

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

AROALDO DE SOUZA SANTOS

**ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM  
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

VIÇOSA  
2014

AROALDO DE SOUZA SANTOS

**ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM  
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

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  
2014



**AROALDO DE SOUZA SANTOS**

**ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM  
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

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 16 de Julho de 2014.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

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

---

**Prof. Dr. André Gomes Torres**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Daniel Khéde Dourado Villa - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“Não viva para que a sua presença seja notada,  
mas para que a sua falta seja sentida...”*

*(Bob Marley)*

*Dedico este trabalho a todos meus amigos do alojamento 1712, que conviveram comigo por muito tempo em Viçosa e dedico também a toda minha família .*

## *Agradecimentos*

Agradeço a minha mãe e ao meu pai pelo apoio em todas as etapas de minha vida e pelo incentivo que eles me deram a sempre continuar estudando. Agradeço também aos amigos do alojamento em especial, Markimmm e Cabeça que foram os amigos que sempre estavam na luta comigo e também aos meus amigos da elétrica, Walter, Willian e Marcos Ferraz, Josyene e Samuel Chaves. Agradeço ao professor José Tarcísio em que sem seu apoio e dedicação este trabalho não poderia ser realizado.

## *Resumo*

A interferência eletromagnética esta presente em sistemas elétricos de potência, rede de computadores, sistemas de telecomunicações, equipamentos eletrônicos e entre outros. Praticamente esta envolvida em todos os setores. A interferência eletromagnética é caracterizada por uma degradação no desempenho de um equipamento devida à uma perturbação eletromagnética. Pode-se destacar como fontes de interferência eletromagnética: Descargas de raio atmosférico, telefones celulares, computadores, linhas de transmissão, motores.

As perturbações eletromagnéticas podem se propagar por condução, acoplamento e radiação. Elas podem ser reduzidas com a utilização de aterramentos, filtros e blindagem. A blindagem consiste no impedimento da interferência eletromagnética de penetrar ou sair de um determinado dispositivo, ou seja, ela previne que o sinal dentro da blindagem interfira em um equipamento fora da mesma e vice versa. Para o estudo detalhado da blindagem é necessário conhecer como se comporta a onda eletromagnética ao penetrar um condutor, esse estudo permitirá obter a equação para o levantamento da curva de eficiência da blindagem. Com essa curva pode-se obter informações importantes relacionadas à blindagem, de modo a obter informações corretas para a sua análise.

A blindagem de equipamentos eletrônicos reduz a emissão e/ou a recepção de perturbações eletromagnéticas, tornando-os imunes a qualquer interferência. Essa técnica pode ser aplicada na fonte e/ou na vitima dependendo da necessidade do problema. Este trabalho terá como foco o levantamento da curva de eficiência de uma blindagem, sendo assim necessário, estudar a propagação de ondas eletromagnéticas em condutores para que seja possível chegar na equação de eficiência de uma blindagem.

## *Abstract*

The electromagnetic interference, also called EMI, is present in electrical power systems, computer networks, telecommunication systems, electronic devices and so on. It's on all branches of electrical engineering. The electromagnetic interference is characterized by a decreasing performance of an electronic device due to an electromagnetic disturbance. As examples the sources of EMI may be cell phones, computers, atmospheric discharges, motors and power lines.

Electromagnetic disturbances can be diffused by conduction, radiation or coupling. They can be reduced using electrical groundings, filters and EMI shielding. This shielding blocks the EMI to get inside or outside a specific device, that means, it prevents an inside signal to leave and interfering an outside device and vice versa. It's required a deep understanding of how the electromagnetic wave behaves when penetrating a conductor material to study shielding. This understanding will let us obtain the equation to plot the shielding efficiency curve. This curve provides us important data related to the shielding, supplying useful information for its analysis.

The shielding of electronic devices reduces their emission and reception of electromagnetic disturbances, making them immune to any interference. This technique may be applied on the source or on the object to be shielded depending on the problem's necessity.

## *Sumário*

1	Introdução.....	12
1.1	Interferência Eletromagnética.....	13
1.1.1	Breve Histórico.....	13
1.1.2	Definições e Fenômeno Físico.....	13
1.2	Mecanismo de Propagação das Interferência Eletromagnéticas.....	13
1.2.1	EMI Conduzidas.....	15
1.2.2	Acoplamento Capacitivo.....	15
1.2.3	Acoplamento Indutivo.....	15
1.2.4	EMI Radiadas.....	19
1.3	Compatibilidade Eletromagnética.....	18
1.3.1	Definições e Conceitos.....	18
1.3.2	Normas de Compatibilidade Eletromagnética.....	19
1.4	Técnicas para Minimização das EMI.....	19
1.4.1	Aterramento.....	20
1.4.2	Blindagem.....	21
1.4.3	Filtros EMI.....	22
1.5	Objetivo Geral.....	23
2	Materiais e Métodos.....	24
2.1	Ondas Eletromagnéticas.....	24
2.1.2	Ondas Eletromagnéticas em Meios com Perdas.....	26
2.2	Blindagem de Equipamentos Eletrônicos.....	29
3	Resultados e Discussões.....	35
4	Conclusões.....	41
	Referências Bibliográficas.....	42

## *Lista de Figuras*

Figura 1 - Elementos básicos de um problema de EMC. ....	14
Figura 2 - EMI conduzida em modo diferencial.....	15
Figura 3 - EMI conduzida em modo comum.....	16
Figura 4 – Acoplamento Capacitivo.....	16
Figura 5 - Representação do acoplamento indutivo. ....	17
Figura 6 - Proteção contra efeitos do acoplamento capacitivo.....	20
Figura 7 - Proteção contra efeitos do acoplamento indutivo. ....	20
Figura 8 - Representação da blindagem. ....	21
Figura 9 - Topologias de filtros EMI.....	22
Figura 10 - Vetores campo elétrico e campo magnético da onda plana uniforme. ....	25
Figura 11 - Distribuição dos vetores campo elétrico e magnético no espaço.....	25
Figura 12 - Distribuição dos vetores campo elétrico e magnético em condutores.....	29
Figura 13 - Anteparo para construção da blindagem.....	30
Figura 14 - Curva de eficiência da blindagem (Ferro 0,5mm). ....	35
Figura 15 - Curva de eficiência da blindagem (Ferro 1mm). ....	36
Figura 16 - Curva de eficiência da blindagem (Ferro 3mm). ....	36
Figura 17 - Curva de eficiência da blindagem (Cobre 0,5mm). ....	37
Figura 18 - Curva de eficiência da blindagem (Cobre 1mm). ....	38
Figura 19 - Curva de eficiência da blindagem (Cobre 3mm). ....	38

# ***1 Introdução***

Desde os tempos remotos tem ocorridos transformações no perfil das cidades, tais como, o aumento do número de fábricas, de residências particulares, edifícios comerciais, iluminação pública, expansão do comércio, dentre outras. Juntamente com toda essa evolução, tem aumentado substancialmente a utilização de equipamentos e aparelhos de eletrônica de potência e digitais. Com tudo isso tem se tornado inevitável a existência de interferência eletromagnética.

A interferência eletromagnética está presente desde os tempos primordiais, podendo citar a radiação eletromagnética, existentes desde do início do universo. Atualmente, com os avanços tecnológicos, o ambiente em que vivemos esta se tornando cada vez mais perturbador. Isto se deve ao gigantesco crescimento da exposição dos dispositivos eletrônicos a outras fontes de radiação eletromagnética, e também a interferência que estes dispositivos provocam ao redor do mesmo, gerando assim um aumento das fontes de interferência eletromagnética. Essas fontes são criadas pelo próprio homem como, por exemplo, as linhas de transmissão de energia, celulares, computadores, antenas, sistemas de comunicação por radares, etc. Essas fontes são prenomiadas de fontes artificiais. Como fontes naturais podemos citar as descargas atmosféricas, vulcões em erupção, tempestades de areia. [1][2]

Com o aumento significativo da interferência eletromagnética, surge a compatibilidade eletromagnética para ditar as normas que tornam os aparelhos elétricos imunes à interferência e incapazes de gerar tal interferência, controlando desta forma os níveis de irradiação eletromagnética.

## **1.1 Interferência Eletromagnética (EMI)**

### **1.1.1 Breve Histórico**

Em 1901, o italiano Guglielmo Marconi, realizou a primeira transmissão de sinais a longas distâncias através de ondas eletromagnéticas, dando início a consideração dos efeitos relacionados com a compatibilidade eletromagnética. Vinte anos depois, surgiram os primeiros sistemas de radiodifusão comerciais, aparecendo assim os problemas relacionados com a interferência eletromagnética, onde se deu início aos primeiros estudos relacionados com as interferências de radiofrequência. [1]

Durante a Segunda Guerra Mundial começaram a aparecer os primeiros problemas de interferências eletromagnéticas em sistemas de navegação por radar, devido ao crescimento intenso da utilização de comunicação sem fios. Com o passar dos anos os problemas de compatibilidade eletromagnética tornaram-se ainda mais complexos, obrigando um estudo e análise mais detalhada deste fenômeno. [1]

Com o desenvolvimento da eletrônica, principalmente, a eletrônica digital, e o crescimento do uso dos equipamentos eletromecânicos e outros dispositivos, fez com que a compatibilidade eletromagnética estivesse presente em diversas áreas da engenharia. Os resultados conquistados ao longo destes anos mostraram uma evolução no controle da interferência eletromagnética, buscando cada vez mais o controle das radiações eletromagnéticas em equipamentos. [1]

### **1.1.2 Definições e Fenômeno Físico**

A interferência eletromagnética é caracterizada por uma degradação no desempenho de um equipamento devida à uma perturbação eletromagnética. As EMI podem ser de origem natural ou artificial. As EMI naturais são devido à força da natureza como, campo geomagnético, manchas solares, descargas atmosféricas. Já as EMI artificiais são devidas ao próprio homem como computadores, linhas de transmissão, telefones celulares, transmissão por radar, satélites e etc. As EMI são capazes de se propagarem tanto no vácuo quanto por meios materiais, sendo possível a verificação de suas consequências a quilômetros de distância, podendo ser insignificantes, mas quando significantes provam sérios danos. Como por exemplo, ruídos perturbadores em um rádio são pode ser algo insignificantes, porém interferências em processos de aterrissagem de aeronaves ou interferências em equipamentos médicos podem ser fatais. [1] [3]

Alguns itens básicos relacionados ao conceito, compreensão e entendimento da interferência eletromagnética [3]:

- **Meio Eletromagnético:** é a totalidade de fenômenos eletromagnéticos existentes em certo local.
- **Distúrbios Eletromagnéticos:** é qualquer fenômeno eletromagnético que possa degradar o desempenho de um equipamento, dispositivo ou sistema.
- **Imunidade Eletromagnética:** é a capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de operar sem degradação, na presença de uma perturbação eletromagnética.
- **Susceptibilidade Eletromagnética:** é a incapacidade de equipamentos, dispositivos ou sistemas desempenharem suas funções sem degradação na presença de um distúrbio eletromagnético, ou seja, é a falta de imunidade eletromagnética.

Para a ocorrência de interferência eletromagnética, três elementos devem estar presentes: Fonte de perturbação eletromagnética, caminho de acoplamento onde as perturbações são transmitidas, e o receptor. A interferência está caracterizada somente se a energia transferida da fonte ao receptor faz com que este se comporte de maneira indesejada. Para a minimização das perturbações deve-se atuar nos níveis de emissão da fonte, no caminho de acoplamento ou na proteção do receptor. A melhor solução é atuar na fonte, ainda que nem sempre é possível identificar a fonte perturbadora e as vezes não é possível eliminá-las, já que elas são sinais ativos do sistema. Neste caso deve-se atuar sobre o caminho de acoplamento ou tornar o receptor mais imune às perturbações. [4] [5]

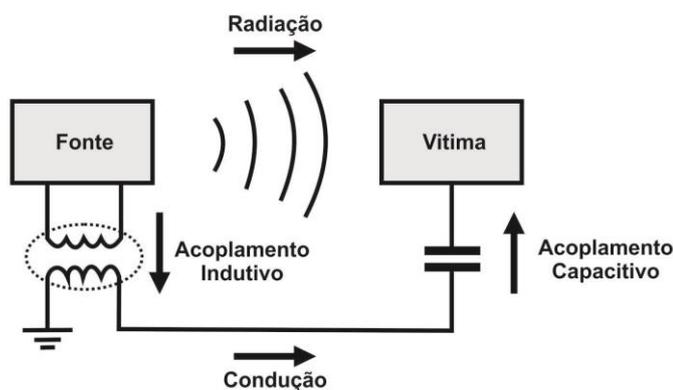


Figura 1 – Elementos de fundamentais das EMI

## 1.2 Mecanismo de Propagação das Interferências Eletromagnéticas

As interferências eletromagnéticas utilizam três meios de propagação, e é através desses meios que a perturbação chega ao receptor e prejudica o funcionamento ou a qualidade do sinal. Esses caminhos são classificados como, condução, acoplamento capacitivo ou indutivo, e radiados. As EMI conduzidas se propagam através de cabos ligados à fonte ao receptor, as EMI propagadas por acoplamento capacitivo se produzem por efeito de campos elétricos. Já as propagadas por acoplamento indutivo, se produzem por efeito de campo magnético. As EMI radiadas são devidas às gerações de ondas eletromagnéticas. [1][5]

### 1.2.1 EMI Conduzidas

As EMI conduzidas podem aparecer de duas formas, modo diferencial e em modo comum. No modo diferencial a corrente flui nos condutores em total oposição de fase, ou seja, as correntes circulam em direções opostas em todos os instantes. A Figura 2, mostra as EMI conduzidas em modo diferencial. As interferências em modo diferencial ocorrem devido à blagues de correntes que apresentam grandes  $\frac{di}{dt}$ , e ocorrem em frequências abaixo de 9kHz.

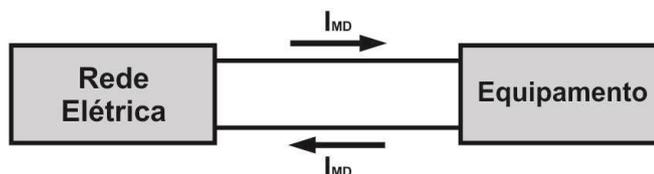


Figura 2 – EMI conduzida de modo diferencial

No modo comum, as correntes passam por todos os condutores na mesma direção, tendo como percurso de retorno o terra, conexões de interligação, blindagem dos cabos e etc. As EMI em modo comum se propagam principalmente por acoplamento capacitivo, pois, os pontos de interesse são aqueles que apresentam grandes  $\frac{dv}{dt}$  e ocorrem em altas frequências. A Figura 3 mostra as EMI conduzidas em modo comum. [5] [6] [7]

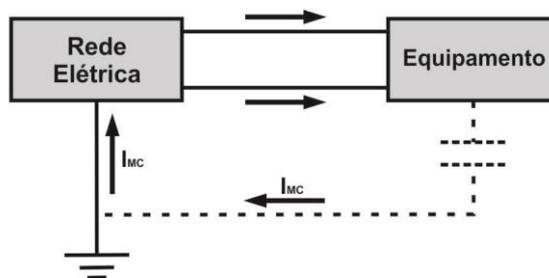


Figura 3 – EMI conduzida de modo comum

### 1.2.2 Acoplamento Capacitivo

O acoplamento capacitivo ocorre devido ao efeito de campo elétrico, este efeito ocorre quando o campo elétrico gerado por uma fonte de tensão entre dois condutores, atravessa outro condutor próximo ao primeiro induzindo no mesmo uma corrente parasita. Esta corrente parasita induz uma tensão parasita no condutor. A Figura 4 mostra o acoplamento capacitivo.

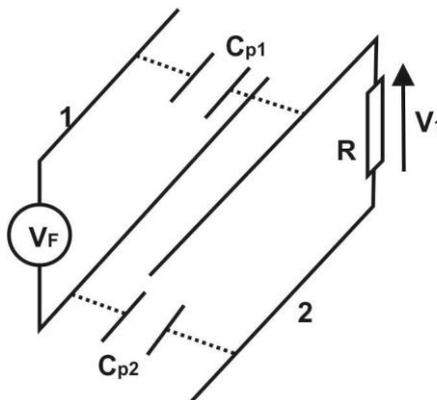


Figura 4 – Acoplamento Capacitivo

Quando é aplicada uma tensão  $V_F$  no circuito 1, é induzida uma corrente parasita no circuito 2, que se fechará através da resistência  $R$  e das capacitâncias parasitas entre os condutores 1 e 2 ( $C_{P1}$  e  $C_{P2}$ ). O valor da tensão induzida pode ser aproximado pela Equação 1.

$$V_T = RC_T \frac{dV_F}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_T} \cong \frac{1}{C_{P1}} + \frac{1}{C_{P2}} \quad (2)$$

Pode-se dizer, que ocorre um aumento na tensão induzida ( $V_T$ ), quando aumenta  $\frac{dV_F}{dt}$  ou quanto menor for a distância entre os condutores, isso ocorre devido a capacitância  $CT$ . [4][5]

### 1.2.3 Acoplamento Indutivo

O Acoplamento indutivo ocorre devido à geração do campo magnético. Quando circula corrente em um fio condutor é gerado um campo magnético em torno do mesmo e este campo produz uma f.e.m (força eletromotiz induzida), perturbadora nas espiras ou bucles próximos ao condutor vitima. A Figura 5 mostra o acoplamento indutivo. O principio teórico é baseado na Lei de Faraday, segundo a equação (3).

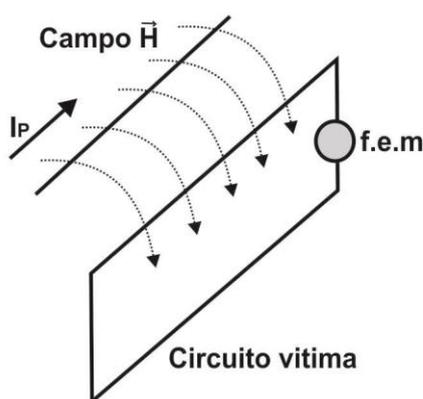


Figura 5 – Representação do acoplamento indutivo

Da Equação (3) a f.e.m induzida em um bucle é proporcional a variação do campo magnético em relação ao tempo.

$$E = f.e.m = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

A tensão induzida, ou seja, a f.e.m induzida será maior quanto maior for o valor da corrente  $I_P$ , a área do bucle vítima, a distância entre o cabo perturbador e o bucle, a frequência da corrente geradora ( $I_P$ ) do campo magnético.

As formas de redução do acoplamento indutivo pode-se citar:

- Redução da área do bucle vítima.

- O cabo que circula a corrente perturbadora e o cabo de retorno desta corrente, devem ficar o mais próximos possível, pois os campos magnéticos gerados são anulados.
- Deixar o cabo perturbador perpendicular ao bucle vítima, pois assim não existirá fluxo magnético atravessando a vítima, portanto não se produzirá f.e.m perturbadora. [4] [5] [8]

#### **1.2.4 EMI Radiadas**

As EMI radiadas ocorrem devido à geração de ondas eletromagnéticas. Os acoplamentos capacitivos e indutivos ocorrem devido aos campos próximos à vítima, já as EMI radiadas ocorrem devido aos campos que são gerados longe da vítima. As ondas eletromagnéticas se propagam devido aos campos elétricos e magnéticos que provocam induções mutuas sucessivas, um em relação ao outro de acordo com as equações de Maxwell, portanto para eliminar as EMI radiadas deve-se eliminar os dois campos. Estas perturbações são as mais prováveis de acontecer e as mais difíceis de serem eliminadas. [4] [5] [8]

### **1.3 Compatibilidade Eletromagnética (EMC)**

Como já citado anteriormente os problemas de interferência eletromagnética cresceu bastante em 1901, quando o italiano Guglielmo Marconi, realizou a primeira transmissão de sinais. A partir daí, após algumas décadas ocorreram grandes avanços na eletrônica e os problemas começaram a surgir. Houve então a necessidade de realizar estudos mais profundos a cerca destas perturbações, surgindo o tema compatibilidade eletromagnética. Atualmente, o nível de controle das EMI esta em um patamar considerável e os resultados conquistados devem-se aos grandes esforços entre fabricantes, consumidores, organismos de normatização e fiscalização e etc. Juntos, todos tem procurado um melhor controle das EMI. Nos Estados Unidos e Europa, principalmente, existem normas rígidas, para regulação deste fenômeno. [1]

#### **1.3.1 Definições e Conceitos**

A compatibilidade eletromagnética é definida como a capacidade de um dispositivo ou sistema funcionar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético, sem que o mesmo não induza ou provoque perturbações eletromagnéticas. Portanto, o dispositivo deve ser compatível com seu ambiente eletromagnético. Os dois termos EMI e EMC estão

intimamente relacionados, não podendo abordá-los separadamente. Existem alguns conceitos que alguns equipamentos deve seguir para poder ser dito compatível eletromagneticamente, Conforme listados a seguir:

- Não causa interferência em outros equipamentos;
- É imune às emissões de outros equipamentos;
- Não causa interferência em si próprio. [1][9]

### **1.3.2 Normas de Compatibilidade Eletromagnética**

A criação de normas de EMC impõe requisitos adicionais para os sistemas eletrônicos, além daqueles necessários para que o sistema seja funcional, tendo como objetivo a necessidade de que o sistema tenha compatibilidade com seu ambiente eletromagnético. Existem basicamente duas classes de normas de EMC que são impostas a sistemas eletrônicos, as impostas pelas agências governamentais e as ditadas pelo fabricante do equipamento.

As normas impostas pelo governo são legais e não podem ser desprezadas, elas são ditadas para controlar a susceptibilidade do equipamento e a interferência produzida por ele. Porém se um equipamento estiver em conformidade com as normas governamentais, não há garantia que o mesmo não possa causar ou receber perturbações. [1] [2] [9] [10]

## **1.4 Técnicas Para Minimização das EMI**

Um equipamento em um meio eletromagnético pode se comportar como fonte ou vítima, ou seja, emite ou recebe interferência eletromagnética. Para a redução das EMI deve-se atuar na fonte, no caminho de acoplamento ou na vítima. Logo é importante utilizar técnicas para minimização das EMI. Muitas vezes é necessário utilizar duas ou mais técnicas para obter uma boa redução das EMI. Dentre essas técnicas podemos citar o aterramento, blindagem e a utilização de filtros. A aplicação de cada uma dessas técnicas depende do meio de propagação das perturbações, logo é muito importante conhecer o mecanismo de propagação das EMI para obter uma boa eficiência na redução das interferências.

### 1.4.1 Aterramento

O aterramento é a ligação intencional de um equipamento ou um sistema à terra proporcionando um caminho seguro e de baixa resistência, que é um percurso para a corrente retornar da carga para a fonte. Os sistemas de aterramento devem exercer diversas funções simultâneas, como proporcionar segurança pessoal e para o equipamento. Dentre várias funções do aterramento, podemos citar a função de minimizar os efeitos das EMI. Aterramentos precisos, junto com o uso de blindagem, podem reduzir grande parte dos ruídos e dos problemas de EMI. Anteriormente foi discutido sobre o acoplamento capacitivo e indutivo, agora vamos abordar como é possível reduzir seus efeitos com o uso do aterramento. [11] [12] [13]

Para a redução dos efeitos do acoplamento capacitivo utiliza-se a blindagem juntamente com o aterramento. O equipamento ou condutor deve ser envolvido com material metálico e é importante que aterre esta blindagem para que a capacitância parasita, entre o condutor e a blindagem, não atue como elemento de realimentação. A Figura 6 mostra a blindagem e o aterramento atuando na redução de interferências por acoplamento capacitivo. Pode-se notar que a corrente de interferência é drenada ao terra, sem afetar os níveis de sinais.

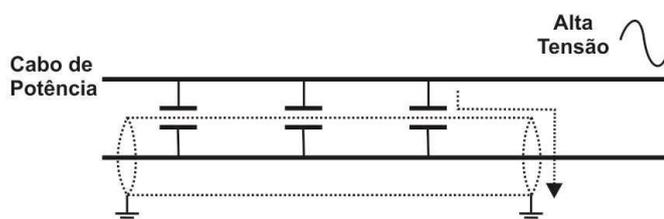


Figura 6 – Proteção contra efeitos do acoplamento capacitivo.

Para a redução das interferências provocadas pelo acoplamento indutivo pode-se utilizar cabos trançados, conforme mostra a Figura 7.

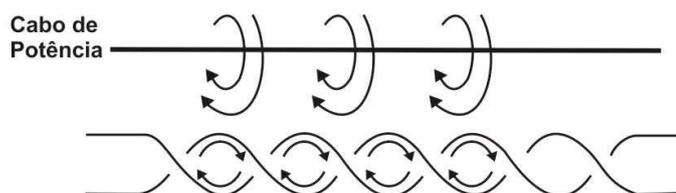


Figura 7 - Proteção contra efeitos do acoplamento indutivo.

Com o cabo traçado, as correntes induzidas tendem a ser canceladas nos loops adjacentes. Porém o uso de cabos de pares trançados tem baixa eficiência para baixas frequências em circuitos desbalanceados. Quando usados em circuitos de alta frequência com multipontos aterrados, possui alta eficiência, pois a corrente de retorno tende a fluir pelo retorno adjacente. [12] [13]

### 1.4.2 Blindagem

A blindagem é uma barreira metálica colocada entre duas regiões do espaço, utilizada no controle da propagação de campos elétricos e/ou magnéticos de uma região para outras. A blindagem tem como objetivo atenuar e/ou bloquear a emissão ou captação de sinais eletromagnéticos, a Figura 8 apresenta uma blindagem. Pode-se dizer que a blindagem é usada para:

- Manter emissões dentro da área blindada.
- Manter sinais interferentes fora da área blindada.

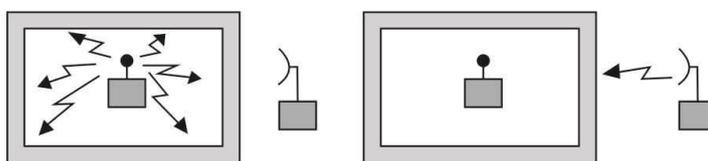


Figura 8 – Representação da blindagem.

A blindagem reduz a intensidade do sinal interferente de duas formas, por reflexão e absorção. A reflexão ocorre devido à diferença da impedância característica do campo incidente e da impedância da blindagem. Na absorção a onda incidente é atenuada, de forma que a intensidade do campo é reduzida sobre o dispositivo blindado. A blindagem é ideal para redução de EMI radiadas pelo fato de refletir e/ou absorver as ondas eletromagnéticas. [14] [15]

### 1.4.3 Filtros EMI

Após a utilização de várias técnicas para reduzir a emissão de ruídos nas fontes, ainda é necessário bloquear ou reduzir o que resta de ruído por filtragem. Os filtros são utilizados para atenuar sinais de frequências indesejáveis. Os filtros operam criando uma descontinuidade na impedância “vista” por um sinal viajando em um condutor, assim quanto maior for a descontinuidade maior será a atenuação. Na verdade um filtro emite um sinal oposto de modo a cancelar o sinal perturbador. A Figura 9 mostra as diferentes topologias de filtros EMI.

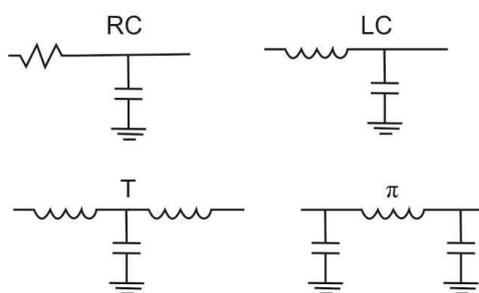


Figura 9 – Topologias de filtros EMI.

Os filtros do tipo R ou L criam uma impedância série elevada e são utilizados onde a impedância dos sinais indesejados for baixa. Já os tipos C criam uma baixa impedância em derivação e são utilizados quando a impedância do ruído é alta. Os filtros RC são bastante previsíveis, pois eles não entram em ressonância com muita frequência, assim são de preferência valores elevados de resistência e baixos valores de capacitância. Os filtros LC, T e  $\pi$ , oferecem maiores níveis de atenuação com menores perdas do que filtros que utilizam resistores, porém esses filtros são mais ressonantes e mais sensíveis a impedância nas quais estão conectados. Os filtros T, que, usam resistores (RCR), utilizam os resistores para casar a impedância das linhas de transmissão de cada lado do capacitor a fim de manter a integridade do sinal.

Para utilizar um filtro é necessário ter bastante cuidado, pois, o uso incorreto pode fazer com que emissões ou a imunidade de um circuito sejam piores do que o funcionamento sem a utilização do filtro. Logo, não é apenas observar os dados e aplicações do filtro no catálogo de fabricação e esperar que o filtro forneça o desempenho desejado, é necessário conhecer o problema a fundo antes de escolher a topologia do filtro. [2]

## **1.5 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo geral sobre as interferências eletromagnéticas, estudando assim, seus conceitos, as fontes de perturbações, o caminho de propagação, a vítima e, principalmente, os métodos para redução das EMI.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivo específico:

- Estudo teórico dos conceitos da interferência eletromagnética e compatibilidade eletromagnética;
- Estudo geral dos métodos para redução das EMI;
- Estudo da blindagem em equipamentos eletrônicos;
- Simulação da curva de eficiência de uma blindagem.

## **2    *Materiais e Métodos***

Na seção 1.4, foram abordadas as técnicas para redução das EMI, técnicas tais como: aterramento, blindagem e filtros EMI. Este trabalho, foi dada ênfase na técnica da blindagem. Como já visto, a blindagem consiste em uma caixa de material condutor, utilizada para evitar que perturbações eletromagnéticas externas possam ser transmitidas para dentro da caixa e perturbações internas possam ser transmitidas para fora da caixa. As perturbações são na verdade ondas eletromagnéticas, que quando incidem em equipamentos eletrônicos, provocam o mau funcionamento dos mesmos. Assim, antes de prosseguir com o estudo das blindagens, é feita uma definição geral sobre as ondas eletromagnéticas e sua propagação.

### **2.1    *Ondas Eletromagnéticas***

Considerando que, em algum lugar do espaço, exista uma fonte de campo elétrico variante no tempo, assim pela Lei de Ampère um campo magnético é induzido na região ao redor da fonte. E como o campo magnético varia no tempo também, pela Lei de Faraday, um campo elétrico também é gerado. Assim existe energia trocada entre estes campos ( $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ ) a medida que eles se irradiam afastando da fonte. As ondas são irradiadas de forma esféricas, mas em pontos distantes da fonte essas ondas tem a forma de ondas planas uniformes. O termo *plana* é devido os vetores campo elétrico e campo magnéticos estarem situados em planos perpendiculares a direção de propagação da onda e perpendiculares entre si. Já o termo *uniforme* refere-se ao fato dos campos elétrico e magnéticos serem constante em magnitude e fase sobre os planos. O vetor campo elétrico, o vetor campo magnético e a direção de propagação da onda, serão sempre perpendiculares entre si, como mostra a Figura 10.

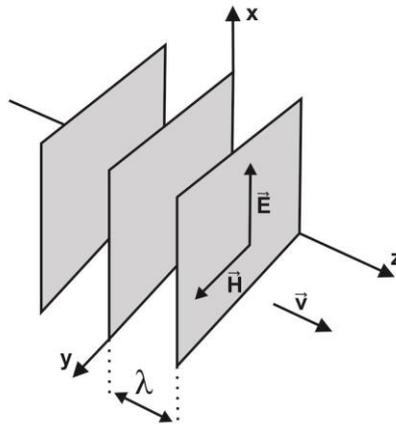


Figura 10 – Vetores campo elétrico e campo magnético da onda plana uniforme.

Quando uma onda eletromagnética se propaga em um meio sem perdas as funções do campo elétrico e campo magnético são dadas pelas Equações 4 e 5.

$$E_x = E_m^+ \cos(\omega t - \beta z) \quad (4)$$

$$H_y = H_m^+ \cos(\omega t - \beta z) \quad (5)$$

A Figura 11 ilustra uma onda eletromagnética propagando em um meio sem perdas.

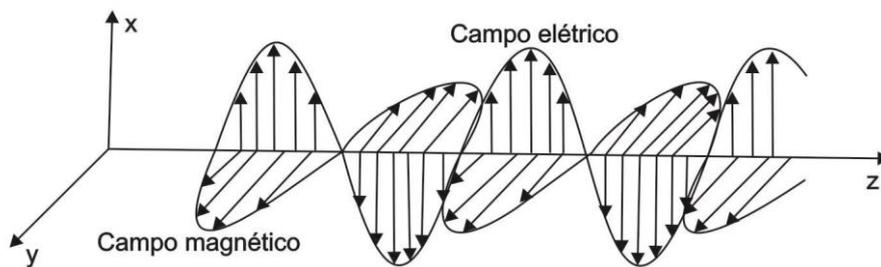


Figura 11 – Distribuição dos vetores campo elétrico e magnético no espaço.

### 2.1.1 Ondas Eletromagnéticas em meios com perdas

O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em meios com perdas é essencial para este trabalho, principalmente a propagação em condutores, que é de extrema importância para o projeto da blindagem de um equipamento eletrônico.

Iniciaremos considerando uma onda eletromagnética incidindo em um meio com perdas, considerando a propagação da onda como mostra a Figura 10. Assim aplicando as Equações de Maxwell, inicialmente a Lei de Faraday, temos que:

$\nabla \times \hat{E} = -j\omega\mu\hat{H}$ , onde  $\mu$  é a permissividade magnética do meio, assim o rotacional fica expresso como:

$$\nabla \times \hat{E} = \left( \frac{\partial \hat{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \hat{E}_y}{\partial z} \right) \hat{i} + \left( \frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \hat{E}_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \left( \frac{\partial \hat{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \hat{E}_x}{\partial y} \right) \hat{k}$$

Como o campo elétrico possui apenas componentes em x e varia com a coordenada z, o único termo que não anula no rotacional é  $\frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z}$ , portanto:

$$\nabla \times \hat{E} = \frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} \hat{j}, \text{ assim da Lei Faraday}$$

$$\frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} \hat{j} = -j\omega\mu\hat{H}_y \hat{j}, \text{ portanto:}$$

$$\frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} = -j\omega\mu\hat{H}_y \quad (6)$$

Agora utilizando a Lei de Ampère,  $\nabla \times \hat{H} = \hat{j} + j\omega\varepsilon\hat{E}$ , onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do meio. Da Lei de Ohm temos que a densidade de corrente depende do campo elétrico, assim  $\hat{j} = \sigma\hat{E}$  então,  $\sigma$  é a condutividade elétrica do meio, a Lei de Ampère torna-se:

$$\nabla \times \hat{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{E} \quad (7)$$

Como o campo magnético possui apenas componente y e varia com a coordenada z, o rotacional de  $\hat{H}$  fica:

$$\nabla \times \hat{H} = -\frac{\partial \hat{H}_y}{\partial z} \hat{i}, \text{ substituído em (7) obtém-se, } -\frac{\partial \hat{H}_y}{\partial z} \hat{i} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{E}_x \hat{i}, \text{ o que resulta em (8).}$$

$$\frac{\partial \hat{H}_y}{\partial z} = -(\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{E}_x \quad (8)$$

Derivando (6) em relação a z e substituindo em (8), e considerando derivadas totais ao invés de derivadas parciais, obtém-se.

$$\frac{d^2 \hat{E}_x}{dz^2} = (j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{E}_x \quad (9)$$

Agora derivando (8) em relação  $z$  e substituído em (6), e mais uma vez considerando as derivadas parciais como derivadas totais, tem-se.

$$\frac{d^2 \hat{H}_y}{dz^2} = (j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{H}_y \quad (10)$$

O próximo passo é determinar a solução de (9) e (10), essas equações podem ser facilmente resolvidas através da equação característica da equação diferencial ordinária, assim fazendo  $\hat{\gamma}^2 = (j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)$ ,  $\hat{\gamma}$  é dita constante de propagação. Então as Equações (9) e (10) ficam:

$$\frac{d^2 \hat{E}_x}{dz^2} = \hat{\gamma}^2 \hat{E}_x \quad (11)$$

e

$$\frac{d^2 \hat{H}_y}{dz^2} = \hat{\gamma}^2 \hat{H}_y \quad (12)$$

A solução de (11) e (12) são dadas por:

$$\hat{E}_x = \hat{E}_m^+ e^{-\hat{\gamma}z} + \hat{E}_m^- e^{\hat{\gamma}z} \quad (13)$$

e

$$\hat{H}_y = \hat{H}_m^+ e^{-\hat{\gamma}z} + \hat{H}_m^- e^{\hat{\gamma}z} \quad (14)$$

Chamamos as constantes da solução de  $\hat{E}_m^+$ ,  $\hat{E}_m^-$ ,  $\hat{H}_m^+$  e  $\hat{H}_m^-$  pois são as constantes que acompanha as ondas progressivas e retrógradas e essas constantes podem ser números complexos.

Como  $\hat{\gamma}$  é um numero complexo podemos escrevê-lo como  $\hat{\gamma} = \alpha + j\beta$ ,  $\alpha$  é dita constante de atenuação e  $\beta$  constante de fase, então as Equações (13) e (14) tornam-se:

$$\hat{E}_x = \hat{E}_m^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + \hat{E}_m^- e^{\alpha z} e^{j\beta z} \quad (15)$$

e

$$\hat{H}_y = \hat{H}_m^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + \hat{H}_m^- e^{\alpha z} e^{j\beta z} \quad (16)$$

Podemos achar uma relação entre H e E, derivando (15) em relação a  $z$  e substituído (6), dai substitui também em (16) obtemos as equações abaixo:

$$(\alpha + j\beta)\hat{E}_m^+ = j\omega\mu\hat{H}_m^+ \quad (17)$$

$$(\alpha + j\beta)\hat{E}_m^- = j\omega\mu\hat{H}_m^- \quad (18)$$

Sabendo que  $\hat{\gamma} = (\alpha + j\beta) = \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)}$  e substituído em (17) e (18), chega-se em:

$$\hat{H}_m^+ = \frac{\hat{E}_m^+}{\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}} \quad (19)$$

e

$$\hat{H}_m^- = -\frac{\hat{E}_m^-}{\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}} \quad (20)$$

O termo  $\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$  é conhecido como impedância intrínseca do meio, e chamaremos de  $\hat{\eta}$  assim as Equações (19) e (20) tornam-se:

$$\hat{H}_m^+ = \frac{\hat{E}_m^+}{\hat{\eta}} \quad (21)$$

e

$$\hat{H}_m^- = -\frac{\hat{E}_m^-}{\hat{\eta}} \quad (22)$$

Portanto,

$$\hat{E}_x = \hat{E}_m^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + \hat{E}_m^- e^{\alpha z} e^{j\beta z} \quad (15)$$

$$\hat{H}_y = \frac{\hat{E}_m^+}{\hat{\eta}} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} - \frac{\hat{E}_m^-}{\hat{\eta}} e^{\alpha z} e^{j\beta z} \quad (23)$$

Em meios sem perdas os termos  $e^{-\alpha z}$  e  $e^{\alpha z}$  não aparecem na solução, porém, quando o meio possui condutividade ( $\sigma \neq 0$ ), os termos  $e^{-\alpha z}$  e  $e^{\alpha z}$  fazem com que as amplitudes das ondas progressivas e retrógradas decaiam a medida que elas propagam através do meio, esse termo é conhecido como atenuação da onda. Para determinar a solução geral  $E_x(z, t)$  e  $H_y(z, t)$ , basta multiplicar as Equações (15) e (23) por  $e^{j\omega t}$  e pegar a parte real das equações.

$$E_x(z, t) = \text{Re}(\hat{E}_m^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + \hat{E}_m^- e^{\alpha z} e^{j\beta z}) e^{j\omega t}$$

$$E_x(z, t) = \text{Re}(\hat{E}_m^+ e^{-\alpha z} e^{j(-\beta z + \omega t)} + \hat{E}_m^- e^{\alpha z} e^{j(\beta z + \omega t)})$$

$$E_x(z, t) = E_m^+ e^{-\alpha z} \cos(-\beta z + \omega t) + E_m^- e^{\alpha z} \cos(\beta z + \omega t) \quad (24)$$

De forma análoga pode ser feito para  $H_y(z, t)$ , porém deve-se considerar que  $\hat{\eta} = \eta e^{j\theta}$ , logo:

$$H_y(z, t) = \text{Re}\left(\frac{\hat{E}_m^+}{\eta} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} e^{-j\theta} - \frac{\hat{E}_m^-}{\eta} e^{\alpha z} e^{j\beta z} e^{-j\theta}\right) e^{j\omega t}$$

$$H_y(z, t) = \frac{E_m^+}{\eta} e^{-\alpha z} \cos(-\beta z + \omega t - \theta) - \frac{E_m^-}{\eta} e^{\alpha z} \cos(\beta z + \omega t - \theta) \quad (25)$$

A Figura 12 representa a onda eletromagnética propagando num meio com perdas.

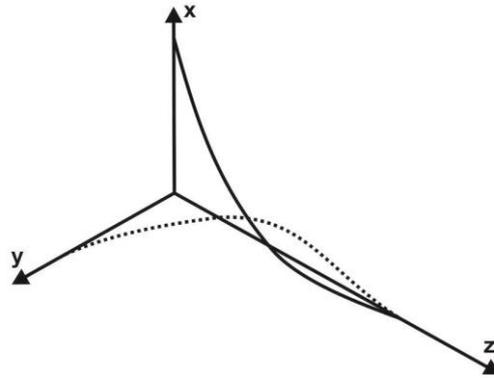


Figura 12 – Distribuição dos vetores campo elétrico e magnético em condutores.

Das Equações (24) e (25), pode-se notar que os campos elétricos e magnéticos são muito similares àqueles em um meio sem perdas (Equações 4 e 5), a solução contém duas ondas propagantes: uma progressiva e a outra retrógrada. No entanto, as duas principais distinções são que as amplitudes decaem à medida que as ondas se propagam através de um meio com perdas devido a presença do termo  $e^{\pm\alpha z}$ , e o campo magnético retarda o campo elétrico pelo ângulo de fase da impedância intrínseca,  $\theta$ .

## 2.2 Blindagem de Equipamentos Eletrônicos

Um equipamento eletrônico, em um meio eletromagnético, pode emitir ou receber perturbações eletromagnéticas, que comprometem o seu funcionamento. O uso de gabinetes blindados previne que um sinal fora do gabinete interfira no equipamento eletrônico dentro do mesmo ou que uma perturbação dentro do gabinete interfira no equipamento fora dele. A construção da blindagem é feita através da utilização de materiais condutores com espessura desejada. Quando uma onda eletromagnética incide em um meio com perdas o campo elétrico e magnético são atenuados, esse meio pode ser um dielétrico ou um condutor. O objetivo deste trabalho é analisar o caso do meio como sendo o condutor. Neste próximo passo é feita a análise de como podemos reduzir as perturbações eletromagnéticas através do uso da

blindagem. A Figura 13 representa a parede de um gabinete, esta possui espessura  $d$ , na figura esta representado também os campos incidente, refletidos e transmitidos na barreira condutora.

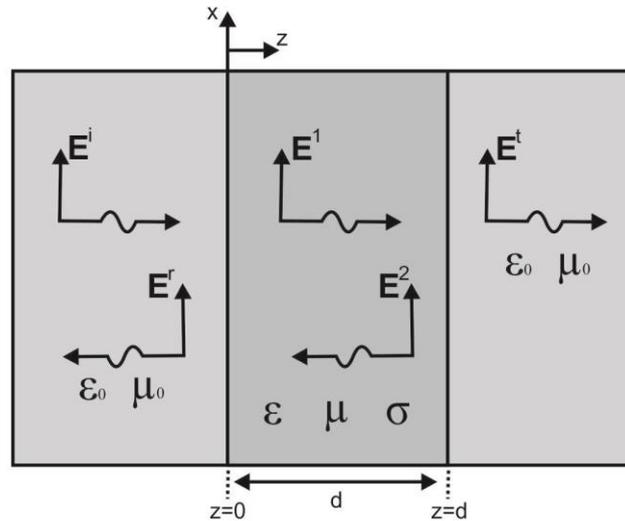


Figura 13 – Anteparo para construção da blindagem.

Considerando que uma fonte de EMI estar distante, pode-se dizer que as ondas são planas uniformes, logo os campos incidentes são dados por:

$$\hat{E}_x^i = E_m^i e^{-j\beta_0 z} \quad (26)$$

e

$$\hat{H}_y^i = \frac{E_m^i}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (27)$$

Onde,

$$\beta_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (28)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi \Omega \cong 377\Omega \quad (29)$$

Os campos refletidos na superfície do anteparo condutor são dados por:

$$\hat{E}_x^r = \hat{E}_m^r e^{j\beta_0 z} \quad (30)$$

e

$$\hat{H}_y^r = \frac{\hat{E}_m^r}{\eta_0} e^{j\beta_0 z} \quad (31)$$

Os campos transmitidos, que deixam o anteparo condutor são dados por:

$$\hat{E}_x^t = \hat{E}_m^t e^{-j\beta_0 z} \quad (32)$$

$$\hat{H}_y^t = \frac{\hat{E}_m^t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (33)$$

As constantes indeterminadas  $\hat{E}_m^r$  e  $\hat{E}_m^t$  são complexas, isso devido ao fato do anteparo ser construído de material condutor. Quando a onda penetra a barreira de metal existem perdas, essas perdas são representadas na Figura 13 por:

$$\begin{aligned} \hat{E}_x^1 &= \hat{E}_m^1 e^{-\hat{\gamma}z} & \text{e} & & \hat{E}_x^2 &= \hat{E}_m^2 e^{\hat{\gamma}z} \\ \hat{H}_y^1 &= \frac{\hat{E}_m^1}{\hat{\eta}} e^{-\hat{\gamma}z} & \text{e} & & \hat{H}_x^2 &= \frac{\hat{E}_m^2}{\hat{\eta}} e^{-\hat{\gamma}z} \end{aligned}$$

Onde  $\hat{\gamma} = (\alpha + j\beta) = \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)}$ , como demonstrando na seção 1.21.

Um termo importante que deve-se levar em conta quando uma onda eletromagnética propaga em um meio com perdas, é a profundidade pelicular. A profundidade pelicular é a distância que a onda deve propagar para ter sua amplitude reduzida por um fator igual a  $\frac{1}{e}$  ou aproximadamente 37%. Foi mostrado que o campo elétrico pode ser expresso por (24), utilizando somente a parte progressiva e fazendo  $\alpha z=1$ , obtém-se que a profundidade pelicular é dada por:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (34)$$

Quando um meio é um bom condutor, tem-se que  $\sigma \gg \omega\varepsilon$ , logo podemos fazer uma aproximação na constante de atenuação.

$$\hat{\gamma} = \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)} \cong \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

Assim em bons condutores  $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ , então a profundidade pelicular é dada por:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}}, \text{ como } \omega=2\pi f \text{ temos que:}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (35)$$

Podemos fazer também uma aproximação para a impedância intrínseca do meio, sendo este um bom condutor, assim:

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (36)$$

Neste trabalho procurou-se levantar a curva de eficiência de uma blindagem, assim foi necessário chegar à equação que permita levantar esta curva. Quando uma onda incide sobre uma barreira, parte da energia é refletida e parte é transmitida, gerando perdas por reflexão, absorção e, também, por múltiplas reflexões que ocorrem entre o meio e a barreira da blindagem. A eficiência da blindagem é dada por:

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| \quad (37)$$

A eficiência da blindagem é definida como a razão entre o campo elétrico (ou magnético) incidente na barreira e a magnitude do campo elétrico (ou magnético) transmitido na barreira.

Da Figura 13, aplicando as condições de fronteira em  $z=0$ , obtém-se:

$$E_m^i + \hat{E}_m^r = \hat{E}_m^1 + \hat{E}_m^2 \quad (38)$$

$$\frac{E_m^i}{\eta_0} - \frac{\hat{E}_m^r}{\eta_0} = \frac{\hat{E}_m^1}{\hat{\eta}} - \frac{\hat{E}_m^2}{\hat{\eta}} \quad (39)$$

Agora aplicando as condições de fronteira em  $z=d$ , temos:

$$\hat{E}_m^1 e^{-j\beta d} + \hat{E}_m^2 e^{j\beta d} = \hat{E}_m^t e^{-j\beta_0 d} \quad (40)$$

$$\frac{\hat{E}_m^1}{\hat{\eta}} e^{-j\beta d} + \frac{\hat{E}_m^2}{\hat{\eta}} e^{j\beta d} = \frac{\hat{E}_m^t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 d} \quad (41)$$

Eliminando  $\hat{E}_m^1$  e  $\hat{E}_m^2$  nas equações acima, obtém-se:

$$E_m^i + \left( \frac{\eta_0 - \hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \right) \hat{E}_m^r = \hat{E}_m^t e^{-j\beta_0 d} e^{j\beta d} \quad (42)$$

$$E_m^i + \left( \frac{\eta_0 + \hat{\eta}}{\eta_0 - \hat{\eta}} \right) \hat{E}_m^r = \hat{E}_m^t e^{-j\beta_0 d} e^{-j\beta d} \quad (43)$$

Eliminando  $\hat{E}_m^r$  em (42) e substituído na Equação 43, obtém-se a relação entre o campo incidente e o campo transmitido, assim:

$$\frac{E_m^i}{E_m^t} = \frac{(\eta_0 + \hat{\eta})^2}{4\eta_0 \hat{\eta}} \left[ 1 - \left( \frac{\eta_0 - \hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \right) e^{-2\frac{d}{\delta}} e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right] e^{j\frac{d}{\delta}} e^{\frac{d}{\delta}} e^{-j\beta_0 d} \quad (44)$$

Aplicando o modulo em (44),

$$\left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| = \left| \frac{(\eta_0 + \hat{\eta})^2}{4\eta_0 \hat{\eta}} \right| \left| 1 - \left( \frac{\eta_0 - \hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \right) e^{-2\frac{d}{\delta}} e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (45)$$

Podemos simplificar (45), levando em conta que a impedância intrínseca do anteparo é muito menor que a impedância intrínseca do vácuo, ou seja,  $\eta \ll \eta_0$ , logo:

$$\left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| \cong \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| \left| 1 - e^{-2\frac{d}{\delta}} e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (46)$$

Simplificando mais ainda, podemos levar em conta que a espessura do anteparo é maior do que a profundidade pelicular, ou seja,  $d \gg \delta$ , assim resultando que:

$$\left| \frac{E_m^i}{E_m^t} \right| \cong \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| e^{\frac{d}{\delta}} \quad (47)$$

Sendo  $\eta \ll \eta_0$  e  $d \gg \delta$

Logo de (38), chega-se que:

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| e^{\frac{d}{\delta}}$$

$$EB_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| + 20 \log_{10} e^{\frac{d}{\delta}} \quad (48)$$

O termo  $R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right|$  é devido à reflexão no anteparo e o já o termo

$A_{dB} = 20 \log_{10} e^{\frac{d}{\delta}}$  é devido a absorção da superfície condutora.

Nota-se que somente o termo de absorção depende da espessura da parede da blindagem, enquanto que o termo de reflexão depende somente das propriedades elétricas e magnéticas do material em que é composta a blindagem.

Obtida a equação da eficiência da blindagem (48), agora será levantada sua curva de eficiência através de simulação computacional, que permitirá realizar os cálculos e a plotagem da curva. A curva será levantada para dois tipos de materiais condutores e para diferentes espessuras do anteparo a fim de comparar qual material tem melhor eficiência para construção de blindagens. A Tabela 1 mostra os materiais condutores e suas propriedades elétricas.

Tabela 1 – Permeabilidade relativas e condutividade (relativa ao cobre  $\sigma=5,8 \times 10^7$ ).

<b>Materiais</b>	<b><math>\sigma_r</math></b>	<b><math>\mu_r</math></b>
Cobre	1	1
Ferro	0,17	1000

Para a simulação foram escolhidos o cobre e o ferro, pois, o cobre possui uma boa condutividade comparada ao ferro, enquanto que o ferro possui uma maior permeabilidade magnética comparada ao cobre, assim espera-se notar uma diferença significativa na curva de eficiência da blindagem para os dois materiais.

### 3 Resultados e Discussões

Como visto na seção 2, a blindagem possui três tipos de atenuação, a atenuação por reflexão, absorção e múltiplas reflexões. Neste trabalho a atenuação por múltiplas reflexões foram desprezadas, pois para detecção desse efeito é necessário grande área de interface e proteção. Os materiais para análise da curva da eficiência da blindagem estão indicados na Tabela 1. A curva de eficiência foi levantada a partir da equação (48). O primeiro material a ser analisado será o ferro, com as respectivas espessuras das paredes 0,5mm, 1mm e 3mm. O gráfico da Figura 14 mostra a curva de eficiência da blindagem para espessura da parede de 0,5mm.

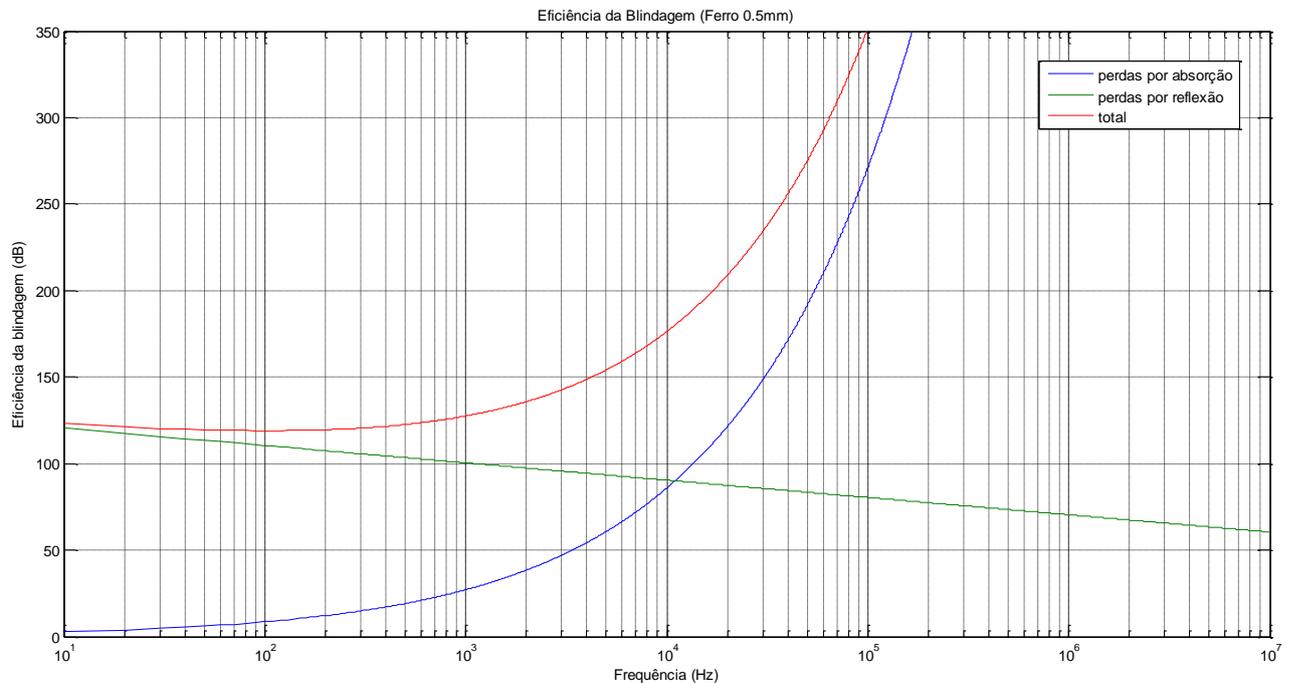


Figura 14 – Curva de eficiência da blindagem (Ferro 0,5mm).

Pode-se notar que para frequências abaixo de 11kHz a atenuação por reflexão é dominante, enquanto que para frequências maiores a atenuação por absorção que domina. Nota-se através da curva total, que a atenuação é praticamente constante até a frequência de 1kHz, e após essa frequência a atenuação aumenta significativamente. Agora, analisaremos para uma espessura de 1mm.

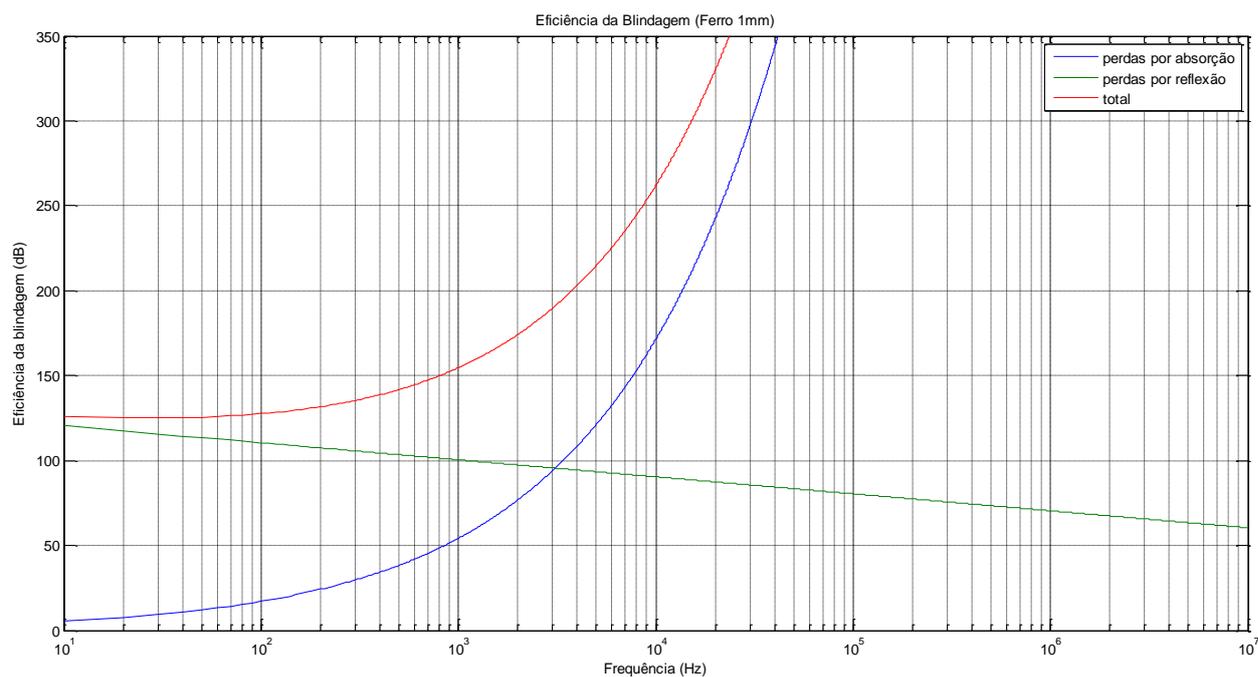


Figura 15 – Curva de eficiência da blindagem (Ferro 1mm).

Com o aumento da espessura das paredes, a atenuação por absorção torna-se cada vez maior. Sendo que as perturbações eletromagnéticas são atenuadas por absorção a partir da frequência de 0,8kHz. Como mostra a Figura 15.

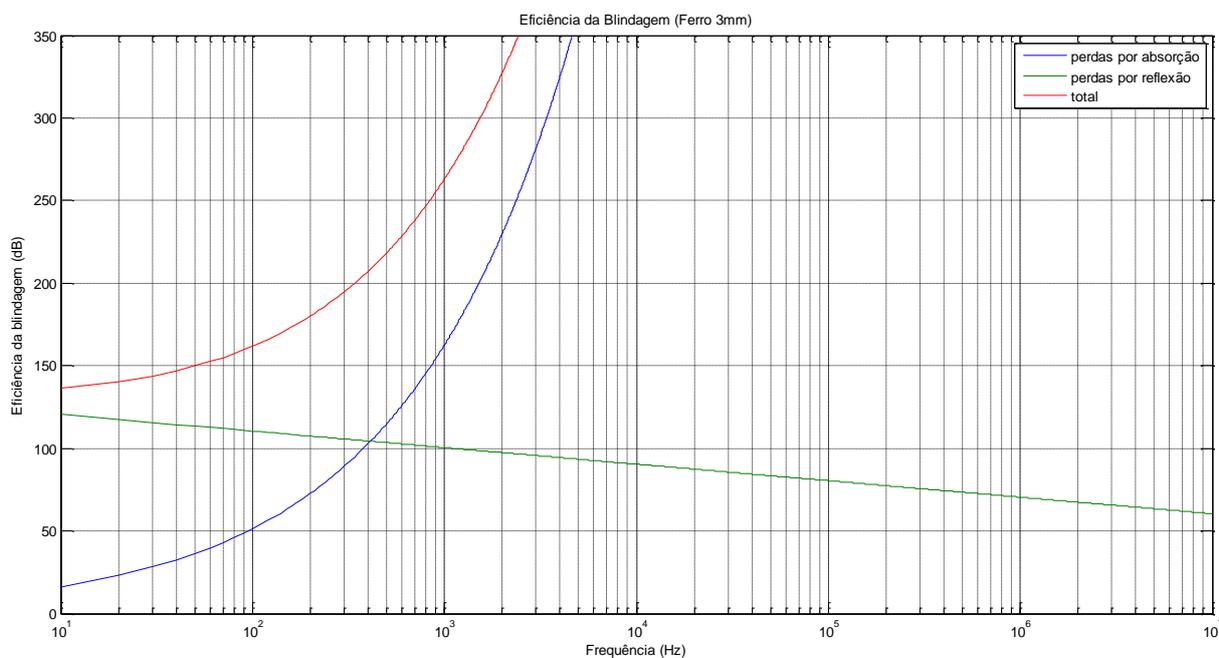


Figura 16 – Curva de eficiência da blindagem (Ferro 3mm)

Com a espessura de 3 mm a atenuação por absorção é alta, como mostra a Figura 16, e a atenuação por reflexão permanece a mesma das Figuras 14 e 15. Nota-se que ocorre um deslocamento para esquerda na curva de perdas por absorção, isso ocorre porque o ferro possui uma boa permeabilidade magnética e também as perdas por absorção dependem das propriedades geométricas da blindagem, nesse caso, a espessura da parede. O ferro é um bom material para utilizar em blindagem, quando se deseja reduzir perturbações com alta frequência, assim a atenuação ocorre a medida que as ondas atravessam o anteparo, sendo necessário anteparos com espessuras maiores que a profundidade pelicular, para garantir uma boa atenuação.

Agora, analisaremos a blindagem com o cobre. A Figura 17 mostra o comportamento da curva de eficiência para uma espessura das paredes de 0,5mm.

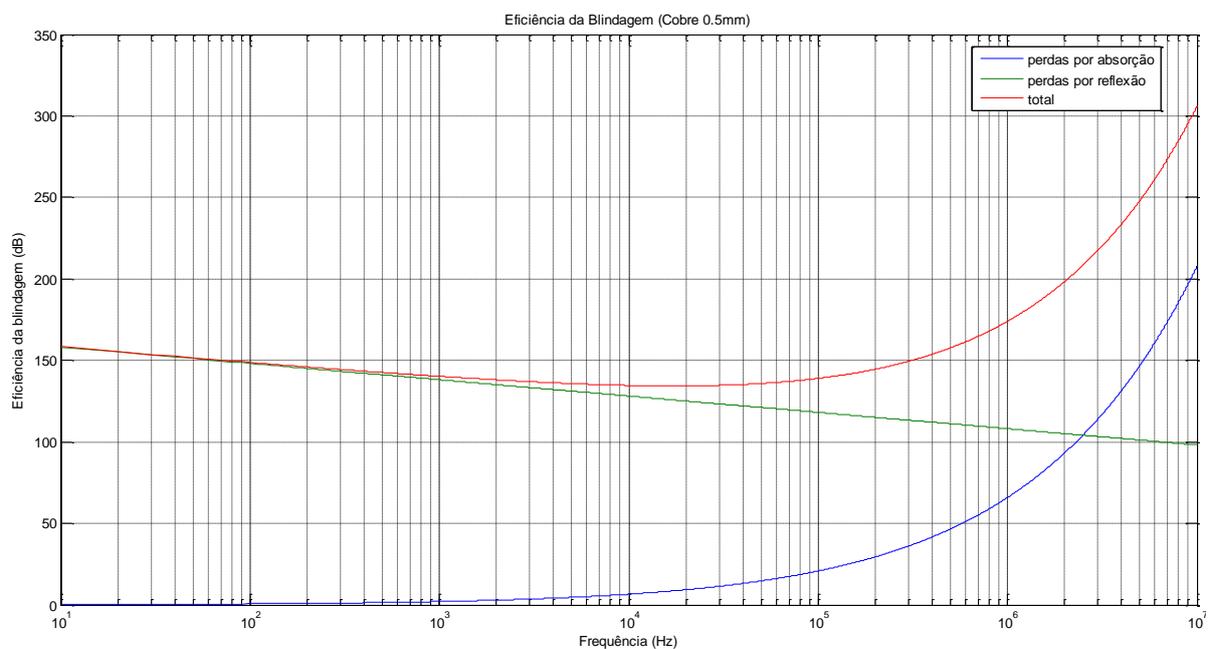


Figura 17 – Curva de eficiência da blindagem (Cobre 0,5mm)

Nota-se que a atenuação por reflexão domina em frequências abaixo de 2,5MHz, enquanto que para frequência maiores o efeito da absorção domina. Isso ocorre pelo fato do cobre possuir uma boa condutividade atenuando as perturbações com baixa frequência.

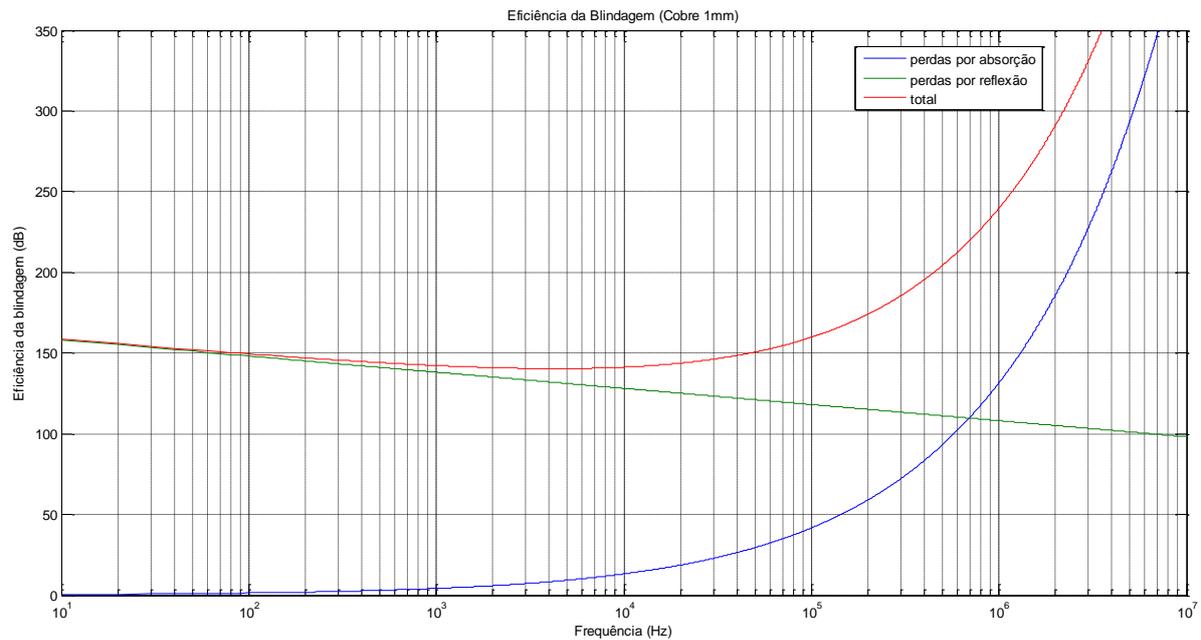


Figura 18 – Curva de eficiência da blindagem (Cobre 1mm)

Com o aumento da espessura o efeito da atenuação por reflexão ainda domina, porém agora para frequências menores que 0,7MHz.

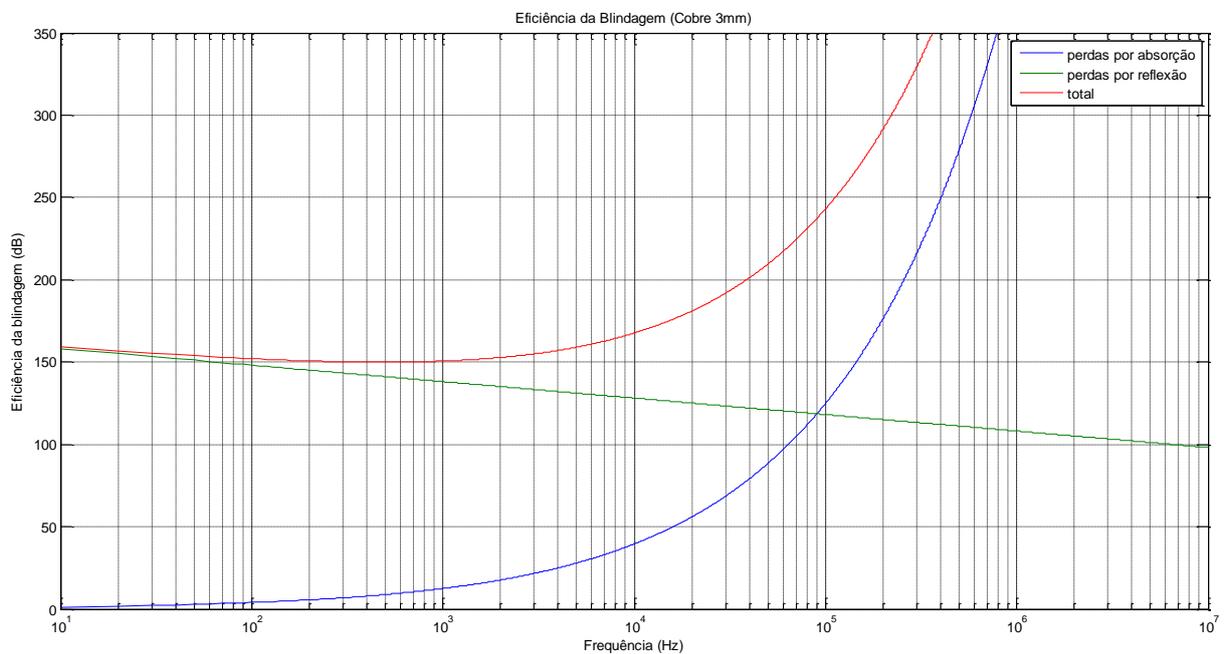


Figura 19 – Curva de eficiência da blindagem (Cobre 3mm)

Aumentando a espessura para 3mm, a reflexão é ainda é dominante sobre a absorção, como mostra as Figuras 18 e 19. Ocorre um lento deslocamento na curva de eficiência quando aumentamos a espessura das paredes. A utilização do cobre em blindagem torna-se viável quando as perturbações possuem baixa frequência, pois consegue-se uma boa atenuação das perturbações eletromagnéticas através da reflexão com uma fina espessura das paredes.

Como esperado, podemos notar a partir das curvas de eficiência, que as perdas por reflexão não dependem das características geométricas da blindagem, ou seja, a curva de perdas por reflexão não é alterada com a mudança na espessura. Já as perdas por absorção dependem das características elétricas, magnéticas e da espessura da blindagem, à medida que é aumenta a espessura da blindagem a curva de perda por absorção fica mais próxima do eixo vertical, aumentando a atenuação por absorção. As perdas por reflexão diminuem com o aumento da frequência, enquanto que as perdas por absorção aumentam com o aumento da frequência. É importante destacar que para fontes distantes, o mecanismo de blindagem predominante, em baixas frequências, é a perda por reflexão, enquanto que em altas frequências, o mecanismo predominante é a perdas por absorção. Com a análise das curvas de eficiência, foi possível notar que ao construir uma blindagem devem-se conhecer a fundo as características da perturbação eletromagnética, pois quando se utiliza o material e a espessura adequados ao problema, é possível resolvê-lo de forma eficiente e econômica.

As curvas obtidas foram para uma situação ideal, quando não há presença de aberturas nas paredes da blindagem. Quando um equipamento eletrônico é blindado, é indispensável a presença de aberturas para circulação de ar e passagem de fios. A presença de aberturas o desempenho da blindagem, ou seja, ocorre uma queda na curva de eficiência da blindagem devido à passagem de perturbações eletromagnéticas pelas aberturas nas paredes. Como solução deste problema, seria utilizar materiais absorvedores e/ou telas metálicas para recobrimento de todos os orifícios.

Podemos notar através das Figuras 14 a 19 que a eficiência de uma blindagem é determinada pelos seguintes fatores:

- Características do campo que se deseja blindar: Os fatores ligados a reflexão do campo incidente em uma superfície metálica dependem da impedância de onda, que é diferente para cada tipo de fonte.

- Tipo de material usado na blindagem: Deve-se conhecer as características elétricas (condutividade) e magnéticas (permeabilidade) do material, sendo os materiais de boa condutividade e permeabilidade os mais eficientes.
- Características ligadas a geometria do sistema: O posicionamento adequado dos condutores e a distância da blindagem à fonte, podem aumentar a atenuação do campo eletromagnético.

A técnica de blindagem, atualmente, tem sido uma das soluções utilizadas para proteger o espaço físico de radiações indesejadas, assim espera-se que as pesquisas relacionadas a blindagem aumentem, e com isso, tornar os equipamentos eletrônicos praticamente imunes as perturbações eletromagnéticas.

## 4 *Conclusões*

Com este trabalho, procurou-se entender os conceitos de interferência eletromagnética, como esta é gerada e como interfere na vítima. Foi estudada também a compatibilidade eletromagnética, que na verdade, esta relacionada com as normas que ditam o quanto de perturbação eletromagnética um equipamento eletrônico pode emitir ou receber. Quando um equipamento eletrônico esta em um meio eletromagnético, este emite ou recebe perturbações eletromagnéticas que interferem no funcionamento dos equipamentos ao redor, desta forma foram estudados os métodos para redução das interferências, sendo estes: a filtragem, o aterramento e blindagem. O trabalho teve como foco o estudo da blindagem para redução de EMI, onde foi estudado a propagação das ondas eletromagnéticas em condutores, já que as perturbações são oriundas das ondas eletromagnéticas. Fez-se um estudo sobre a blindagem de equipamentos eletrônicos, que permitiu o levantamento da curva de eficiência da blindagem.

Ao se projetar uma blindagem, a eficiência é de grande importância, pois o material, a espessura das paredes e as características da perturbação são fatores relevantes para uma alta eficiência da blindagem. Os materiais utilizados na simulação foram o cobre e o ferro, os resultados obtidos ficaram de acordo com o esperado, como o cobre é melhor condutor comparado ao ferro (possui maior condutividade), obtém-se uma melhor atenuação das EMI por reflexão para uma blindagem com cobre, enquanto que com a utilização do ferro obtém-se uma melhor atenuação por absorção, pois, o ferro possui maior permeabilidade magnética comparado com o cobre.

Portanto, o uso de blindagem em dispositivos eletrônicos é de grande importância para o controle das EMI, evitando que o dispositivo possa emitir ou receber perturbações, tornando o ambiente livre de perturbações, melhorando a funcionalidade dos equipamentos eletrônicos e que o mesmo possa funcionar dentro dos limites imposto pelas normas.

Fica como sugestão para os próximos trabalhos, fazer a simulação de uma blindagem através de software que utilizam os métodos dos elementos finitos, realizar um experimento de uma blindagem e também simular outro método de atenuação das EMI como, por exemplo, os filtros.

## ***Referências Bibliográficas***

- [1] Silva Portocarrero, S. I. A. F. (2006). Estudo de Compatibilidade Eletromagnética de Aparelhagem de Média Tensão. Dissertação de Mestrado. FEUP, Portugal.
- [2] Liz, M. B. (2003). Contribuição para Redução da Interferência Eletromagnética em Fontes Chaveadas. Tese de Doutorado. Florianópolis.
- [3] Beltrame, F.(2012). Interferência Eletromagnética. Trabalho de conclusão de curso. Santa Maria
- [4] Rosa, J. J. G. Interferencias em los equipos electrónicos de medida.
- [5] Ferrer, L. Intruduccion a la compatibilidade electromagnetica. Barcelona.
- [6] Programa de Formação Técnica Continuada. Compatibilidade Eletromagnética.
- [7] Beltrame, F., Schuch, L., Roggia, L., Pinheiro, J. R. EMI Conduzida Gerada por Conversores Estáticos Aplicados à Correção do Fator de Potência. Ibirubá.
- [8] Isoni, M. Compatibilidade Eletromagnética em Subestações e Recintos Elétricos.
- [9] Moura, D.(2011). Contribuição à Análise de Interferência e Compatibilidade Eletromagnética em Circuitos Digital Através de Simulação Numérica. Florianópolis.
- [10] Souza, A. M.(2005). Estudo da Compatibilidade Eletromagnética em Equipamentos Eletromédicos para Testes de Pré-Conformidade de Imunidade Eletromagnética. Itajubá.
- [11] Wentwerth, S. M. Fundamentos do Eletromagnetismo com Aplicação em Engenharia. Primeira Edição.
- [12] Cassidato, C. PROFIBUS: Aterramento, blindagem, ruídos, interferências, reflexões e muito mais... . SMAR Equipamentos.
- [13] Visacro, S. Sistemas de Aterramentos Elétricos. Belo Horizonte.
- [14] Soares, E. P.(2013) Introdução a Compatibilidade Eletromagnética Automotiva. São Caetano do Sul.
- [15] Pessoa, M. Entenda o que é EMI e o que podemos fazer para minimizar os seus efeitos.