

ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E EFEITOS DE BLINDAGEM

Rafaela Steffany da Silva Kayo¹

William Aparecido de Oliveira²

Dr.º Geraldo Peres Caixeta³

Universidade São Francisco

rafaelasteffany@hotmail.com / w2a.oliveira@gmail.com / geraldo.caixeta@usf.edu.br

¹Aluna do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco; Campus Campinas.

²Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco; Campus Campinas.

³Professor Orientador do Trabalho de Graduação, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco; Campus Campinas.

Resumo

A velocidade com que as informações são transmitidas dentro do mundo globalizado tem desafiado, ao longo dos anos, a ciência e a engenharia na pesquisa e no desenvolvimento tecnológico de componentes e equipamentos eletroeletrônicos que trabalhem a uma grande faixa de frequências e em tempos extremamente curtos. Essa grande velocidade de processamento de determinados equipamentos pode causar interferência eletromagnética (Electromagnetic Interference - EMI, do inglês), em outros circuitos ou equipamentos. Isso tem exigido um cuidado especial em projetos de circuitos de maneira que, além de apresentar certa imunidade, também não seja responsável pela interferência em outros. O objetivo deste trabalho é estudar teoricamente alguns aspectos relacionados a esse fenômeno e realizar uma análise prática no laboratório, servindo de base para mais experimentos que ajudem a entender melhor os fenômenos eletromagnéticos podendo ser implementado em complemento às aulas teóricas. Inicialmente, é demonstrado um estudo sobre interferências eletromagnéticas em laboratório através da interação entre duas linhas de transmissão, uma alimentada com fonte de frequência fixa e a outra “vítima”, concomitante a isso, é feito um estudo sobre algumas teorias e leis do eletromagnetismo que cercam esse abrangente tema, como as leis de Faraday e Ampère. É apresentado através de ensaios com variações nas configurações de posicionamento e distância, que o comportamento do sinal induzido acoplado entre as linhas, apresenta variações significativas na amplitude do sinal conforme a distância que as separam, devido à diminuição do acoplamento indutivo e capacitivo provocados pela corrente e tensão fornecida pelo gerador de ondas arbitrarias, o que configura o distanciamento e a posição das linhas como fator determinante na incidência desse sinal indesejável. Ensaio utilizando folha de papel alumínio, servindo de blindagem, também são realizados de modo a observar o grau de eficiência que esse material apresenta na blindagem de uma linha de transmissão. É possível observar que o alumínio, em determinados arranjos apresenta uma boa eficiência à atenuação do sinal e também blindagem total da linha.

Palavras-Chave: Interferência eletromagnética, compatibilidade eletromagnética, linhas de transmissão, acoplamento eletromagnético, blindagem eletromagnética.

1. Introdução

As questões relacionadas às interferências eletromagnéticas (EMI) já são antigas, tendo chamado a atenção de pesquisadores na medida em que a velocidade da evolução tecnológica ganhou proporções inimagináveis até a pouco tempo, notadamente com o crescimento das faixas de frequências estabelecidas em sistemas de comunicações, e o desenvolvimento de uma gama de componentes eletrônicos digitais, cuja velocidade de processamento é cada vez maior. Dada à complexidade de conceitos envolvidos no processo, geralmente esse assunto faz parte apenas de programas de pós-graduação, instigando em estudantes do curso de engenharia elétrica a busca de conhecimentos mais aprofundados antes mesmo de finalizar a graduação PAUL (2006b).

A interferência eletromagnética é uma parte de um contexto mais amplo, vinculada à área de compatibilidade eletromagnética. Todo equipamento eletroeletrônico está sujeito, em maior ou menor grau, a interferências de natureza eletromagnética, prejudicando seu desempenho para a atividade fim para a qual foi projetado, além de prejuízos de ordem financeira. Todo fabricante de equipamento que atua na área se preocupa com o assunto, muitas vezes investindo em ensaios compulsórios, que são controlados por órgãos governamentais PAUL (2006b). Por isso, é de suma importância que engenheiros tenham um conhecimento fundamentado na teoria eletromagnética, capacitando-os no desenvolvimento de dispositivos cada vez mais imunes a esse tipo de interferência. Um dos princípios básicos relacionados ao tema é muito bem conhecido na literatura e foi expressa na terceira equação de Maxwell – Lei de Faraday – e complementada pela Lei de Ampère, a quarta equação¹ PAUL (2006a).

Conforme mencionado em PAUL (2006a) as ondas eletromagnéticas são ricas em conteúdo espectral, ou seja, possuem altos níveis de frequências, podendo assim causar interferências ou ruídos em vários equipamentos eletroeletrônicos e assim provocar um funcionamento indesejável ou fora dos padrões nesses equipamentos. Por isso a preocupação é crescente, uma vez que dispositivos baseados em eletrônica digital estão sendo cada vez mais utilizados, sendo que sua velocidade de processamento e frequência de trabalho é cada vez maior (hoje na faixa de dezenas GHz). Segundo PAUL (2006b) um pulso digital enviado em trilhas de placas de circuito impresso gera campos elétricos e magnéticos que poderão induzir sinais de amplitude e frequência suficientes para interferir em sinais de outras trilhas. Esse acoplamento entre os pares de trilhas pode acarretar em erros lógicos em computadores e equipamentos digitais e causar prejuízos inestimáveis.

Transmissões de rádio e TV, sinais de telecomunicações e radares apresentam também uma problemática de interferências eletromagnéticas em dispositivos. Embora algumas dessas transmissões não sejam digitais, podem se acoplar em dispositivos digitais, gerando assim sinais induzidos no disposto em questão, prejudicando o seu funcionamento. Amplamente essas questões são abordadas dentro do campo da compatibilidade eletromagnética (EMC) e basicamente, quando se fala em um sistema ser compatível com o seu meio, ele deve atender critérios como não causar interferência em outros sistemas, não estar suscetível a receber interferência de outros sistemas e não causar interferência a si mesmo PAUL (2006b). Essas interferências eletromagnéticas são perturbações presentes nos circuitos, causadas por fontes externas, que podem ser

¹ As quatro equações foram publicadas no ano de 1861.

classificadas em naturais ou artificiais, de origem de fenômenos da natureza ou por ação do homem, através de outros equipamentos PRESTES (2010).

1.1. Indução eletromagnética: Acoplamento Magnético e as Equações de Maxwell

De acordo com DREWNIK (2015) o princípio fundamental da lei de Faraday, que diz que um campo magnético variável no tempo que atravessa uma superfície delimitada por um caminho circuitual, induz tensão elétrica no mesmo, tem aplicação nos efeitos de acoplamento parasitário entre hardwares eletrônicos. PAUL (2006a) afirma que quando um sinal (corrente ou tensão) de um par de condutores se acopla a um par de condutores adjacentes há um efeito chamado *crosstalk*, que causa uma repetição indesejada daquele sinal nos condutores adjacentes.

Como exemplo, DREWNIK (2015) ilustra na figura 1, um circuito emissor com uma fonte V_{es} , através da corrente circulante no circuito I_e , produz um campo magnético variável no tempo, que se acopla com o circuito de área A_v de fonte V_{vs} induzindo um sinal de tensão (fem) no circuito “vítima”, que por sua vez dá origem a uma corrente parasita através desse circuito. Uma tensão de ruído é observada sobre a carga do segundo circuito.

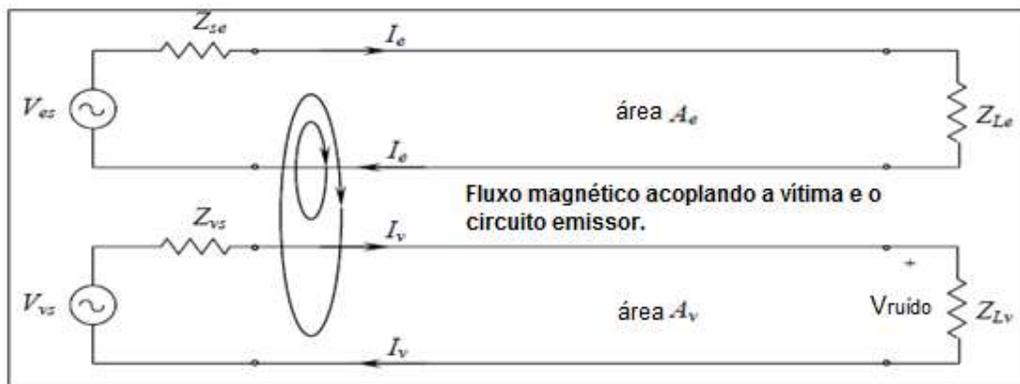


Figura 1 – Representação esquemática do acoplamento de ruído através de uma variação temporal do campo magnético e a tensão de ruído induzida na carga no circuito da vítima. Fonte: Adaptado de DREWNIK (2015, p.2)

PAUL (1990) descreve que correntes e tensões associados com sinais transmitidos em um par de fios paralelos, gera campos elétricos e magnéticos nas proximidades desses fios. Esses campos eletromagnéticos interagem com quaisquer fios condutores e induz tensões e correntes em linhas de transmissão, e conforme destacado pelo autor, parte desses sinais são percebidos na carga no final da linha como sinais indesejáveis, que podem causar degradação no desempenho dos circuitos.

Como já mencionado, esse fenômeno conhecido como *crosstalk* (PAUL, 1990), possui dois mecanismos associados: a corrente (I_1) do gerador produz um campo magnético que é acoplado à linha receptora por meio da indutância mútua (L_m) - fenômeno conhecido como acoplamento indutivo; similarmente, a tensão (V_1) do gerador produz um campo elétrico que é acoplado à linha receptora por meio da capacitância mútua (C_m) - fenômeno conhecido como acoplamento capacitivo. A tensão induzida (V_2) é diretamente proporcional a ambas as impedâncias mútuas, que variam conforme a distância das linhas, sendo que, as impedâncias diminuem com o aumento da distância (L) entre elas. Frequências mais altas também elevam o valor da

tensão induzida, conforme já previsto pela lei de Faraday (tensão induzida diretamente proporcional à frequência do sinal).

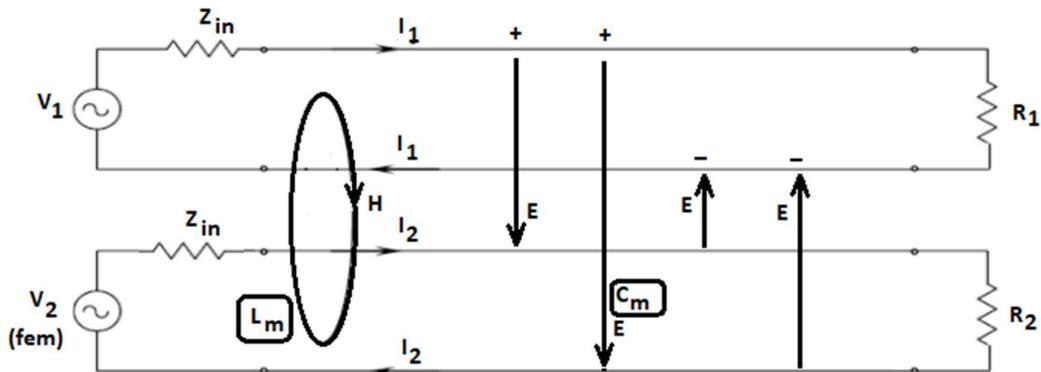


Figura 2 – Acoplamento magnético (indutância mútua L_m) e acoplamento elétrico (capacitância mútua).
Fonte: adaptado de DREWNIAK (2015) e PAUL (2006a).

De acordo com PAUL (2006a) as ondas eletromagnéticas têm a sua fundamentação na combinação das leis de Faraday e de Ampère.

Tabela 1 - As 4 Equações de Maxwell na forma integral (ou espacial) e na forma pontual.

Lei	Forma integral	Forma pontual
Faraday	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Gauss (campo elétrico)	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho_v dV$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$
Gauss (campo magnético)	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Fonte: PAUL (2006a, p.163).

Como mencionado por SADIKU (2012), Michael Faraday estabeleceu experimentalmente que um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo magnético variável no tempo produz uma tensão induzida em um circuito fechado, causando um fluxo de corrente. O autor assim descreve:

“Faraday descobriu que a **fem induzida**, V_{fem} (em volts), em qualquer circuito fechado, é igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético enlaçado pelo circuito.” (SADIKU, 2012, p.334)

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (eq.1)$$

$$Vfem = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (eq.2)$$

Sendo que:

$$\varphi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (eq.3)$$

Onde \vec{E} é o vetor de intensidade de campo elétrico, \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético. Sendo Vfem a tensão induzida pela variação temporal do fluxo magnético φ , essa lei pode ser matematicamente traduzida por:

$$Vfem = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (eq.4)$$

Uma corrente ou um fluxo de cargas elétricas que atravessam uma superfície aberta produz uma circulação de campo magnético ao redor do caminho que cerca a superfície FLEISCH (2008).

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (eq.5)$$

Onde \vec{H} é o vetor intensidade de fluxo magnético, \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica e \vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico. Segundo PAUL (2006a), o termo à esquerda da equação refere-se à força magnetomotriz, e os dois termos a direita são correntes de condução e de deslocamento, respectivamente. Ou seja, a equação 5 pode ser reescrita como:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{cond.} + I_{desl.} \quad (eq.6)$$

PAUL (2006a) descreve que para um elemento de corrente de comprimento infinito, o vetor densidade de fluxo magnético torna-se:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \hat{\phi} \quad (eq.7)$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ é a permeabilidade no vácuo e R o raio da circunferência formada pelo campo magnético em torno do condutor. O vetor intensidade de fluxo magnético no vácuo fica:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (eq.8)$$

1.2. Blindagens a interferências eletromagnéticas

Segundo GEETHA (2008) uma onda eletromagnética quando atravessa uma blindagem, sofre absorção e reflexão, restando ainda uma energia residual que não é nem absorvida e nem refletida pela blindagem, mas emergida dela. PAUL (2006b) aborda que o termo blindagem geralmente se refere a um gabinete metálico que envolve o circuito, ou parte dele, com o propósito de evitar as emissões de componentes

eletrônicos irradiam para fora dos limites do circuito, ou seja, evitar que o circuito provoque interferência em outros equipamentos ou circuitos, e evitar que emissões irradiadas externas ao circuito blindado sofram possíveis acoplamentos de outros componentes externos.

PAUL (2006b) ainda menciona que a eficácia de uma blindagem é a razão entre a magnitude de um campo eletromagnético incidente e a magnitude do campo eletromagnético transmitido pela barreira. A eficácia de blindagem da barreira é definida em decibéis, considerando o fator de blindagem com o sinal trocado:

$$S(dB) = -168 + 10 \log \frac{f \mu r}{\sigma r} - 0,1314 \cdot e(mm) \sqrt{f \mu r \sigma r} \quad (eq.9)$$

Onde S é o fator de blindagem, f é a frequência do sinal, μr e σr são a permeabilidade e condutividade relativa do material, respectivamente. GEETHA (2008) descreve que os metais podem absorver, refletir e transmitir EMI, por isso equipamentos são protegidos contra radiação eletromagnética de altas frequências por escudos de metal, sendo a liga de mu-metal o material mais comum na construção de invólucros para blindagem devida a sua elevada permeabilidade magnética a baixas intensidades de campos magnéticos. PAUL (2006b) menciona que materiais ferrimagnéticos, como as ferrites, tem uso crescente em dispositivos eletrônicos para prevenção de EMI, por sua alta resistividade e perdas que aumentam à medida que a frequência do campo magnético aplicado aumenta.

2. Objetivo

A proposta inicial deste trabalho consiste em realizar um levantamento bibliográfico sobre o tema, considerando os principais meios de consulta disponibilizados pela Universidade, como a própria biblioteca física, a biblioteca digital, artigos científicos disponíveis na plataforma Scielo e outros meios de acesso livre. Em princípio, será dada ênfase aos princípios básicos e teóricos relacionados ao tema de interferências eletromagnéticas e, na medida de sua evolução, buscar o aprofundamento no assunto, com novas referências bibliográficas.

Concomitante a isso, será desenvolvido um protótipo para realização de ensaios sobre interferência eletromagnética, visando comprovar na prática a teoria estudada. A proposta é a construção de linhas de transmissão bifilar com fios de cobre esmaltado em suporte de madeira, onde será considerada uma linha fixa com fonte e outras configurações de linhas como receptoras (vítimas); com a utilização de um gerador de ondas arbitrárias para emitir sinais de determinada faixa de frequências na linha tida como fonte, e com um osciloscópio poder obter a medida do sinal induzido nas linhas receptoras, relacionando-o como sendo uma interferência indesejável. A configuração final dessas linhas de transmissão será definida futuramente, de forma a buscar a melhor maneira de obter resultados que possam analisados. A partir dessas configurações e medidas iniciais, pretende-se explorar os conceitos envolvidos e análises de blindagens no sistema de acoplamento. A motivação deste trabalho é abordar uma área de aplicação do eletromagnetismo em suas teorias físicas e matemáticas e comprovar o fenômeno em laboratório, dando uma visão menos abstrata de fenômenos ligados a esse campo da física e da engenharia, contribuindo também para despertar o interesse por aulas mais práticas e melhor entendimento por parte dos estudantes, sabendo-se que a supracitada disciplina provoca certo desconforto nos estudantes de engenharia elétrica pelos seus conceitos abstratos e complexidade matemática.

Esse artigo será dividido em descrição teórica dos principais termos e eventos envolvendo o assunto (embasamento teórico); descrição teórica da metodologia de ensaios no laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos do curso de engenharia elétrica da Universidade São Francisco; Medições em diferentes configurações do modelo de interferências eletromagnéticas em linhas de transmissão; resultados esperados e referências bibliográficas.

3. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia que será adotada, descrevendo os ensaios a serem realizados, recursos necessários, procedimentos para execução, preparação de amostras e roteiros de ensaio. Os ensaios para medição e análise dos parâmetros da EMI serão realizados considerando uma modelagem pela teoria de linhas de transmissão, onde duas linhas serão prototipadas e dispostas em algumas configurações, sendo a primeira denominada por linha fonte, onde o sinal será aplicado e a segunda denominada por linha “vítima”, que atuará com o papel de receptora, onde serão registrados os efeitos causados condicionados a interferência de forma irradiada, através dos níveis de frequência e tensão. Serão três configurações primárias de ensaio: distanciamento, posicionamento e colocação de blindagem. Dentro dessas configurações, existirão ainda as configurações secundárias: variação de distâncias, variação de posicionamento e teste com blindagem. Os materiais para confecção das linhas e equipamentos para os ensaios serão apresentados nas tabelas 2 e 3 a seguir:

Tabela 2 - Materiais que serão utilizados para montagem das linhas de transmissão

Componente	Especificação	Unidade de Medida	Quantidade
Fio de cobre esmaltado	AWG18 – Ø1mm	Metros	2
Resistores	100Ω	Peça	2
Base de madeira	Madeira MDF 60cmx10cm	Peça	2
Blindagem	Papel alumínio 110cmx25cm	Peça	1

Tabela 3 - Equipamentos que serão utilizados nos ensaios

Equipamento	Marca	Modelo	Capacidade
Osciloscópio digital	Tektronix	TBS 1052B	50MHz 1GS/s
Gerador de Ondas Arbitrárias	Agilent	33220A	20MHz

A seguir é apresentado o processo de montagem do protótipo e o roteiro de ensaios. Após o levantamento dos materiais e equipamentos, a construção do protótipo é baseada no esquema elétrico apresentado na figura 3.

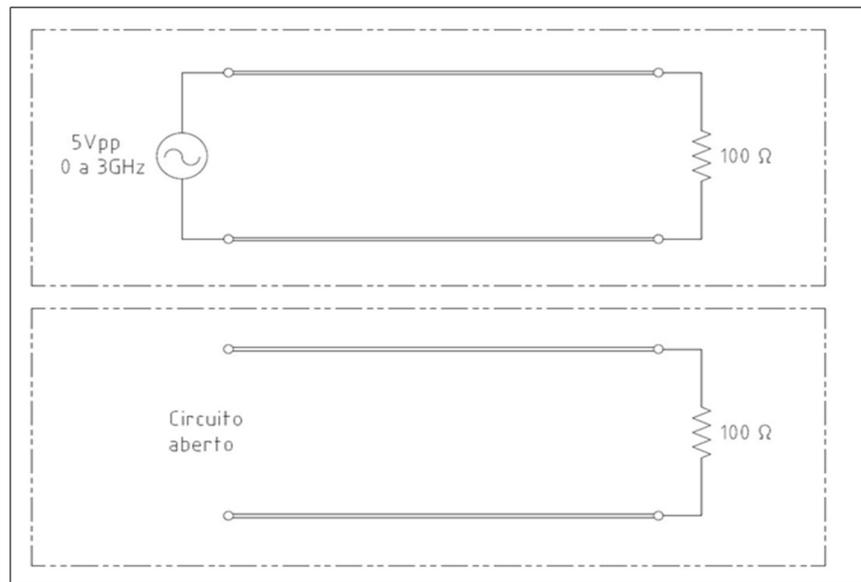


Figura 3 – Esquema elétrico acima da linha de transmissão fonte e o de baixo é da linha de transmissão “vítima”. Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme o esquema, a linha de transmissão que servirá como fonte de interferência eletromagnética é montada a partir de um par de fios de cobre esmaltados, de comprimento de 50 centímetros, postos paralelamente a uma distância de aproximadamente 3 cm um do outro, sobre o suporte de madeira. No suporte 1 com dimensões de 60cm x 10cm, o par de fios é posicionado de maneira que fique alocado em uma das extremidades do suporte, deixando um espaço na lateral maior do lado oposto ao posicionamento da linha de transmissão. Os fios já posicionados são presos com fita isolante, de maneira a ficarem com a mesma distância ao longo de toda sua extensão.

Após o posicionamento e fixação dos fios no suporte, um resistor de 100Ω será soldado com estanho na extremidade direita da linha, que servirá como carga resistiva da linha de transmissão. Na extremidade esquerda da linha será conectado o gerador de ondas arbitrárias que fornecerá a alimentação de aproximadamente 5 V pico a pico ao circuito com faixas de frequências ajustáveis conforme o ensaio a ser empregado.

A linha de transmissão que servirá como “vítima” de interferência eletromagnética, seguirá os mesmos passos de montagem, agora no suporte 2, a única diferença é que a extremidade esquerda ficará em aberto para que sejam conectados os instrumentos de medição, como o osciloscópio e o analisador de espectro, para aferição dos sinais parasitas que estão sendo transmitidos sobre a carga resistiva provenientes do circuito tido como fonte de interferência. O esquema de montagem geral é apresentado na figura 4.

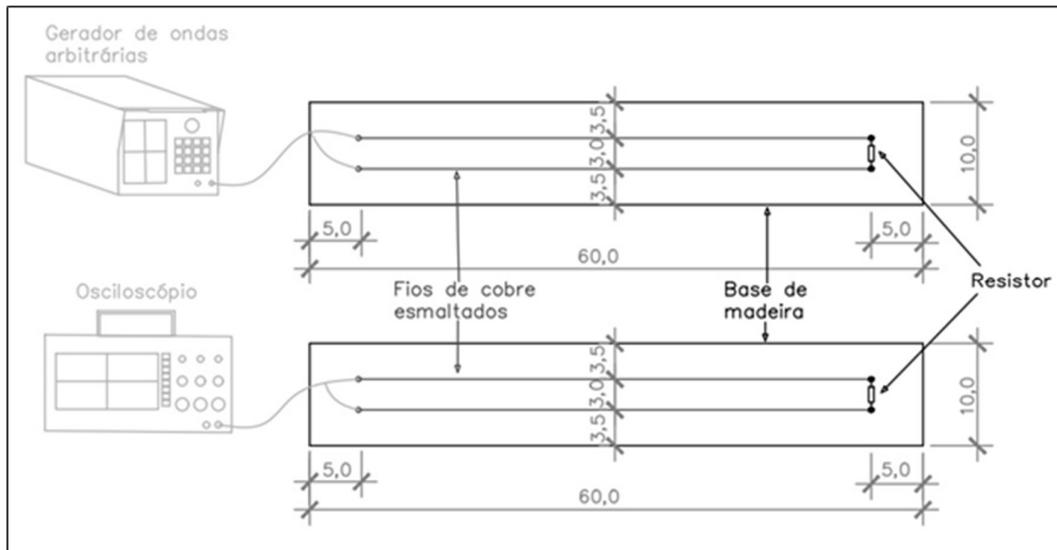


Figura 4 – Ilustração do esquema de montagem do protótipo, com medidas em centímetros. Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Roteiros de Ensaios

Neste tópico serão apresentados no detalhe, os ensaios de distanciamento, posicionamento e blindagem. Para isso, serão tomadas as seguintes ações:

- **Preparação do equipamento de alimentação:** Ligar o gerador de onda arbitrária e configurar uma alimentação de 20MHz - Tensão senoidal 5 Vpp. Essa preparação será utilizada em todos os ensaios.
- **Medições:** realizar medições utilizando o osciloscópio no ponto destacado nas figuras, seguindo as orientações de distanciamento e anotar os resultados.

Primeiramente, o ensaio de distanciamento será realizado com o intuito de observar os níveis de EMI no circuito vítima a diferentes distâncias do circuito fonte. Para isso, as linhas serão separadas em diferentes distâncias uma da outra como exemplificada na figura 5.

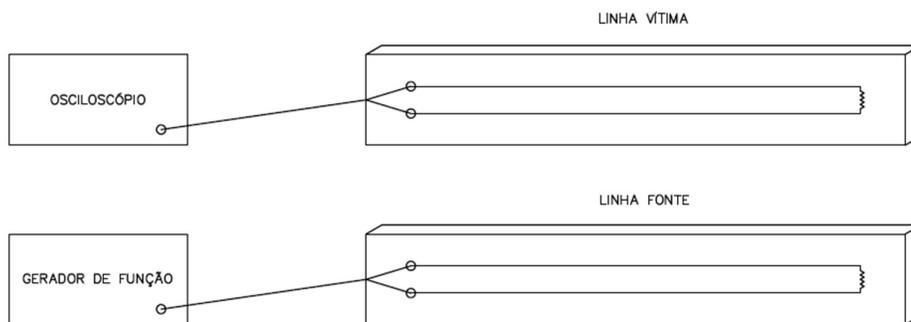


Figura 5 – Ilustração do esquema de posição das bases distanciadas entre si. Fonte: Elaborado pelos autores.

O ensaio de posicionamento será realizado com o intuito de observar os níveis de EMI no circuito vítima a diferentes posições em relação ao circuito fonte. Para isso, as linhas serão postas posicionadas da seguinte maneira respectivamente: primeiro perpendicularmente a 90 graus, depois verticalmente sobrepostos distanciados a 20 centímetros e, por último, de forma cruzadas sobrepostas sem distanciamento, conforme ilustrado nas figuras 6, 7 e 8.

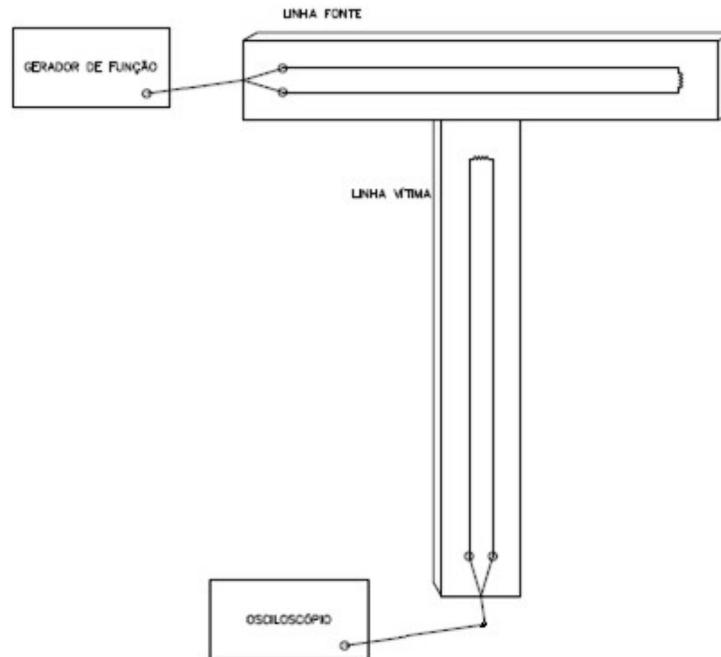


Figura 6 – Ilustração do esquema de posição das bases a 90 graus. Fonte: Elaborado pelos autores

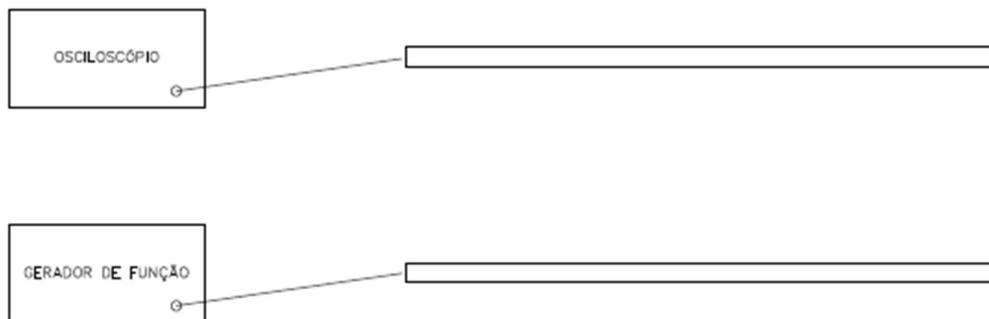


Figura 7 – Ilustração do esquema de posição das bases posicionadas verticalmente sobrepostas com 20cm de distância. Fonte: Elaborado pelos autores.

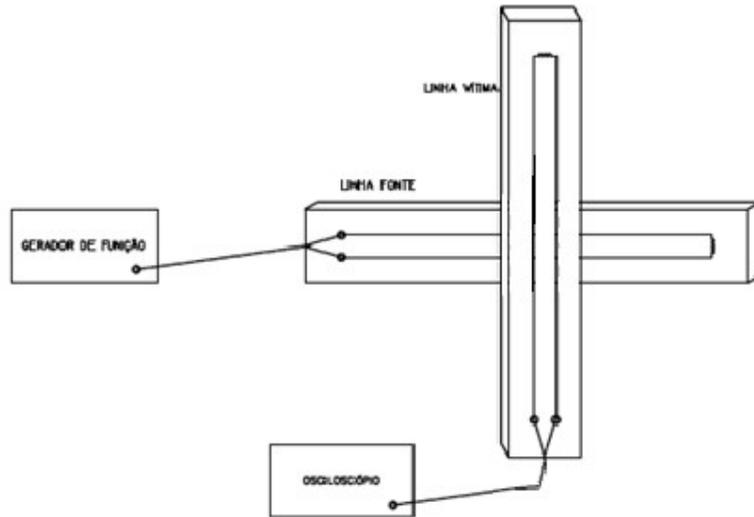


Figura 8 – Ilustração do esquema de posição de forma cruzada. Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Ensaios de Blindagem com Alumínio

Esse ensaio será realizado visando observar a eficiência do alumínio em atenuar o sinal acoplado na linha de transmissão. A ideia é utilizar uma folha de papel alumínio e envolver as linhas de transmissão e verificar a eficiência dessa blindagem para cada situação. A folha de papel alumínio será recortada nas dimensões aproximadas de 130 cm x 25 cm, que envolverá, em um primeiro instante, a linha de transmissão receptora de sinais de EMI, recobrindo-a como um envoltório. Depois será recoberto também a linha fonte de interferências.

Após cobrir a linha com o papel alumínio, são efetuados os seguintes passos:

- Posicionam-se as linhas fonte e receptora em paralelo a uma distância onde já foi efetuado algum teste de interferência anterior, e se tem o valor da amplitude do sinal conhecido.
- Aplica-se a mesma frequência do sinal do teste anterior;
- Verifica-se a amplitude do sinal medido e a frequência na linha receptora, agora com ela blindada;
- Realizam-se comparações dos resultados obtidos.

4. Resultados

Serão apresentadas as medições obtidas nos ensaios descritos na metodologia. Inicialmente, os dois pares de linhas foram montados sobre as bases conforme instrução do roteiro, considerando linha fonte e linha vítima com o sinal devidamente aplicado, posicionadas com uma distância de 10 centímetros entre si. Porém, nenhum resultado pôde ser observado na leitura do osciloscópio.

Diante disso, algumas investigações foram realizadas, partindo do princípio da relação do comprimento de onda com a frequência do sinal, baseado na expressão $\lambda = \frac{v_0}{f}$, onde λ é o comprimento de onda, considerando $v_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ - velocidade de propagação no ar e $f = 20 \text{ MHz}$ - frequência do sinal; obteve-se que $\lambda = 15$ metros. Para

PAUL (2006a) uma dimensão física menor do que $1/10$ do comprimento de onda é dita eletricamente pequena de modo que o deslocamento de fase do sinal, à medida que a onda se propague é desprezível. Por isso, os fenômenos eletromagnéticos são ignorados e o circuito é analisado usando parâmetros concentrados. Como no primeiro instante, tendo as linhas 50 centímetros de comprimento, ou seja, um terço menor do que foi estabelecido pelo autor, e não foi possível tratar esses fenômenos, o tamanho da linha foi alterado para 110 centímetros mantendo a mesma frequência de 20 MHz, aproximando assim o comprimento das linhas a $1/10$ ao comprimento de onda para possibilitar as medições dos ensaios.

Esse novo circuito das linhas de transmissão será identificado como circuito 1; na tabela 4 é apresentado o resultado dos ensaios de distanciamento, como ilustrado na figura 5.

Tabela 4 - Registro dos parâmetros medidos para o distanciamento do circuito 1.

d(cm)	Tensão gerador	Tensão induzida (Vpp)	Frequência (MHz)
10	5 Vpp	3,36	20
50	5Vpp	2,84	20
100	5 Vpp	1,52	20

A tabela 5 mostra os resultados obtidos dos ensaios de posicionamento das linhas de transmissão, como ilustrados nas figuras 6, 7 e 8 respectivamente.

Tabela 5 - Registro dos parâmetros medidos para posicionamento do circuito 1.

Posição das linhas	Tensão do gerador (Vpp)	Tensão induzida (Vpp)
Perpendicular a 90 graus	5	0,9
Verticais sobrepostas	5	2,18
Cruzadas sobrepostas	5	1,44

A seguir são apresentados na tabela 6 os resultados referentes a comparações de medidas das linhas distanciadas entre si, sem blindagem e com a blindagem com papel alumínio.

Tabela 6 - Registro dos parâmetros medidos do ensaio de blindagem com papel alumínio do circuito 1.

Distância/blindagem	Frequência do sinal recebido sem blindagem (MHz)	Tensão induzida sem blindagem (Vpp)	Tensão induzida com blindagem
5,5m entre as linhas	20	0,52	0
1m entre as linhas	20	1,2	0
1 m/somente a fonte blindada	20	1,2	0
1 metro/ambas as linhas blindadas	20	1,2	0

Ao longo da execução dos testes, surgiu a necessidade de avaliar os níveis da interferência com uma diferente fonte de ruído. Após uma avaliação minuciosa dos recursos disponíveis em laboratório, um novo teste foi realizado com o mesmo circuito, porém utilizando um gerador eletrostático de correia, conhecido como gerador de Van der Graaff. Os resultados são apresentados na tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Registro do ensaio usando o Gerador de Van der Graaff como fonte de interferência eletromagnética.

Distância entre a linha e o gerador Van der Graaff (cm)	Frequência captada	Tensão induzida (Vpp)
10	~ 23KHz	0,2
50	~ 4,5KHz	0,2

A fim de enriquecer o estudo, um novo ensaio foi executado baseado no artigo escrito por PAUL (1990) intitulado “Crosstalk in Cable”, sendo desenvolvido um ensaio de distanciamento e blindagem. Esse novo arranjo será identificado como circuito 2, que como pode ser visto na figura 9, possui fios de cobre com aproximadamente 1,5 metros de comprimento e resistência de carga de 10 Ohms. A linha em que será medido o sinal induzido é fechada nas duas extremidades com resistores de 10 Ohms, diferentemente da linha montada para os ensaios anteriores, que era aberta na extremidade oposta a carga.

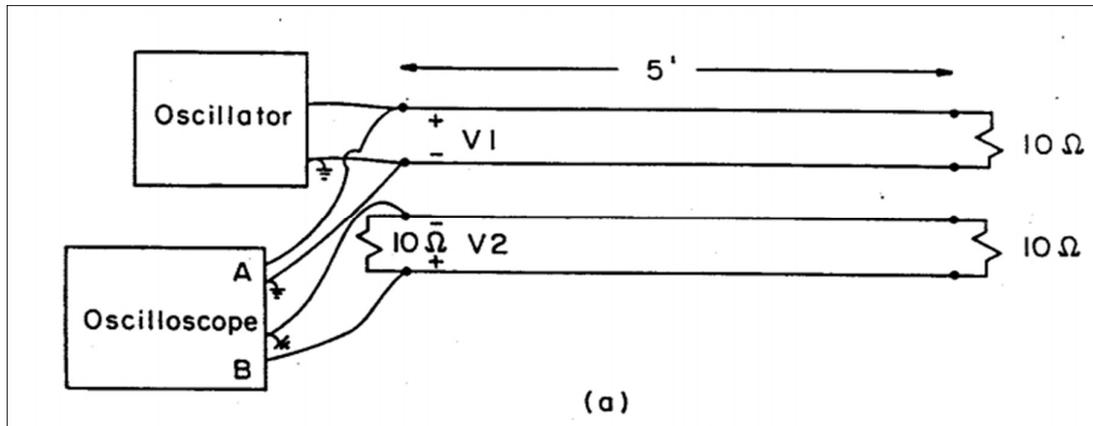


Figura 9 – Circuito 2. Fonte: PAUL (1990).

Em relação ao sinal aplicado, foram considerados os mesmos parâmetros do estudo já iniciado. A partir daí, foram determinadas um maior número de distâncias para uma análise mais minuciosa sobre o comportamento das tensões induzidas em cada ponto. Na tabela 8 foram anotados os resultados desse ensaio.

Tabela 8 - Registro do ensaio de distanciamento realizado a partir do circuito 2.

d1 (cm)	V1 (Vpp)	I1 (mA)	V2 (mVpp)
4	5	8,33	470
10	5	8,33	440
20	5	8,33	408
30	5	8,33	320
60	5	8,33	307
120	5	8,33	281
240	5	8,33	246

Na tabela 9 é apresentado o resultado do ensaio usando blindagem com papel alumínio recobrimdo a linha receptora totalmente.

Tabela 9 – Registro do ensaio de blindagem com a linha receptora recoberta com papel alumínio.

d1 (cm)	V1 (Vpp)	I1 (mA)	V2 (mVpp)
4	5	8,33	0
10	5	8,33	0
20	5	8,33	0
30	5	8,33	0
60	5	8,33	0
120	5	8,33	0
240	5	8,33	0

Após os ensaios realizados anteriormente e também com o conceito de propagação de sinal de forma angular em torno de um condutor reto e longo, foi testada também uma nova configuração de blindagem, com o mesmo papel alumínio, mas em forma de barreira entre as duas linhas, para que o comportamento do sinal pudesse ser observado à medida que as linhas eram distanciadas. A tabela 10 mostra os resultados obtidos e anotados a partir da leitura do osciloscópio, em comparação com os resultados sem a barreira.

Tabela 10 - Registro do ensaio de blindagem da linha receptora com barreira de papel alumínio

d1 (Cm)	V1 (Vpp)	V2 - sem blindagem (mVpp)	V2 - com a barreira de blindagem (mVpp)
4	5	470	218
10	5	440	234
20	5	408	246
30	5	320	264
60	5	307	280
120	5	281	284

5. Discussão dos resultados

Conforme pode ser visto na tabela 5, onde o sinal aplicado de 5 volts pico a pico e frequência de 20MHz na linha fonte, produziu tensões induzidas na linha receptora na ordem de 3,36V, 2,84V e 1,52V pico a pico a distâncias de 10, 50 e 100 centímetros,

respectivamente, ficando bem evidente que a distâncias maiores o sinal vai perdendo sua amplitude de acoplamento. Os ensaios de posicionamento apresentados na tabela 6, onde há três configurações distintas de posicionamento entre as linhas, percebe-se a atenuação da tensão induzida com a linha receptora posicionada perpendicularmente a 90 graus (em formato de um “T”), resultando em um sinal de menor amplitude, 980mV pico a pico, do que as outras posições. Na posição com as linhas verticais e sobrepostas, há o maior acoplamento induzido de 2,18V pico a pico podendo ser comparado aos resultados das linhas distanciadas na horizontal próxima; com elas cruzadas e sobrepostas há influência do posicionamento a 90 graus, que faz com que o sinal induzido seja atenuado significativamente em relação à posição anterior, resultando em 1,44V pico a pico, mesmo estando uma linha sobreposta a outra.

Na tabela 7, é apresentado um comparativo do sinal resultante explorando a blindagem com papel alumínio e o circuito sem a blindagem. O que pode ser visto é que há a blindagem total do sinal induzido quando a blindagem envolve a linha “vítima”, em distâncias mais próximas e razoavelmente maiores entre ambas, e também existe blindagem do sinal propagado pela linha fonte quando ela está totalmente envolvida pela blindagem. Na tabela 8 há os resultados do ensaio feito usando o Gerador de Van der Graff como fonte de interferências eletromagnéticas, que mostram o aparecimento de sinais parasitas que se acoplam na linha receptora quando as descargas elétricas são provocadas pelo bastão, com frequências que variaram com a distância, sendo 25KHz para 4,5KHz em 10 centímetros para 50 centímetros, mas manteve a mesma amplitude do sinal induzido de 200mV.

Os resultados da tabela 9 mostraram que da mesma maneira que aconteceu no ensaio com o circuito 1, o distanciamento entre as linhas diminuiu a amplitude do sinal de interferência no circuito 2. O ensaio com mais variações na distância, é possível perceber que as variações não seguiram uma linha coerente, como por exemplo, no par de distâncias dobradas - 10 para 20 centímetros e 30 para 60 centímetros – que resultou variações na ordem de 32mV e 13mV pico a pico respectivamente. Utilizando o mesmo circuito das linhas de transmissão para o ensaio de blindagem, os resultados da tabela 10 mostram que a blindagem com papel alumínio, envolvendo a linha receptora, atenua totalmente o sinal como foi visto no ensaio do circuito 1.

Utilizando ainda o circuito 2 das linhas de transmissão para blindagem utilizando o papel alumínio como barreira, os resultados da tabela 11 mostram que há atenuação do sinal induzido na linha receptora quando as distâncias entre as linhas e a barreira são menores – 4, 10, 20 e 30 centímetros - produzindo sinais significativamente menores comparados com o ensaio sem blindagem, de 218mV, 234mV, 246mV e 264mV pico a pico respectivamente. Conforme o aumento da distância entre as linhas e a barreira, a diferença entre as tensões induzidas sem a barreira e com a barreira vai diminuindo até que a blindagem perca sua total eficiência, como pode ser visto na distância de 120 centímetros.

6. Conclusão

A partir do primeiro ensaio executado como relatado nos resultados, houve impossibilidade em obter as medições com as linhas de transmissão menores (50 centímetros), devido à frequência insuficiente do gerador disponível no laboratório, o que fez com que elas tivessem de ser aumentadas em comprimento. Apesar disso, de maneira geral, os resultados mostraram o que era esperado a partir do que foi estudado na teoria, que houvesse tensões induzidas na linha de prova a partir do fluxo das linhas de propagação de campo magnético provocado pela variação de corrente elétrica no

tempo, conduzida nos fios da linha geradora. A diminuição dessa tensão induzida com o distanciamento, baseado no que foi descrito por PAUL (1990) que cita sobre como a distância entre as linhas de transmissão causam diminuição nos coeficientes de acoplamento indutivo e capacitivo provocados pela tensão e corrente aplicados pelo gerador de ondas arbitrárias, também era um resultado esperado e conclusivo. Nisso, os resultados dos ensaios com o circuito 1 (tabela 5) e do circuito 2 (tabela 9), conseguiram mostrar que há relação entre os acoplamentos indutivo e capacitivo com a distância entre as linhas, conforme mais longe uma da outra menor a amplitude do sinal, até que não seja mais válida essa relação e não haja mais tensão induzida na linha receptora. A de se observar que esses valores podem não ser tão exatos levando em consideração que há imprecisão dos equipamentos, as condições do ambiente, os erros nos arredondamentos e etc.

Os resultados do ensaio de posicionamento (tabela 6) foram positivos e serviram pra concluir que o acoplamento do sinal obedece à geometria na qual as linhas estão dispostas em um determinado plano. A linha receptora posicionada a 90 graus tem um campo maior para a variação negativa do fluxo magnético por isso menor o sinal acoplado.

Os resultados dos ensaios de blindagem com a linha envolvida em papel alumínio, apresentaram no geral um comportamento esperado que foi a blindagem total do sinal parasita. Por outro lado, para o ensaio de blindagem utilizando o papel alumínio como barreira, havia uma expectativa de blindagem total do sinal o que não ocorreu, mas sim uma atenuação do sinal significativa para as distâncias mais próximas entre as linhas e a barreira. Analisando os resultados e a disposição dos componentes do ensaio, chegou-se à conclusão que essa atenuação deu-se a partir da propagação das linhas de campo magnético de maneira angular em torno dos condutores e a menor distância entre as linhas e a barreira, onde há o bloqueio das componentes de maior módulo de campo magnético, diminuindo significativamente o valor da tensão induzida. Concluiu-se que seria muito difícil a blindagem total com uma barreira de blindagem relativamente pequena devido ao grande raio de propagação das componentes de menor valor das linhas de campo magnético que vão ultrapassando a barreira e se acoplam a linha de transmissão, além de outras interferências provocadas por fontes externas que acabaram sendo vistas em algumas partes do laboratório.

As interferências de fontes externas foram algumas das dificuldades encontradas durante os ensaios, sendo que o laboratório da Universidade não é o mais adequado a esse tipo de investigação. O ideal seria realizar ensaios em locais onde houvesse isolamento a ruídos e contenção de reflexão de sinais, como em câmaras anecoicas.

Por fim, conclui-se que o trabalho atendeu as expectativas e mostrou-se ser uma ferramenta interessante para o aprendizado e a consolidação dos conhecimentos aprendidos em sala de aula, sobre eletromagnetismo básico e aplicado na engenharia, abrindo espaço para outras investigações e estudos que não foram o foco deste trabalho, como por exemplo, os parâmetros e propagação das ondas guiadas por linhas de transmissão.

Referências Bibliográficas

DREWNIAK, J. L. **Coupling Through the Magnetic Field - Faraday's Law**. 2015; EMC Laboratory - University of Missouri-Rolla. 9p.

DREWNIAK, J. L.; DUBROFF, R. E. **Transmission Lines with Reactive Terminations**. 2015; EMC Laboratory - University of Missouri-Rolla. 6p.

DREWNIAK, J.L.; HUBING, T. H.; VAN DOREN, T. P.; SHA, F. **Integrating electromagnetic compatibility.** 2015; Laboratory exercises into undergraduate electromagnetics. 40p.

FLEISCH, D. **A Student Guide to Maxwell's Equations.** New York: Cambridge University Press, 2008. 134p.

FRAIJI, T. K. *Interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos, utilizando o ATP: uma análise da LT 525 kv Campos Novos.* 2007. 88f. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GEETHA, S. et al. EMI Shielding: Methods and Materials - A Review. **Wiley InterScience [online]**. vol. 112, 14p., 2008.

IEEE EMC EDUCATION SOCIETY. Education and Student Activities Committee. **EMC Experiments and Demonstrations Guide.** Piscataway – New Jersey: EMC Society, 2015. 55p.

KRAUS, J. D.; FLEISCH, D. A. **Electromagnetics with Applications.** Singapore: McGraw-Hill, 5ed., 1999. 617p.

PAUL, C. R. Crosstalk in Cables. **EMC Educational Manual.** Lexington: EMC Society, 1990. Pp. 5 - 12.

PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros** – Com aplicações a Sistemas digitais e Interferência Eletromagnética. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 379p [a].

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility.** New Jersey: John Wiley, 2006. 989p [b].

PRESTES, D. P. *Plataforma para injeção de ruído eletromagnético conduzido em circuitos integrados.* 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RIBEIRO, D. T.; ALMEIDA, A. M.; CARVALHO, P. S. Indução eletromagnética em laboratório. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**. v. 34, n.4, 15p., 2012.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo.** 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. pp.114-119 e 334-335.

SHI, J.; DUBROFF, R. E.; DREWNIAK, J. L. **Faraday's Law Demonstration.** 2015; UMR EMC Laboratory. pp. 5-7.