

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO TERUO MENDES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA
EM EQUIPAMENTOS SUJEITOS À INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA, UTILIZANDO A TÉCNICA DOS ELEMENTOS
FINITOS**

VIÇOSA
2015

DIEGO TERUO MENDES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA
EM EQUIPAMENTOS SUJEITOS À INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA, UTILIZANDO A TÉCNICA DOS ELEMENTOS
FINITOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio de Resende.

VIÇOSA
2015

DIEGO TERUO MENDES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DA BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA
EM EQUIPAMENTOS SUJEITOS À INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA, UTILIZANDO A TÉCNICA DOS ELEMENTOS
FINITOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 26 de Junho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. André Gomes Torres - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Você vai longe na vida na medida em que for afetuoso com os jovens, piedoso com os idosos, solidário com os perseverantes e tolerante com os fracos e com os fortes. Porque, em algum momento de sua vida, você terá sido todos eles.”

(George W. Carver)

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram em mim e me deram
forças durante esta desafiadora etapa de minha vida.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me deu forças para conseguir chegar até aqui.

Ao professor Celi Hipólito Dutra, que me fez acreditar em minha capacidade e me mostrou que onde há vontade, há um meio.

A meus pais, Carlos e Maria, pelos bons valores que sempre me passaram.

A meus irmãos, Jonathan, Michele e Diana, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

Ao professor José Tarcísio, pela paciência e dedicação na orientação deste trabalho.

Ao pessoal do 2231, que foram minha família durante todo o tempo que passei aqui em Viçosa e a todos os meus amigos de Viçosa.

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, tornaram possível a realização deste trabalho.

Resumo

A gama de aplicações das ondas eletromagnéticas na atualidade, o fato de muitos dispositivos elétricos e eletrônicos gerarem ondas eletromagnéticas durante seu funcionamento e a existência de fontes naturais dessas ondas, mostra a importância de se analisar as influências e distúrbios que essas ondas podem causar umas sobre as outras, fenômeno conhecido como Interferência Eletromagnética (EMI, do inglês *Electromagnetic Interference*). O simples fato de os dispositivos elétricos, especialmente os de eletrônica de potência, não somente serem fontes geradoras destas ondas, mas também serem vítimas de fontes externas das mesmas, mostra o quanto é importante o estudo de EMI na atualidade.

Para se combater os efeitos negativos relacionados à EMI desenvolveu-se a Compatibilidade Eletromagnética (EMC, do inglês *Electromagnetic Compatibility*), que busca ditar normas para que os dispositivos emissores de ondas eletromagnéticas não interfiram em outros dispositivos, bem como garantir que eles também não sofram interferências de fontes externas de EMI. Diversas são as técnicas utilizadas na atualidade para o combate das EMI, dentre as quais pode-se destacar as técnicas de filtragem e blindagem eletromagnética. Neste trabalho é analisada a blindagem condutora como forma de redução do efeito das interferências eletromagnéticas, trabalhando com a técnica de elementos finitos.

O método dos elementos finitos é uma técnica para a resolução de problemas matemáticos, sendo muito utilizada na atualidade para a resolução de problemas eletromagnéticos, principalmente, devido à simplificação que proporciona ao problema, uma vez que transforma um problema complexo em um grande número de problemas menores de fácil resolução, e à sua fácil implementação por meio de softwares computacionais.

Neste trabalho, utiliza-se a técnica dos elementos finitos para análise da eficiência da blindagem eletromagnética na proteção de dispositivos. É feita uma simulação para a verificação de quanto a barreira da blindagem atua na atenuação de uma onda eletromagnética incidente sobre ela. Para este estudo é desenvolvida uma modelagem matemática que trata da incidência, reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas, na qual é feita a simulação digital em computador. Os resultados obtidos na simulação são comparados com os esperados na teoria e verifica-se que a análise obtida é conforme o esperado, tanto no que diz respeito à espessura da barreira de blindagem quanto ao material do qual ela é feita.

Abstract

The nowadays application range of electromagnetic waves, the fact that many electrical and electronic devices generate electromagnetic waves in their operation and the existence of natural sources of these waves, show the importance of analyze the influences and disturbing that these waves can cause on each other, this phenomenon is known as Electromagnetic Interference (EMI). The fact that electric devices, especially in power electronics, are not just sources of these waves, but also victims of external sources, shows how important it is the EMI study nowadays.

To combat the negative effects related to EMI, the Electromagnetic Compatibility (EMC) was developed, which seeks to dictate the rules for the electromagnetic waves generate from a device do not interfere in other devices, and ensure that they also do not suffer interference from external sources of EMI. Several techniques are used today to combat the EMI, among them we can highlight the filtering techniques and electromagnetic shielding. In this work is analyzed the conductive shield as a way to reduce the effects of Electromagnetic Interference, using the finite elements technique.

The Finite Elements Method is a technique for solving mathematical problems, being widely used to solve electromagnetic problems, mainly due to the simplification that provides to the problem as it transforms a complex problem in a large number of small easy problems, and its easy implementation in computer software.

This work uses the technique of Finite Elements Method for electromagnetic shielding efficiency analysis in the devices protection. A simulation is made for checking how the shielding barrier acts on the attenuation of an incident electromagnetic wave. For this study it is developed a mathematical model that deals with the incidence, reflection and transmission of electromagnetic waves, in which is made a digital computer simulation. The results of the simulation were compared with those expected in the theory and the analysis obtained was the expected, both as regards to the thickness of the shielding barrier as the material from which it was made.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Ondas Eletromagnéticas	14
1.1.1	Introdução.....	14
1.1.2	Propagação de Ondas Eletromagnéticas.....	15
1.1.3	Interferência Eletromagnética	17
1.2	Compatibilidade Eletromagnética	18
1.3	Método dos Elementos Finitos	20
1.3.1	Introdução.....	20
1.3.2	Definição	20
1.3.3	Aplicações do Método dos Elementos Finitos	21
1.4	Objetivo Geral	23
2	Materiais e Métodos	24
2.1	Propagação de Ondas Eletromagnéticas em meios condutores.....	24
2.2	Eficiência de blindagem condutora	26
2.2.1	Definição	26
2.2.2	Eficiência teórica para uma blindagem condutora	27
2.3	FEMM e Método dos Elementos Finitos.....	30
2.3.1	Introdução.....	30
2.3.2	Pré-processamento.....	30
2.3.3	Processamento	32
2.3.4	Pós-processamento	32
3	Resultados e Discussões.....	33
4	Conclusões.....	38
	Referências Bibliográficas	41

Lista de Figuras

Figura 1 – Ondas Geradas por uma fonte esférica pontual.	15
Figura 2 – Origem e formas de propagação de uma Interferência Eletromagnética.	18
Figura 3 – Aplicação do Métodos dos Elementos Finitos em uma placa com furo central.	20
Figura 4 – Atenuação da amplitude de uma onda eletromagnética a medida que a mesma se propaga em um meio condutor.	24
Figura 5 – Esquema da incidência de uma onda eletromagnética em uma barreira de blindagem.....	25
Figura 6 – Geometria do problema utilizado para simulação da eficiência de blindagem no <i>FEMM</i> , desenvolvida na etapa de Pré-processamento.	29
Figura 7 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos feita pelo <i>FEMM</i> na geometria da Figura 6.....	30
Figura 8 – Problema com configuração semelhante ao da Figura 6 na etapa de Pós-processamento.....	31

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Espectro Eletromagnético e suas aplicações.....	13
Tabela 2 – Porcentagem de atenuação da onda transmitida em relação à incidente para alguns valores de Eficiência da Blindagem.....	26
Tabela 3 – Eficiência da Blindagem calculada para uma blindagem de Ferro.....	32
Tabela 4 – Eficiência da Blindagem calculada para uma blindagem de Cobre	33
Tabela 5 – Eficiência da Blindagem para uma blindagem de Ferro obtida no <i>FEMM</i>	34
Tabela 6 – Erro dos valores simulados em relação aos calculados para uma blindagem de Ferro.....	34
Tabela 7 – Eficiência da Blindagem para uma blindagem de Cobre obtida no <i>FEMM</i>	35
Tabela 8 – Erro dos valores simulados em relação aos calculados para uma blindagem de Cobre.....	35

1 Introdução

Depois de previstas teoricamente por Maxwell, as primeiras ondas eletromagnéticas foram obtidas experimentalmente pelo físico alemão Henrich Hertz, que conseguiu produzir e medir ondas de rádio, essas ondas são até hoje algumas vezes chamadas de ondas hertzianas em sua homenagem [1] [2]. Atualmente, as ondas eletromagnéticas são utilizadas nos mais variados campos tecnológicos e uma grande faixa de frequência das mesmas é conhecida. Dentre os vários tipos de ondas eletromagnéticas pode-se citar a luz visível, as micro-ondas, a radiação infravermelha, dentre outras. O conjunto formado por todas as frequências conhecidas de ondas eletromagnéticas é chamado de espectro eletromagnético. A Tabela 1 mostra a distribuição do espectro eletromagnético e suas aplicações mais usuais.

Tabela 1- Espectro Eletromagnético e suas aplicações.

Onda Eletromagnética	Aplicações	Faixa de Frequência
Raios Cósmicos	Física, Astronomia	Acima de 10^{14} GHz
Raios Gama	Tratamento de câncer	10^{10} - 10^{13} GHz
Raios X	Exames de raio X	10^8 - 10^9 GHz
Radiação Ultravioleta	Esterilização	10^6 - 10^8 GHz
Luz Visível	Visão humana	10^5 - 10^6 GHz
Radiação Infravermelha	Fotografia	10^3 - 10^4 GHz
Micro-ondas	Radar, estações repetidoras de micro-ondas, comunicações por satélite	3-300 GHz
Ondas de Rádio	Televisão UHF, Televisão VHF, rádio FM, rádio em ondas curtas, rádio AM	535 kHz-806 MHz

A crescente utilização das ondas eletromagnéticas fez com que surgisse uma preocupação com os efeitos que as diferentes fontes dessas ondas pudessem causar umas nas outras, tal fenômeno é conhecido como Interferência Eletromagnética (EMI) e para a sua regulação são criadas as normas de Compatibilidade Eletromagnética (EMC). Diversas são as

formas utilizadas para o combate das EMI, dentre as quais pode-se destacar o projeto de filtros e barreiras de blindagem.

1.1 Ondas Eletromagnéticas

1.1.1 Introdução

Uma onda eletromagnética nada mais é do que um movimento ondulatório composto por campos eletromagnéticos. Considera-se como movimento ondulatório toda perturbação que se propaga transportando energia, assim uma onda é um meio no qual ocorre o transporte de energia ou informação [1].

Para se entender como ocorre esse transporte, que são as interações entre os campos elétricos e magnéticos, considere que em algum ponto do espaço exista uma fonte de campo elétrico, que é uma densidade de corrente ou densidade de cargas variáveis no tempo, estas fontes geram um campo elétrico variável no tempo e, pela lei circuital de Ampère, da equação de Maxwell mostrada na equação (1), um campo magnético variável no tempo também é induzido no espaço em torno do campo elétrico.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = - \int (\vec{J} + \vec{J}_d) \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

Da equação (1) define-se:

- $\vec{H} \rightarrow$ Vetor intensidade de campo magnético (A/m).
- $\vec{J} \rightarrow$ Densidade de corrente de condução (A/m²).
- $\vec{J}_d \rightarrow$ Densidade de corrente de deslocamento (A/m²).

Sendo as densidades de correntes definidas pelas equações (2) e (3). Na equação (3), \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico (A/m²), sendo definida pela equação (4), na qual ϵ é a permissividade elétrica do meio.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

De acordo com a lei da indução eletromagnética de Faraday, da equação de Maxwell mostrada na equação (5), sendo $\vec{B} = \mu\vec{H}$, onde μ é a permeabilidade magnética do meio, um campo magnético variável no tempo também gera um campo elétrico variável no tempo no espaço a sua volta.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

Portanto, as interações eletromagnéticas entre estes campos geram ondas eletromagnéticas que se propagam por todo o espaço, sendo estas viajantes com os seus zeros, máximos e mínimos se deslocando no espaço e no tempo, sendo que os campos elétrico e magnético estão em planos perpendiculares entre si e em planos perpendiculares ao sentido de propagação da onda [1] [2]. A onda eletromagnética é propagada e irradiada na forma esférica, no entanto, em pontos muito distantes da fonte essas ondas podem ser consideradas planas e uniformes. Assim em pontos distantes da fonte que a gerou, a onda é considerada como uma onda plana uniforme. A Figura 1 mostra de forma simplificada este tipo de onda.

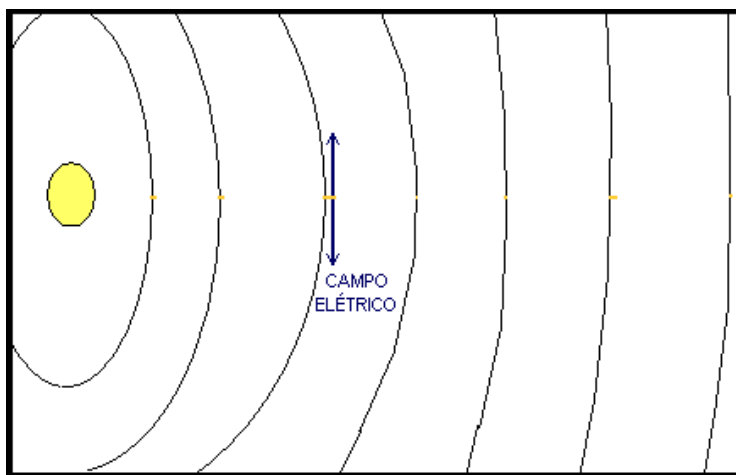


Figura 1 – Ondas Geradas por uma fonte esférica pontual.

1.1.2 Propagação de Ondas Eletromagnéticas

A propagação de uma onda eletromagnética em um meio qualquer pode ser estudada de forma quantitativa a partir das equações de Maxwell. Neste estudo é considerado que as ondas eletromagnéticas foram geradas por fontes variáveis no tempo e que, uma vez geradas, as mesmas se propagam em um meio isento de densidade volumétrica de cargas, ou seja, $\rho_v = 0$. Dessa forma utilizando-se as equações de Maxwell na forma diferencial, dadas pelas equações 6, 7, 8 e 9 e aplicando-se a identidade descrita, obtêm-se as equações 10, 11, 12 e 13 no domínio da frequência.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_d \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_S = 0 \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_S = 0 \quad (11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_S = -j\omega\mu\vec{H}_S \quad (12)$$

$$\nabla \times \vec{H}_S = (\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E}_S \quad (13)$$

Aplicando-se o rotacional em ambos os lados da equação (12) temos que:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}_S = -j\omega\mu \nabla \times \vec{H}_S \quad (14)$$

Utilizando-se a identidade vetorial $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$ e fazendo-se a sua aplicação no primeiro membro da equação (14) e em seguida fazendo-se a substituição da equação (13) no segundo membro da equação (14), temos que:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_S) - \nabla^2 \vec{E}_S = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{H}_S \quad (15)$$

Como na equação (14), $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_S = 0$, esta equação resulta em:

$$\nabla^2 \vec{E}_S - \gamma^2 \vec{E}_S = 0 \quad (16)$$

De forma semelhante, aplicando-se o rotacional em ambos os lados da equação (13), substituindo-se a equação (12) no segundo membro da expressão resultante e aplicando-se a identidade vetorial apresentada no primeiro membro dessa equação tem-se:

$$\nabla^2 \vec{H}_S - \gamma^2 \vec{H}_S = 0 \quad (17)$$

O parâmetro γ depende do meio no qual a onda está propagando e de sua frequência elétrica de propagação, sendo uma unidade complexa conhecida como constante de propagação da onda. Seu valor de acordo com a equação (15) é dado pela equação (18), onde α é a constante de atenuação (Np/m) e β é a constante de fase da onda (rad/m).

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (18)$$

A solução da equação diferencial (16), admitindo que a direção de propagação da onda é no sentido positivo do eixo “z”, o sentido do campo elétrico é o sentido positivo do eixo “x” e que o do campo magnético é o sentido positivo do eixo “y” e de análises matemáticas e conceitos físicos obtém-se:

$$E_x = E_m^+ e^{-\alpha z} e^{-\beta z} + E_m^- e^{\alpha z} e^{\beta z} \quad (19)$$

$$H_y = \frac{E_m^+}{\eta} e^{-\alpha z} e^{-\beta z} + \frac{E_m^-}{\eta} e^{\alpha z} e^{\beta z} \quad (20)$$

Das equações (19) e (20) observa-se que as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos são interdependentes, sendo relacionados pela grandeza η , que é denominada impedância intrínseca do meio. A impedância intrínseca é a relação entre os módulos de \vec{E} e \vec{H} , cuja unidade é ohms, dada pela equação (21).

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (21)$$

1.1.3 Interferência Eletromagnética

O número cada vez mais crescente de dispositivos eletrônicos utilizados na atualidade tem feito com que uma ênfase maior seja dada aos problemas de interferência eletromagnética, uma vez que todo dispositivo eletrônico é uma fonte de campos eletromagnéticos irradiados e também são sensíveis quanto aos efeitos dessas interferências. Por volta dos anos de 1920 começaram a surgir os primeiros sistemas de radiodifusão comerciais e durante a Segunda Guerra já se faziam sentir os efeitos da interferência em sistemas de navegação por radar [3].

O termo Interferência Eletromagnética (EMI) é utilizado para descrever a degradação na performance de um dispositivo devido à geração de campos eletromagnéticos no ambiente eletromagnético [1]. O ambiente eletromagnético é constituído de vários equipamentos, assim deve-se tomar a precaução não apenas com as interferências causadas no dispositivo pelos demais equipamentos, mas também as que o próprio dispositivo pode causar no meio.

As fontes de EMI podem ser tanto naturais quanto artificiais, as causadas pelo homem. Como exemplos de fontes naturais pode-se citar o campo geomagnético, as manchas solares, as descargas atmosféricas, que são as mais evidentes [1] [4]. O nível de gravidade de uma EMI depende do equipamento em questão, por exemplo interferências em sinais de rádio ou

TV podem ser consideradas de menor gravidade, enquanto que interferências em equipamentos médicos em uso podem ser mesmo fatais.

Toda EMI é constituída basicamente de três elementos: uma fonte de perturbação, que emite as ondas eletromagnéticas responsáveis pela interferência, um caminho de acoplamento, que representa o meio através do qual as perturbações se propagam, e o receptor ou vítima, que é o dispositivo que recebe os distúrbios eletromagnéticos [2] [4].

As origens das EMI podem ser definidas basicamente como emissões conduzidas ou emissões irradiadas. Emissões conduzidas são as correntes que quando circuladas em condutores metálicos e injetadas na rede de alimentação comum podem causar interferência em outros dispositivos conectados na mesma rede. Emissões irradiadas referem-se a campos eletromagnéticos irradiados pelo dispositivo que podem ser capturados por outros dispositivos, causando interferência. A Figura 2 mostra um esquema ilustrando as componentes de uma EMI e suas origens.

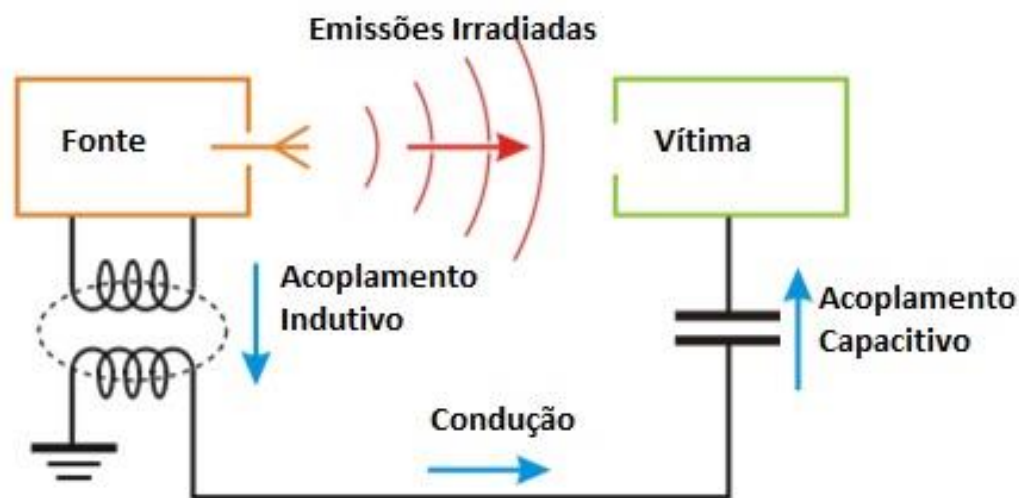


Figura 2 – Origem e formas de propagação de uma Interferência Eletromagnética.

1.2 Compatibilidade Eletromagnética

A consciência dos problemas causados pelas EMI leva a necessidade da definição de normas de Compatibilidade Eletromagnética (EMC), que buscam fazer com que os dispositivos funcionem corretamente em qualquer ambiente eletromagnético. As normas de EMC podem ser definidas tanto por agências governamentais quanto pelos fabricantes dos dispositivos, sendo que atualmente existem alguns órgãos internacionais que buscam a

padronização das normas de EMC, destacando-se entre eles o Comitê Internacional Especial de Rádio Interferência (CISPR, do francês *Comite International Spetial des Perturbations Radioelectriques*), que já publicou mais de trinta normas sobre o assunto, sendo as mais conhecidas [3] [5]:

- CISPR 10- *Organization, Rules and Procedures of the CISPR*;
- CISPR 11- *Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment- Electromagnetic Disturbance Characteristics- Limits and Methods of Measurement*;
- CISPR 14- *Electromagnetic Compatibility- Requirements for Household Appliance, Electric Tools, and Similar Apparatus : 1) Emissions, 2) Immunity*;
- CISPR 22- *Information Technology Equipment- Radio Disturbance Characteristic- Limits and Methods of Measurement*;
- CISPR 24- *Immunity Characteristics- Limits and Methods of Measurement* ;
- CISPR 24- *Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices- Limits and methods of measurement*.

Para ser considerado eletromagneticamente compatível um dispositivo qualquer não pode causar interferências nos outros equipamentos presentes no meio, deve ser imune às emissões desses equipamentos e não pode causar interferências em si mesmo [5]. Diversas são as técnicas utilizadas na busca da EMC dos dispositivos, sendo as mais básicas a ação direta na fonte da perturbação, o projeto de barreiras de blindagem e o projeto de filtros [1] [2] [4].

A busca da compatibilidade eletromagnética é estudada em muitos trabalhos da atualidade. Em [5] é feito um estudo das interferências eletromagnéticas geradas em circuitos digitais, em [6] é feito um estudo da EMC em sistemas embarcados automotivos, em [3] é feita uma revisão bibliográfica sobre compatibilidade eletromagnética em aparelhagem de média tensão e em [7] é feito um estudo dos efeitos de EMI em sistemas de aterramento elétrico.

1.3 Método dos Elementos Finitos

1.3.1 Introdução

O estudo de problemas eletromagnéticos exige frequentemente a resolução de equações diferenciais parciais (EDPs) que, nem sempre, possuem soluções analíticas ou são difíceis de serem solucionadas pelos métodos numéricos tradicionais.

Uma das formas utilizadas na atualidade para facilitar a solução é trabalhar com a técnica do Método dos Elementos Finitos (MEF), um método desenvolvido por volta de 1943, que vem sendo utilizado intensamente em conjunto com softwares computacionais para resolver problemas envolvendo EDPs em diversas áreas da engenharia e ciências aplicadas. Para se ter uma ideia do status atual do MEF, estima-se que cerca de 1 bilhão de dólares vêm sendo gastos atualmente nos Estados Unidos em pesquisas relacionadas ao método [8].

1.3.2 Definição

O Método dos Elementos Finitos consiste basicamente em um método matemático para a simplificação e solução de problemas envolvendo equações diferenciais parciais, mediante aplicação das condições de contorno e valores iniciais. A aplicação prática do MEF é conhecida como Análise de Elementos Finitos (AEF).

O método consiste basicamente na simplificação de um problema de alta complexidade por meio de aproximação das soluções de um grande número de problemas mais simples. Um grande número de problemas em engenharia envolve regiões com contornos e formas arbitrárias, podendo ter geometrias altamente complexas. Essas regiões são divididas em um grande número de regiões com geometrias mais simples em relação à região original, essas regiões podem ser bidimensionais ou tridimensionais e são chamadas de elementos finitos [8] [9].

Em cada um dos elementos finitos a solução do problema é aproximada pela resolução de funções mais simples, como potencial ou energia por exemplo, aplicando-se condições de contornos às fronteiras e nós das regiões. Resolvendo-se essas equações para um número suficiente de regiões, a solução global do problema pode ser determinada como um todo. A Figura 3 mostra uma ilustração de como o MEF pode ser aplicado a um problema cuja região é uma placa com um furo central, os elementos finitos utilizados neste caso foram triângulos.

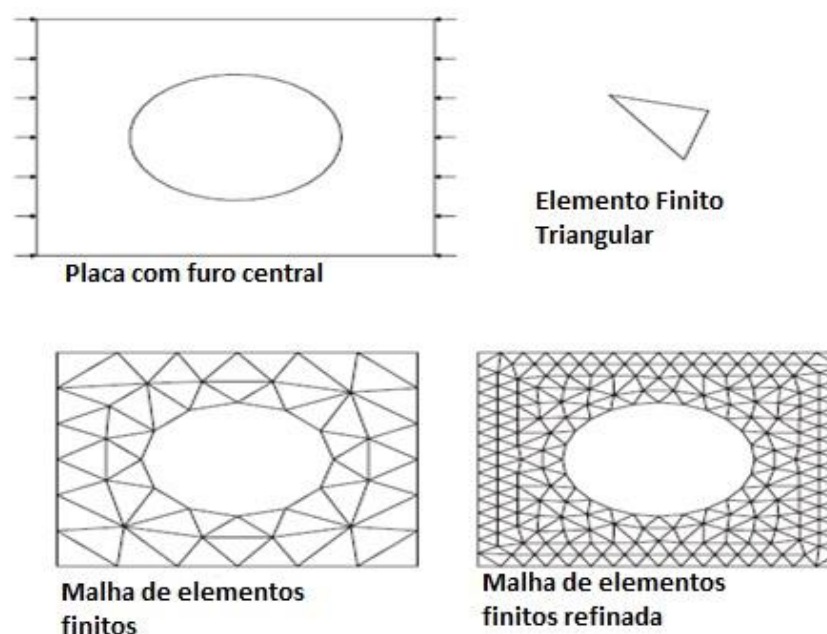


Figura 3 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos em uma placa com furo central.

1.3.3 Aplicações do Método dos Elementos Finitos

Na atualidade existem diversas literaturas nas quais podem ser encontrados inúmeros exemplos de trabalhos que utilizam a técnica dos elementos finitos para a resolução de problemas eletromagnéticos:

- Em [9] foi feito um estudo das EMI causadas por diversos cabos elétricos uns nos outros e formas de combatê-las, sendo todo o estudo feito com base no MEF;
- Em [10] é utilizado um software de elementos finitos para análise de linhas coaxiais cilíndricas;
- Em [11] mostra-se como uma cabeça humana pode ser modelada por meio de uma técnica que combina método dos elementos finitos com imagens geradas por ressonância magnética e tomografia computadorizada;
- Em [12] é mostrado como um software de elementos finitos foi utilizado para o dimensionamento de uma máquina síncrona de ímãs permanentes, confirmando os valores de parâmetros determinados analiticamente e possibilitando a análise de informações adicionais sobre a máquina projetada, como sua distribuição de fluxo por exemplo;

- Em [13] é mostrada uma abordagem por meio da qual campos eletromagnéticos estáticos são modelados utilizando-se a técnica dos elementos finitos.

A gama de aplicações do MEF não restringe-se apenas a problemas de Eletromagnetismo, mas estende-se também a outras áreas da ciência, como:

- Estresse e análises térmicas de peças industriais, tais como chips eletrônicos, dispositivos elétricos, válvulas, tubulações, vasos de pressão, motores de automóveis e aeronaves;
- Análise sísmica de barragens, usinas, cidades e arranha-céus;
- Análise de acidentes de carros, trens e aeronaves;
- Análise de fluxo de fluido em sistemas de refrigeração e ventilação;
- Análise de procedimentos cirúrgicos, como cirurgia plástica, reconstrução da mandíbula, correção de escoliose, dentre outros.

1.4 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo, a partir de uma revisão geral sobre os fenômenos ligados à Interferência Eletromagnética, suas origens e formas de combate, com ênfase na técnica de blindagem condutora, estudar o efeito da blindagem eletromagnética pelo método dos elementos finitos.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Fazer um estudo dos principais conceitos relacionados à Interferência e Compatibilidade Eletromagnética;
- Fazer um estudo dos principais métodos de combate às EMI;
- Analisar a eficiência de uma barreira de blindagem condutora na proteção de dispositivos contra distúrbios causados por EMI;
- Simular a blindagem eletromagnética por meio do software de elementos finitos *FEMM*;
- Analisar os resultados obtidos na simulação, comparando-os com os esperados.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Propagação de Ondas Eletromagnéticas em meios condutores*

A propagação de uma onda eletromagnética em um meio condutor é um caso particular da propagação de uma onda eletromagnética em um meio qualquer conforme descrito na sessão 1.1.2. Para um bom condutor elétrico as seguintes considerações podem ser feitas:

- $\sigma \cong \infty$
- $\varepsilon = \varepsilon_0$
- $\mu = \mu_r \mu_0$

As equações gerais para a constante de atenuação e de fase da onda podem ser dadas por:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (22)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (23)$$

Desta forma aplicando-se as simplificações descritas acima α e β tornam-se:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (24)$$

Da mesma forma a equação geral para a impedância intrínseca pode ser escrita como:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Que para o caso de um bom condutor resulta:

$$\eta = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \angle 45^\circ \quad (26)$$

Observa-se que o campo elétrico está adiantado de 45° em relação ao campo magnético durante a propagação em meios condutores, além disso sua amplitude é atenuada a

medida que a onda se propaga no meio. A Figura 4 mostra a atenuação da amplitude de uma onda eletromagnética a medida que a mesma se propaga em um meio condutor.

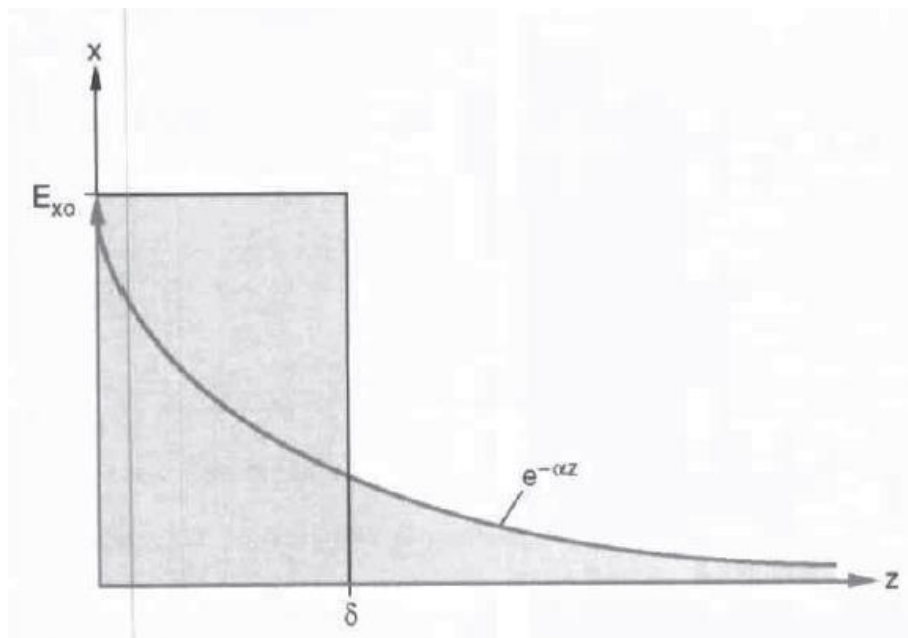


Figura 4 – Atenuação da amplitude de uma onda eletromagnética a medida que a mesma se propaga em um meio condutor.

Quando uma onda eletromagnética se propaga em um meio, a mesma pode sofrer atenuação ou não em sua amplitude dependendo do meio no qual ela está se propagando. Nota-se, por exemplo, que quando uma onda eletromagnética propaga-se no ar, seu comportamento é aproximadamente o mesmo de quando ela está se propagando no vácuo. Utilizando-se, neste caso, as constantes eletromagnéticas para o vácuo nas equações (19) e (20), percebe-se que não há atenuação na amplitude de uma onda eletromagnética quando a mesma se propaga no ar (aproximadamente vácuo), é dito então que a onda eletromagnética não sofre atenuação quando ela está propagando-se no espaço livre.

O parâmetro que define o quanto uma onda é atenuada é denominado profundidade pelicular (δ). A profundidade pelicular é uma medida da penetração da onda em um meio qualquer e é definida como a profundidade em que a onda reduz sua amplitude a aproximadamente 37% de seu valor inicial. A equação (27) define a profundidade pelicular de um determinado material. Observa-se que a profundidade pelicular é inversamente proporcional à frequência, à permeabilidade magnética e à condutividade.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (27)$$

2.2 Eficiência de blindagem condutora

2.2.1 Definição

Conforme comentado na sessão 1.2, um dispositivo é considerado eletromagneticamente compatível quando ele não gera ondas que causem distúrbios em seu meio e nem recebe distúrbios de fontes do meio. Assim a finalidade de uma barreira de blindagem é impedir que a energia irradiada penetre em determinada região do espaço ou a de confinar a energia irradiada em uma região específica. As blindagens podem ter diversas formas, como compartimentos, caixas e cabos condutores.

Quando uma onda eletromagnética incide em uma barreira de blindagem, parte de sua radiação será refletida pela barreira e parte será transmitida pela mesma, conforme mostra a Figura 5. A propagação da onda dentro da barreira neste caso é considerada como a propagação em um meio com perdas. Materiais condutores são frequentemente utilizados para o projeto de blindagens eletromagnéticas, uma vez que possuem uma constante de atenuação (α) muito alta e, portanto, baixa profundidade pelicular conforme a equação (27).

A eficiência de blindagem de uma barreira em decibéis é definida como sendo a relação entre os módulos dos campos elétricos e/ou magnéticos incidentes e transmitidos, tomando como exemplo o campo elétrico esta relação é definida pela equação (28). Para a maioria dos problemas de EMI uma eficiência de blindagem de 40-60 dB é suficiente [2], a Tabela 2 mostra alguns valores de eficiência e a porcentagem de atenuação da onda transmitida em relação à incidente.

$$EB_{dB} = 20 \log \left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| \quad (28)$$

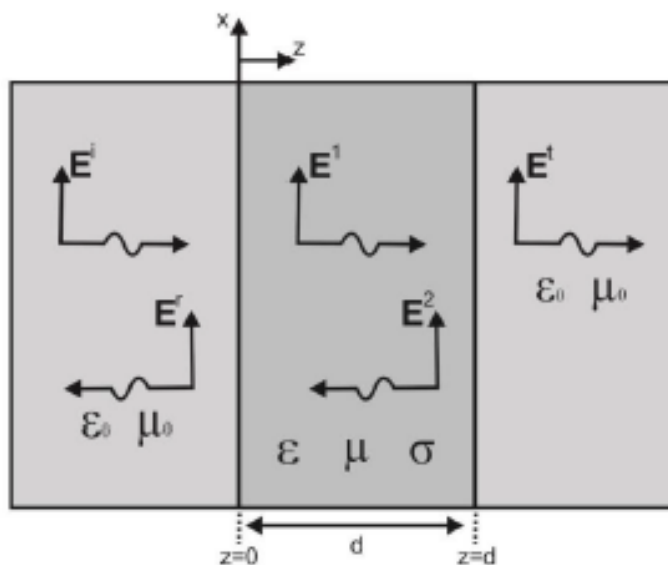


Figura 5 – Esquema da incidência de uma onda eletromagnética em uma barreira de blindagem.

Tabela 2- Porcentagem de atenuação da onda transmitida em relação à incidente para alguns valores de Eficiência da Blindagem.

Eficiência da Blindagem (dB)	Taxa de Atenuação	Porcentagem de Atenuação (%)
20	10:1	90
40	100:1	99
60	1000:1	99,9
80	10000:1	99,99
100	100000:1	99,999
120	1000000:1	99,9999

2.2.2 Eficiência teórica para uma blindagem condutora

Considere que uma onda eletromagnética propagando-se no ar (aproximadamente no vácuo) incide em uma blindagem condutora de espessura d (Figura 5). Considerando que as ondas incidentes são planas uniformes, os campos incidentes podem ser escritos como:

$$E_x^i = E_m^i e^{-j\beta_0 z} \quad (29)$$

$$H_y^i = \frac{E_m^i}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (30)$$

Onde η_0 e β_0 são constantes conhecidas como impedância intrínseca e constante de fase da onda no vácuo, sendo definidas por:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi \Omega \cong 377 \Omega \quad (31)$$

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \quad (32)$$

Os campos refletidos na superfície da barreira são dados por:

$$E_x^r = E_m^r e^{j\beta_0 z} \quad (33)$$

$$H_y^r = \frac{E_m^r}{\eta_0} e^{j\beta_0 z} \quad (34)$$

Os campos transmitidos que deixam a barreira são dados por:

$$E_x^t = E_m^t e^{-j\beta_0 z} \quad (35)$$

$$H_y^t = \frac{E_m^t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (36)$$

Quando a onda penetra na barreira de blindagem ela sofre perdas, essas perdas são representadas na Figura 5 pelos campos definidos pelas seguintes equações:

$$E_x^1 = E_m^1 e^{-\gamma z} \quad (37)$$

$$H_y^1 = \frac{E_m^1}{\eta} e^{-\gamma z} \quad (38)$$

$$E_x^2 = E_m^2 e^{-\gamma z} \quad (39)$$

$$H_y^2 = \frac{E_m^2}{\eta} e^{-\gamma z} \quad (40)$$

Aplicando-se as condições de fronteira na Figura 5 em $z = 0$, tem-se que:

$$E_m^i + E_m^r = E_m^1 + E_m^2 \quad (41)$$

$$\frac{E_m^i}{\eta_0} - \frac{E_m^r}{\eta_0} = \frac{E_m^1}{\eta} - \frac{E_m^2}{\eta} \quad (42)$$

Aplicando-se as condições de fronteira em $z = d$, obtém-se:

$$E_m^1 e^{-j\beta d} + E_m^2 e^{j\beta d} = E_m^t e^{-j\beta_0 d} \quad (43)$$

$$\frac{E_m^1}{\eta} e^{-j\beta d} + \frac{E_m^2 e^{j\beta d}}{\eta} = \frac{E_m^t e^{-j\beta_0 d}}{\eta_0} \quad (44)$$

Combinando-se as equações acima de forma a eliminar E_m^1 e E_m^2 obtém-se:

$$E_m^i + \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta}\right) E_m^r = E_m^t e^{-j\beta_0 d} e^{j\beta d} \quad (45)$$

$$E_m^i + \left(\frac{\eta_0 + \eta}{\eta_0 - \eta}\right) E_m^r = E_m^t e^{-j\beta_0 d} e^{-j\beta d} \quad (46)$$

Combinando-se as equações (45) e (46) e resolvendo-se para a razão entre os campos incidente e transmitido tem-se:

$$\frac{E_m^i}{E_m^t} = \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0 \eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta}\right) e^{-2\frac{d}{\delta}} e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right] e^{j\frac{d}{\delta}} e^{\frac{d}{\delta}} e^{-j\beta_0 d} \quad (47)$$

Calculando-se o modulo de (47):

$$\left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| = \left| \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0 \eta} \right| \left| 1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta}\right) e^{-2\frac{d}{\delta}} e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (48)$$

Considerando-se que a espessura da barreira é muito maior que a profundidade pelicular da mesma e que a impedância intrínseca do material é muito menor que a do vácuo, a equação (48) pode ser simplificada para:

$$\left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| = \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (49)$$

Em termos de eficiência de blindagem fazendo-se uso da equação (28) tem-se que:

$$EB_{dB} = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (50)$$

Aplicando-se propriedades de logaritmos:

$$EB_{dB} = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right| + 20 \log e^{\frac{d}{\delta}} \quad (51)$$

Na equação (51) pode-se notar a presença de dois termos, o primeiro deles, primeiro termo a direita da equação, depende apenas das características dos meios nos quais a onda se propaga e ignora completamente a espessura da barreira. As perdas dadas por esse termo são, portanto, conhecidas como perdas por reflexão e são constantes uma vez que o material constituinte da barreira tenha sido definido.

O segundo termo está diretamente relacionado com a espessura d da barreira, mostrando que quanto maior a sua espessura maior o nível de atenuação. As perdas dadas por esse termo da equação (51) são conhecidas como perdas por absorção. A equação (51) é de grande importância teórica para o estudo da blindagem como forma de combate às EMI, pois não só permite a verificação da importância da espessura e do material utilizado na blindagem, mas também o cálculo direto da eficiência de blindagem, uma vez que sejam conhecidas as características dos materiais e a espessura da barreira. No entanto, deve-se ter

em mente as diversas considerações e simplificações que foram feitas na dedução desta equação, o que pode levar a alguns resultados significativamente diferentes dos encontrados na prática.

2.3 FEMM e Método dos Elementos Finitos

2.3.1 Introdução

O software *FEMM* (do inglês *Finite Element Method Magnetics*) é um software livre que vem sendo muito utilizado para a análise de problemas eletromagnéticos na atualidade [12] [14] [15], com destaque para problemas envolvendo campos eletromagnéticos de baixa frequência em duas dimensões, domínios planares e simetria axial. A utilização deste software não se limita, no entanto, à análise de problemas eletromagnéticos, sendo também utilizado em problemas de fluxo de calor [14].

O funcionamento do *FEMM* para a resolução de um determinado problema pode ser dividido em três etapas, sendo elas pré-processamento, processamento e pós-processamento.

2.3.2 Pré-processamento

Nesta etapa são definidas as condições básicas do problema, como:

- Formas geométricas envolvidas;
- Propriedades físicas dos materiais utilizados, tais como permissividade e permeabilidade relativa;
- Condições de fronteira, que devem ser aplicadas às delimitações externas das fronteiras do problema.

Para este trabalho, a etapa de Pré-processamento foi realizada de forma a se configurar o problema conforme mostrado na Figura 6, onde é visualizado no centro da Figura a fonte de EMI, que foi escolhida como sendo um condutor cilíndrico de comprimento grande por ser uma configuração comum de geração de EMI irradiadas. Na Figura 6 pode ser visualizada também a barreira condutora que, neste caso, é feita de cobre. Neste trabalho foram realizadas diversas simulações diferentes com configurações análogas à da Figura 6, variando-se a espessura da blindagem e o material utilizado na construção da mesma.

O esquema mostrado na Figura 6 foi feito de forma simétrica, ou seja, apenas metade da configuração representada para o problema está sendo mostrada. Assim o que está sendo verificado com essa configuração é na verdade a eficiência da blindagem para a isolação de uma radiação eletromagnética que se propaga do dispositivo para o meio externo, uma vez que a barreira de blindagem está circundando a fonte de EMI. No entanto a análise quanto à eficiência é a mesma para o caso da incidência de interferências de uma fonte externa, uma vez que se analisa apenas a razão entre os campos transmitidos e incidentes para o cálculo da eficiência de blindagem.

Uma das dificuldades na etapa de pré-processamento neste trabalho foi o distanciamento da fonte à barreira de blindagem, pois na dedução da equação (51) considerou-se que a radiação eletromagnética incidente era plana e uniforme, ou seja, que fonte de EMI estava muito afastada da barreira. Na Figura 6 há um determinado raio de distância entre a fonte e a barreira, assim as ondas que chegam à barreira não são planas e sim esféricas, assim o fato de as ondas não serem perfeitamente planas e uniformes na simulação é uma fonte de erros para a diferença entre os valores simulados e calculados.

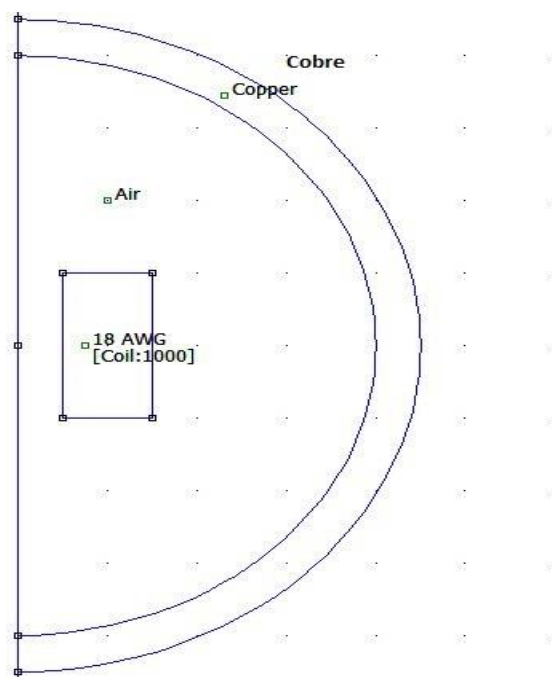


Figura 6 – Geometria do problema utilizado para simulação da eficiência de blindagem no *FEMM*, desenvolvida na etapa de Pré-processamento.

2.3.3 Processamento

Esta é a etapa na qual é aplicada de fato o Método dos Elementos Finitos para a resolução do problema. Inicialmente é realizada a chamada triangulação do problema, isto é, a geometria do problema é dividida em vários triângulos interconectados, como pode ser visto na Figura 7. Estes triângulos são os elementos finitos utilizados para a resolução do problema.

Após ter feito a divisão da geometria do problema em diversos triângulos, o *FEMM* calcula o valor do vetor potencial magnético no vértice de cada um desses triângulos. O valor do vetor potencial magnético em outros pontos é calculado através de métodos de aproximação linear, o que mostra a importância de se escolher um número suficiente de regiões, pois quanto maior for o número de triângulos no qual o problema for dividido, maior será a precisão da solução encontrada para a resposta do problema como um todo. De posse dos valores dos potenciais magnéticos, as demais grandezas são determinadas a partir dos mesmos com base na aplicação das leis do Eletromagnetismo.

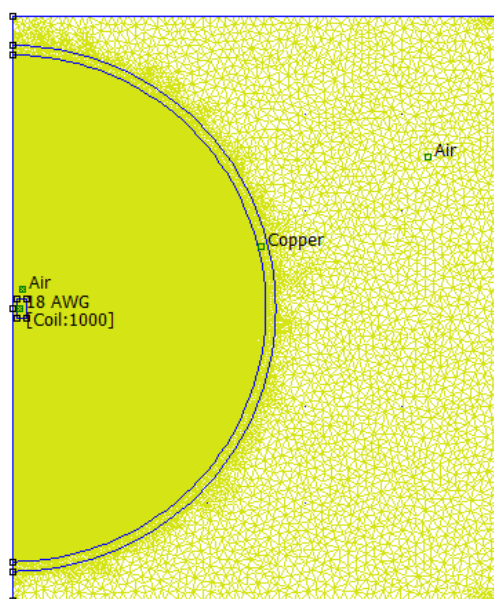


Figura 7 - Aplicação do Método dos Elementos Finitos feita pelo *FEMM* na geometria da Figura 6.

2.3.4 Pós-processamento

Esta é a etapa de verificação dos resultados encontrados no processamento. O *FEMM* permite a verificação de diversas grandezas envolvidas no problema, tais como, verificação das linhas de indução, plotagem de gráficos dos valores dos campos eletromagnéticos ao longo de um contorno e verificação dos valores pontuais das grandezas eletromagnéticas em

qualquer região do problema. A Figura 8 mostra a geometria de um problema de configuração semelhante ao da Figura 6 na etapa de Pós-processamento, onde pode ser verificado a forma como as linhas do campo magnético gerado pela fonte incidiram na barreira de blindagem.

Neste trabalho, após a etapa de Pós-processamento, são coletados os valores dos campos eletromagnéticos incidente e transmitido na simulação, ao longo de todo o comprimento da blindagem. De posse destes é feita a análise dos valores de eficiência de blindagem ao longo do comprimento. Os valores obtidos foram então comparados com os calculados pela equação (51) e com os esperados para aplicações aceitáveis em EMC [2], foi feita então uma análise para se tentar entender e justificar as divergências entre os valores encontrados. Neste trabalho são estudadas barreiras de blindagem constituídas de cobre e ferro, onde para cada um desses materiais as espessuras da barreira consideradas foram de 0,5 mm, 1,0 mm e 3,0 mm.

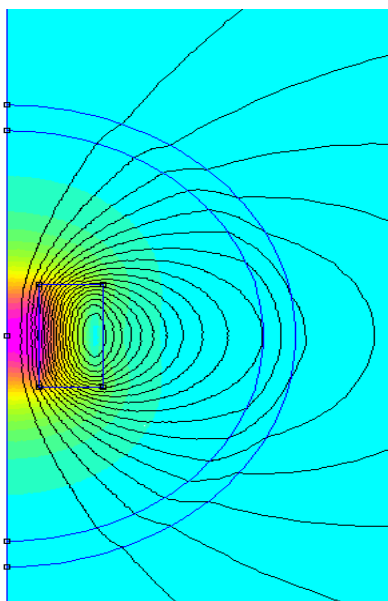


Figura 8 –Problema com configuração semelhante ao da Figura 6 na etapa de Pós-processamento.

3 *Resultados e Discussões*

A Tabela 3 mostra os valores calculados para a eficiência de blindagem da barreira de Ferro, considerando-se que a frequência da EMI incidente é de 60 Hz. Foram feitos os cálculos considerando-se três valores diferentes de espessura para a barreira, conforme especificado na sessão 2.3.4.

Pode-se notar a partir dos valores apresentados na Tabela 3 que o valor da Atenuação por Reflexão independe da espessura da barreira, conforme verificado pela análise da equação para a eficiência da blindagem (51). Os valores de Atenuação por Absorção aumentam com o aumento da espessura da barreira, isso também já é esperado pela mesma equação. Além disso deve-se lembrar que a propagação da onda na barreira antes dela ser transmitida segue aproximadamente as leis de propagação de uma onda eletromagnética em um meio condutor. Portanto, quanto mais tempo a onda permanece neste meio, isto é, mais espessa é a barreira de blindagem, maiores serão as perdas da onda e maior será sua atenuação, portanto, maior será a eficiência da blindagem.

Tabela 3-Eficiência da Blindagem calculada para uma blindagem de Ferro.

Blindagem de Ferro (60 Hz)			
Espessura (mm)	Atenuação por Absorção (dB)	Atenuação por Reflexão (dB)	Atenuação Total (dB)
0,5	6,637	112,663	119,3
1,0	13,274		125,937
3,0	39,82		152,483

A Tabela 4 mostra os valores obtidos para uma barreira de blindagem de Cobre, considerando-se as mesmas condições do item anterior.

Tabela 4-Eficiência da Blindagem calculada para uma blindagem de Cobre.

Blindagem de Cobre (60 Hz)			
Espessura (mm)	Atenuação por Absorção (dB)	Atenuação por Reflexão (dB)	Atenuação Total (dB)
0,5	0,509	150,358	150,867
1,0	1,018		151,376
3,0	3,054		153,412

As mesmas conclusões quanto às atenuações por absorção e reflexão podem ser observadas, no entanto deve-se notar que a atenuação por absorção do ferro é significativamente maior que a do cobre, ao passo que a atenuação por reflexão do cobre é superior a do ferro.

As diferenças entre os resultados apresentados para os dois materiais se deve aos valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética apresentados pelos mesmos. O cobre possui um alto valor de condutividade e um baixo valor de permeabilidade, situação inversa à do ferro, com baixa condutividade e alta permeabilidade. Assim analisando-se diversos valores de frequência para os dois materiais, considerando-se barreiras de mesma espessura, pode-se concluir que o ferro é um bom material quando deseja-se atenuar radiações de alta frequência, enquanto que o cobre é um bom material quando deseja-se realizar a atenuação em baixas frequências, uma vez que em baixas frequências a atenuação predominante é a por reflexão e em altas frequências é a por absorção [4].

A Tabela 5 mostra os valores obtidos para as eficiências de blindagem de uma blindagem de Ferro, para os mesmos casos da Tabela 3. Pode-se notar que o padrão de aumento da eficiência com a espessura foi respeitado, reforçando a ideia do aumento da atenuação por absorção com o aumento da espessura da barreira, conforme equação (51). Os valores obtidos na simulação, todavia, diferiram um pouco dos calculados pela equação (51). Os erros dos valores simulados com relação aos calculados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 5-Eficiência da Blindagem para uma blindagem de Ferro obtida no *FEMM*.

Blindagem de Ferro na Simulação (60 Hz)	
Espessura (mm)	Eficiência da Blindagem (dB)
0,5	98,6785
1,0	121,5362
3,0	147,2758

Tabela 6-Erro dos valores simulados em relação aos calculados para uma blindagem de Ferro.

Erro obtido na Blindagem de Ferro (60 Hz)	
Espessura (mm)	Erro (%)
0,5	17,28
1,0	3,62
3,0	3,53

A Tabela 7 mostra os valores obtidos para a eficiência de blindagem do cobre por meio da simulação realizada no *FEMM*. Novamente nota-se o aumento da eficiência com o aumento da espessura. Na Tabela 8 são mostrados os erros dos valores simulados com relação aos calculados para a blindagem de cobre.

Tabela 7- Eficiência da Blindagem para uma blindagem de Cobre obtida no *FEMM*.

Blindagem de Cobre na Simulação (60 Hz)	
Espessura (mm)	Eficiência da Blindagem (dB)
0,5	156,8616
1,0	165,6992
3,0	165,7335

Tabela 8- Erro dos valores simulados em relação aos calculados para uma blindagem de Cobre.

Erro obtido na Blindagem de Cobre (60 Hz)	
Espessura (mm)	Erro (%)
0,5	3,97
1,0	9,46
3,0	8,03

Os valores obtidos para a eficiência de blindagem do cobre na simulação são maiores que os obtidos para o ferro, isso já era esperado, pois a simulação foi feita na frequência de 60 Hz e em baixas frequências há predominância da atenuação por reflexão. Pode-se notar, entretanto, que com o aumento da espessura da barreira houve um aumento maior na eficiência de blindagem do ferro, com relação ao seu valor anterior, que na do cobre, isso também já era esperado, pois a barreira de ferro é mais sensível à atenuação por absorção que a do cobre, esse padrão de aumento também foi condizente com os resultados calculados, mostrados na Tabela 3 e Tabela 4.

Conforme citado na sessão 2.3.2, as ondas geradas na simulação não são planas e uniformes, pois a fonte não encontra-se muito afastada da barreira. No entanto tentou-se deixar a barreira suficientemente afastada da fonte para que os valores de eficiência de blindagem não divergissem muito dos calculados e o tempo de simulação não fosse muito

grande. Isso foi feito pelo método das tentativas e foram encontradas as seguintes distâncias radiais da fonte à barreira, 4 mm e 26 mm, para o cobre e o ferro respectivamente.

4 Conclusões

Neste trabalho, procurou-se fazer uma revisão de literatura sobre os principais conceitos relacionados à Interferência e Compatibilidade Eletromagnética, bem como da relevância da utilização do Método dos Elementos Finitos para a resolução de problemas de engenharia e ciências aplicadas na atualidade, especialmente, em problemas eletromagnéticos.

Pôde-se notar que tanto nos cálculos quanto nas simulações realizadas com o software de elementos finitos *FEMM* o padrão de aumento da eficiência da blindagem com o aumento da espessura da barreira foi respeitado, pois quanto maior for a espessura da barreira maior será o tempo que a onda eletromagnética levará para atravessar o meio com perdas.

Foram encontradas algumas diferenças entre os resultados gerados nas simulações do *FEMM* e os calculados pela equação deduzida para a eficiência da blindagem. Essa diferença se deve, principalmente, às limitações do software para se trabalhar com ondas eletromagnéticas variantes no tempo em diferentes faixas de frequência. Além disso é válido lembrar que o método dos elementos finitos é um método baseado em aproximações, assim sempre haverá uma diferença entre as soluções determinadas pelo mesmo e as soluções reais, por menor que sejam.

Pôde-se confirmar entretanto, a veracidade a respeito da atenuação por absorção e comprovar a agilidade do Método dos Elementos Finitos quando associado a softwares computacionais, o que justifica a crescente utilização do mesmo na atualidade. É bom frisar também que para se chegar à equação geral da blindagem, equação (51), foram feitas algumas simplificações nas resoluções das equações de Maxwell e também nas aplicações das condições de contorno, o que fez com que os resultados das simulações divergissem um pouco da realidade.

Fica como sugestão para os próximos trabalhos a simulação de barreiras de blindagem em um software de elementos finitos onde seja possível fazer uma análise com variação de frequência das ondas incidentes e assim verificar se as respostas obtidas por esse método para as eficiências de blindagem condizem com os obtidos pela equação deduzida, poderia ser utilizado para este fim o software *Ansys* por exemplo, um software comercial que já vem sendo muito utilizado em problemas de engenharia, como análises de EMC e vibrações

mecânicas. Finalmente, ainda como sugestão para continuidade deste trabalho é proposto que como, atualmente, outros materiais têm sido utilizados para efeitos de blindagem, de custos menores, que seja aperfeiçoada a técnica de elementos finitos para estudar a eficiência da blindagem e comparar os materiais mais eficientes no tocante custo-benefício. Fica como sugestão ainda a montagem de um protótipo, como um circuito eletrônico simples envolto por uma blindagem condutora, para que sejam feitas medidas reais dos valores dos campos eletromagnéticos incidentes e transmitidos, e assim determinados valores práticos para eficiência de blindagem e verificados se os mesmos condizem com os calculados pela equação de eficiência de blindagem e simulação pela técnica de elementos finitos.

Referências Bibliográficas

1. N. O. SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2004.
2. WENTWORTH, S. M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
3. ALVES FERREIRA DA SILVA PORTOCARRERO, S. I. **Estudo da Compatibilidade Electromagnética de Aparelhagem de Média Tensão**. Porto: FEUP, 2006.
4. SANTOS, A. D. S. **Estudo da Interferência Eletromagnética em Equipamentos Eletrônicos**. Viçosa: UFV, 2014.
5. MOURA, D. D. **Contribuição à Análise de Interferência e Compatibilidade Eletromagnética em Circuito Digital Através de Simulação Numérica**. Florianópolis: UFSC, 2011.
6. PRADO SOARES, E. **Introdução a Compatibilidade Eletromagnética Automotiva**. São Caetano do Sul: IMT, 2013.
7. VISACRO F., S. Sistemas de Aterramentos Elétricos. **Adaptado de: "EMC: Aspectos Fundamentais da Influência do Aterramento Elétrico", do mesmo autor**.
8. FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
9. ZAFARUDDIN, M. **Finite Element Analysis of EMI in a Multi-conductor connector**. Akron: [s.n.], 2013.
10. LICARIÃO NOGUEIRA, A. F. Análise de cabos coaxiais cilíndricos usando a técnica dos elementos finitos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 565-573, 2007.
11. LUI, J.; ZHU, S.; HE, B. Finite Element Modeling of Human Head from Medical Images. **Proceedings of NFSI & ICFBI2007**, 12-14 October 2007. 133-135.
12. DANTAS SIMÕES, B. **Dimensionamento de uma Máquina Síncrona de Ímãs Pemanentes com Validação Através de um Software do tipo Elementos Finitos**. Viçosa: UFV, 2010.
13. LAGER, I. E.; MUR, G. Finite Element Method for Stationary and Static Electromagnetic Fields. **Journal of Applied Physics**, v. 81, n. 8, p. 4079-4081, April 1997.
14. MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual**. [S.l.], p. 160. 2013.
15. ZAKARIA, Z. et al. Simulation of Magnetic Flux Leakage (MFL) Analysis Using FEMM Software. **2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010)**, Penang, October 2010. 481-486.
16. BITTENCOURT DE LIZ, M. **Contribuição para a Redução da Interferência Eletromagnética em Fontes Chaveadas**. Florianópolis: UFSC, 2003.
17. ISTENIC, M.; OLSEN, R. G. A Simple Hybrid Method for ELF Shielding by Imperfect Finite Planar Shields. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 46, n. 2, p. 199-207, May 2004.
18. OBIEKEZIE, C. et al. A Technique for Analyzing EMC Shielding Effectiveness Based on Near-Field Measurement and Equivalent Dipole Modeling. **2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013)**, Brugge, p. 699-

- 704, September 2013.
19. SOUZA, H. D. **Avaliação de uma blindagem eletromagnética para frequências até 1kHz**. Salvador, p. 13. 2003.
 20. JR., M. D. S. **Estudo de Materiais e Técnicas para a Blindagem de Campos Magnéticos de Frequências Industriais**. Belo Horizonte: UFMG, 2004.