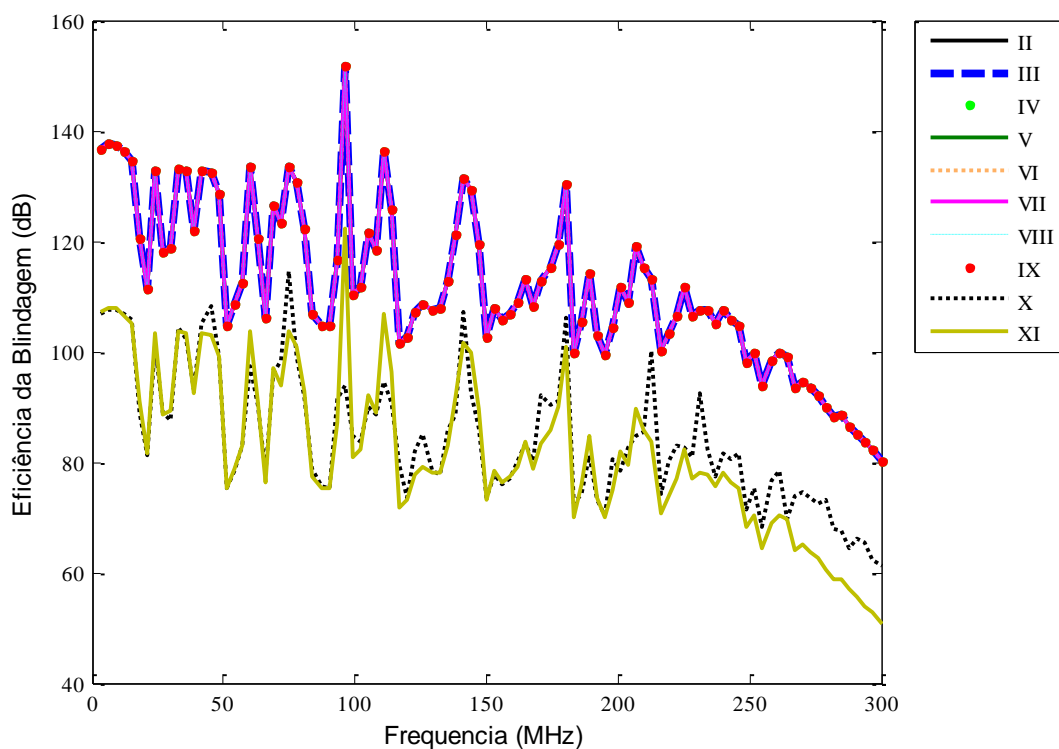


Figura 4.24: Situação II – XI. Sinal capturado no “PONTO 3”

Neste caso, é importante mencionar que os resultados da Eficiência de Blindagem dependem de vários aspectos, tais como: reflexões múltiplas, posição relativa da fonte, objetos incluídos no cenário, parâmetros eletromagnéticos, etc.

Comparando-se as figuras acima pode-se observar que os valores da Eficiência de Blindagem para estrutura completamente fechada, como era esperado, são maiores. Além disso, considerando as situações de II-IX não são observadas alterações consideráveis nos valores da Eficiência de Blindagem, pois as alterações na estrutura foram feitas em portas que não estavam voltadas para a fonte de excitação (vide caso 05) e, também, por este motivo, os valores da Eficiência de Blindagem são mais elevados do que para os casos X-XI, já que, nesses últimos, a onda incide frontalmente sobre as portas abertas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada a análise da Eficiência de Blindagem de estruturas indoor construídas com lâminas finas condutoras elétricas, utilizando o método FDTD implementado com o modelo de sub-célula. A principal vantagem da utilização deste modelo está na modelagem de estruturas finas sem comprometer o tempo de processamento e o custo de memória computacional.

Inicialmente, foram realizados testes de validação utilizando como fonte de excitação um pulso gaussiano somado a sua derivada (monociclo) e, posteriormente, um monociclo gaussiano. Os resultados foram comparados com os já existentes na literatura e apresentaram uma ótima concordância. Além disso, observou-se que, o mesmo resultado é obtido independente da fonte de excitação, considerando os tipos de fontes citados acima.

Após o teste de validação, foram realizados vários estudos de casos com estruturas contendo paredes com espessura de 0.08 mm. Os testes foram feitos virtualmente considerando uma caixa metálica e uma estrutura, utilizando as dimensões reais, na qual funcionará um laboratório para medições de alta-tensão. Para a modelagem das estruturas foi utilizado o ambiente *LANE SAGS*.

As modificações feitas na caixa metálica foram: nas dimensões de uma abertura construída sobre uma das faces da caixa; nas dimensões da caixa; no espaçamento entre paredes quando a blindagem é formada por paredes duplas; mudanças na amplitude da fonte de excitação e mudanças na localização da abertura em relação a direção de propagação da onda. Posteriormente, foi feita a análise da Eficiência de Blindagem no modelo virtual de um laboratório de alta-tensão.

Das análises feitas foi observado que quando as dimensões-x e -y da caixa são aumentadas, a frequência fundamental de ressonância é deslocada para valores mais baixos. Por outro lado, quando a dimensão-z é aumentada, como esperado, mudanças insignificantes são observadas na frequência de ressonância; isso acontece porque a onda possui polarização-z. Também, observou-se que a Eficiência de Blindagem é menos afetada para baixas do que para altas frequências.

Além disso, quando as dimensões da abertura da caixa são aumentadas a frequência de ressonância é deslocada para frequências mais baixas. Conseqüentemente, para frequências

mais baixas do que a frequência de ressonância a Eficiência de Blindagem, em geral, decresce. Observou-se, também, que para frequências acima da frequência de ressonância não há um padrão para os valores da Eficiência de Blindagem.

No caso do espaçamento entre as paredes quando a blindagem é feita por paredes duplas, a Eficiência de Blindagem aumenta consideravelmente quando comparada com o caso de blindagem simples para as configurações simuladas. Quando o espaçamento entre as paredes é aumentado, a Eficiência de Blindagem também aumenta, tendendo a saturação.

Quando a amplitude da fonte de excitação foi aumentada, observou-se que a amplitude não tem influência sobre os valores da Eficiência de Blindagem, como era esperado, pois o meio é tratado como linear. Ressalta-se que esse teste foi usado como validação do software.

Na situação em que a abertura da caixa foi mudada em relação a posição da fonte de excitação, pode-se notar que o pior caso acontece quando a onda incide frontalmente sobre a abertura.

No caso em que um laboratório de alta-tensão foi implementado computacionalmente, foi observado que os valores da Eficiência de Blindagem dependem da posição do ponto de recepção do sinal e que podem ser obtidos valores elevados ou não de eficiência dependendo da frequência observada. Trata-se, portanto, de um problema complexo que depende de vários aspectos já mencionados.

Propõem-se como temas para trabalhos futuros: a análise de outras formas de aberturas, como, por exemplo, aberturas circulares e a verificação do efeito do sistema de aterramento e do sistema de proteção contra descargas elétricas na estrutura do laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paul, C. R., “*Introduction to Electromagnetic Compatibility*”, John Wiley & Sons, INC, 1992.
- [2] R. Morrison, “*Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation*”, John Wiley, New York, 1967.
- [3] D. R. Kerns, “Integrated Circuit construction and its effects on EMC performance”, *Proceedings of the 1984 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, San Antonio, TX, April 1984.
- [4] Vocabulário Eletrotécnico Internacional – Capítulo 161: “Compatibilidade Eletromagnética”. Associação brasileira de normas técnicas
- [5] Maria Sabrina Sarto, “A New Model for the FDTD Analysis of the Shielding Performances of Thin Composite Structures”, *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 41, No. 4, November 1999.
- [6] B. Chatterjee, S. Chakravorti and C. K. Roy. “Real Life Experiences in the Construction of a Large Laboratory having High Quality Electromagnetic Shielding”, *First International Power and Energy Conference PECon 2006*, November 28-29, 2006, Putrajaya, Malaysia
- [7] Marvin, A. C.; Dawson, J. F.; Dawson, L.. “New Developments in Shielding Effectiveness Measurements – Shielding Aperture”. *University of York, UK*. IEEE, 2004.
- [8] Zhu Yichao, Gao Cheng, Shi Lihua, Zhou Bihua, “Analysis and Test of EM Shielding for Low-Frequency Magnetic Field”, *IEEE* 2007.
- [9] IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, Standards committee of the electromagnetic Compatibility, Approved March 11, 1991
- [10] Farhana Ahmad Po’ad1, Mohd Zarar Mohd Jenu1, C. Christopoulos and D.W.P. Thomas, “Analytical and Experimental Study of the Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure with Off-Centered Apertures”, *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006.

- [11]K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-14, 4, pp. 302-307, 1966.
- [12]C. J. Railton and J. P. McGeehan, "An analysis of microstrip with rectangular and trapezoidal conductor cross sections," *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, MTT-38, 8, pp. 1017-1022, 1990.
- [13]P. A. Tirkas and K. R. Demarest, "Modeling of thin dielectric structures using finite-difference time-domain technique," *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, MTT-39, 9, pp. 1338-1344, 1991.
- [14]J. G. Maloney and G. S. Smith, "The efficient modeling of thin material sheets in the finite-difference time-domain (FDTD) method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP- 40, 3, pp. 323-330, 1990.
- [15]R. J. Luebbers and K. Kunz, "FJITD modeling of thin impedance sheets," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-40, 3, pp. 349-350, 1992.
- [16]J. J. Boonzaier and C. W. I. Pistorius, "Scattering by thin lossy dielectric plates - A finite-difference time-domain approach," *Microwave and Optical Technology Letters*, 6, 5, pp. 326-332, 1993.
- [17]Rodrigo M. S. de Oliveira, "Nova metodologia para análise e síntese de sistemas de aterramento complexos utilizando o método LN_FDTD, computação paralela automática e redes neurais artificiais", *Tese de Doutorado em engenharia elétrica*, ITEC/UFPA, Belém, 2008.
- [18]Rodrigo M. S. de Oliveira and Carlos Leonidas da S. Souza Sobrinho , "Upml Formulation For Truncating Conductive Media In Curvilinear Coordinates", *Numerical Algorithms*, vol. 46, No. 4, December 2007.
- [19]A. Bayliss and E. Turkel, "Radiation boundary conditions for wave-like Equations," *Comm. Pure Appl. Math*, vol. 23, pp. 707-725, 1980.
- [20]G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, pp. 377-382, 1981.

- [21]R. Higdon, "Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation," *Mathematics of computation*, vol. 49, pp. 65-90, 1987.
- [22]Z. Liao, H. Wong, B.P. Yang, and Y.F. Yuan, "A transmitting boundary for transient wave analysis," *Scientia Sinica*, vol. XXVII (series A), pp. 1063-1076, 1984.
- [23]J. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", *J. Computational Physics*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [24]Z. Sacks, D. Kingsland, R. Lee, and J. Lee, "A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 43, pp. 1460-1463, 1995.
- [25]S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of fdtd lattices", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 44, pp. 1630-1639, 1996.
- [26]Chaoqun Jiao, Lin Li, Xiang Cui, and Huiqi Li, "Subcell FDTD Analysis of Shielding Effectiveness of a Thin-Walled Enclosure with an Aperture", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, No. 4, April 2006.
- [27]R. Courant, K. O. Friedrichs; H. Lewy, "Uber die partiellen differenz-gleichugem der mathematischen Physic," *Mathematische Annalen*, vol.100, p. 32-74. 1928.
- [28]A. Taflove and S. C. Hagness, "*Computational Electrodynamics, The Finite Difference Time-Domain Method*", 3rd Ed. Artech House Inc., 2005.
- [29]R. Holand and J. Williams, "Total-field versus scattered-field finite-difference," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 30, pp. 4583-4588, 1983.
- [30]Longfeng , W; Donglin, S; Wenqing, C; and Zhang, X. "The Modeling Method of Interference Source of System-level Electromagnetic Compatibility", *Electromagnetic Compatibility (EMC) Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, 2007.*
- [31]Shadiku, M. O. "*Elementos de Eletromagnetismo*", Ed. Bookman, 3ª edição, Porto Alegre, 2004.

[32]Kinderman, G. and Campagnolo, J. M. . “*Aterramento Elétrico*”, Ed. Sagra-DC Luzzatto, 3ª ed., Porto Alegre, 1995.

[33]Sanches, D. “*Interferência Eletromagnética*”, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003.

[34]Vance, E. F.; and Graf, Werner. “The role of Shielding in Interference Control”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compability*, vol. 30, n°03, agosto, 1988.

[35]Robinson, M. P; Benson, T. M.; Christopoulos, C.; Dawson, J. F.. “Analytical formulation for the Shielding Effectiveness of Enclosures with Apertures”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compability*, vol. 40, n°03, agosto, 1998.

[36]C. Jiao, X. Cui, L. Li, and H. Li., “Improved Subcell Model of Thin Multilayer Material Sheet in FDTD Method”, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, No. 4, APRIL 2006

[37]M. D. Deshpande, “Electromagnetic Field Penetration Studies”, *Hampton, VA: National Aeronautics and Space Administration*, 2000.