

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**LEONARDO JOSÉ BRANCHER**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE ACOPLAMENTOS  
ELETROMAGNÉTICOS EM MEDIDOR REMOTO DE  
ENERGIA**

Porto Alegre  
2019

**LEONARDO JOSÉ BRANCHER**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE ACOPLAMENTOS  
ELETROMAGNÉTICOS EM MEDIDOR REMOTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão do Curso (TCC-CCA)  
apresentado à COMGRAD-CCA da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de *Bacharel em  
Engenharia de Controle e Automação*.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre  
2019

**LEONARDO JOSÉ BRANCHER**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE ACOPLAMENTOS  
ELETROMAGNÉTICOS EM MEDIDOR REMOTO DE ENERGIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso de Engenharia de Controle e Automação e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina,  
UFSC – Florianópolis, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universidade Paderborn, UPB – Paderborn, Alemanha

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC – Florianópolis, Brasil

Prof. Me. Alceu Heinke Frigeri, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS – Porto Alegre, Brasil

---

Prof. Dr. Marcelo Götz

Coordenador de curso

Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, dezembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela oportunidade de realização dos estudos.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional durante todos os anos da graduação.

Aos meus colegas de apartamento, pela paciência de ouvir as lamentações do dia a dia.

Ao meu orientador, Valner João Brusamarello, por ter acreditado no trabalho e pelo suporte ofertado ao longo da realização do mesmo.

À Associação Atlética Acadêmica da Escola de Engenharia da UFRGS (AAEE) e aos colegas que estiveram nesta jornada comigo, por fazerem da universidade um lugar melhor.

“Dedico este trabalho aos meus pais que  
jamais mediram esforços em busca da  
formação dos seus filhos.”

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto de uma blindagem para interferências de baixa frequência em um medidor de energia remoto, o qual é utilizado para medir a tensão e corrente em cabos multicondutores. O projeto é feito por meio da análise da incidência do campo magnético no interior do instrumento e do acoplamento magnético e capacitivo presente entre os componentes do dispositivo, de forma a determinar as principais fontes de interferências. O estudo é dividido em duas partes: a primeira trata da análise do fluxo magnético gerado pelos condutores próximos ao instrumento e do levantamento das principais fontes de interferências no sinal de corrente medido; a segunda etapa, por sua vez, refere-se à análise de três diferentes materiais e o projeto de uma blindagem em material ferromagnético do invólucro que envolve os sensores, tendo como função atenuar o campo magnético oriundo de condutores externos.

**Palavras-chave:** Acoplamento Magnético. Blindagem. Cabos Multicondutores. Campo Magnético. Medição de Corrente.

## ABSTRACT

This study focuses on developing the design of a shielding for low frequency interference in a contactless device, which is used to measure voltage and current in multi-conductor cables. The work was developed by analyzing the magnetic field incidence inside the instrument and the magnetic and capacitive coupling between the components of the device, in order to determine the source of interference. There are two main stages to this study: the first one is to analysis of the magnetic flux generated by the conductors near the instrument and identify the sources of interference in the measured current signal; the second one refers to the analysis of three different materials and the design of the shielding in ferromagnetic material involving the sensors, attenuating the magnetic field from external conductors.

**Keywords:** Current Measurement. Magnetic Field. Magnetic Coupling. Multi-conductor Cables. Shielding.

# SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	13
LISTA DE SÍMBOLOS .....	14
1 INTRODUÇÃO .....	16
1.1 <i>Motivação</i> .....	19
1.2 <i>Objetivo</i> .....	20
1.3 <i>Estrutura do trabalho</i> .....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 <i>Eletromagnetismo</i> .....	21
2.1.1 Equações de Maxwell .....	21
2.1.2 Permeabilidade magnética.....	23
2.1.3 Curva de Magnetização .....	23
2.1.4 Saturação magnética .....	24
2.1.5 Acoplamento capacitivo .....	25
2.1.6 Acoplamento magnético.....	25
2.2 <i>Blindagem magnética</i> .....	26
2.2.1 Eficácia da blindagem .....	28
3 DESENVOLVIMENTO.....	32
3.1 <i>Sensores de corrente</i> .....	32
3.2 <i>Simulação do protótipo</i> .....	33
3.2.1 Simulação sem interferência externa com excitação de corrente .....	33
3.2.2 Simulação sem interferência externa com excitação de tensão.....	40
3.2.3 Simulação com interferência externa com excitação de corrente .....	41
3.3 <i>Blindagem do instrumento</i> .....	45
3.3.1 Determinação da eficácia da blindagem .....	46
3.3.2 Determinação da espessura da blindagem para os materiais propostos.....	47
3.3.3 Análise de saturação magnética nos materiais propostos.....	48
3.3.4 Escolha do material da blindagem .....	51
3.3.5 Modelagem e simulação do novo dispositivo.....	52
4 RESULTADOS .....	54



4.1	<i>Acoplamento magnético entre os condutores e as bobinas</i> .....	54
4.2	<i>Acoplamento magnético entre as bobinas</i> .....	55
4.3	<i>Acoplamento capacitivo entre os condutores e as bobinas</i> .....	56
4.4	<i>Acoplamento magnético dos condutores e da bobina com interferências externas</i> .....	57
4.5	<i>Acoplamento magnético do dispositivo com a blindagem</i> .....	58
5	CONCLUSÕES .....	59
5.1	<i>Trabalhos futuros</i> .....	60
	REFERÊNCIAS .....	61

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arranjo dos sensores do medidor de energia remoto.....	17
Figura 2: Arranjo de bobinas responsáveis pelo acoplamento magnético.....	19
Figura 3: Exemplo de curva de magnetização.....	23
Figura 4: Ciclo de histerese.....	24
Figura 5: Blindagem com material ferromagnético.....	27
Figura 6: Blindagem com material condutor.....	27
Figura 7: Onda transmitida em blindagem eletromagnética.....	29
Figura 8: Vista frontal e corte do dispositivo (medidas em mm).....	32
Figura 9: Modelagem do dispositivo no software Maxwell.....	33
Figura 10: Campo magnético gerado pelos três condutores do cabo.....	34
Figura 11: Aproximação do campo magnético gerado pelos três condutores.....	35
Figura 12: Comportamento da densidade de fluxo magnético sem interferência externa.....	35
Figura 13: Condutores trifásicos e bobina acoplados magneticamente.....	36
Figura 14: Circuito equivalente do dispositivo operando em condição normal.....	38
Figura 15: Bobinas acopladas magneticamente.....	38
Figura 16: Circuito equivalente da segunda análise no software LTspice.....	40
Figura 17: Circuito equivalente do acoplamento capacitivo no software LTspice.....	41
Figura 18: Modelagem do dispositivo com condutor próximo no software Maxwell.....	42
Figura 19: Campo magnético gerado pelo condutor externo ao instrumento.....	42
Figura 20: Comportamento da densidade de fluxo magnético da interferência externa.....	43
Figura 21: Circuito equivalente com interferência externa no software LTspice.....	45
Figura 22: Densidade de fluxo magnético com blindagem em Supermalloy.....	49
Figura 23: Densidade de fluxo magnético com blindagem em MuMetal.....	50
Figura 24: Densidade de fluxo magnético com blindagem em Níquel.....	51

Figura 25: Campo magnético gerado no instrumento com a blindagem projetada. ....	52
Figura 26: Circuito equivalente com interferência e blindagem no software LTspice. ....	53
Figura 27: Tensão induzida nos terminais de uma das bobinas. ....	54
Figura 28: Tensão induzida nos terminais de duas bobinas adjacentes.....	55
Figura 29: Correntes parasitas decorrentes do acoplamento capacitivo.....	56
Figura 30: Tensão induzida na saída da bobina sem a blindagem.....	57
Figura 31: Tensão induzida na saída da bobina com a blindagem. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz de indutâncias.....	36
Tabela 2: Matriz de indutâncias do dispositivo em operação normal com uma bobina.....	37
Tabela 3: Matriz de indutâncias do dispositivo em operação normal com duas bobinas.....	39
Tabela 4: Matriz de indutâncias do dispositivo com interferências externas.....	44
Tabela 5: Materiais e suas propriedades eletromagnéticas.....	46
Tabela 6: Profundidade pelicular dos materiais em 60 Hz.....	47
Tabela 7: Espessura da blindagem para obtenção de eficácia da blindagem de 100 dB.....	48
Tabela 8: Comparação entre o fluxo incidente na blindagem e saturação do material.....	51
Tabela 9: Matriz de indutâncias do dispositivo com interferências externas e blindagem.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEE - Associação Atlética Acadêmica da Escola de Engenharia

RMS - *Root mean square*

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}$  - Indução magnética ou densidade de fluxo magnético;

$B_0$  - Densidade de fluxo magnético incidente antes da blindagem;

$B_1$  - Densidade de fluxo magnético incidente depois da blindagem;

$B_r$  - Magnetismo residual;

$\vec{D}$  - Deslocamento elétrico ou densidade de fluxo elétrico;

$\vec{E}$  - Campo elétrico;

$E_0$  - Campo elétrico incidente antes da blindagem;

$E_1$  - Campo elétrico incidente depois da blindagem;

$\vec{H}$  - Campo magnético;

$H_0$  - Campo magnético incidente antes da blindagem;

$H_1$  - Campo magnético incidente depois da blindagem;

$H_c$  - Campo coercivo;

$I_1$  - Corrente elétrica do condutor acoplado à bobina;

$I_2$  - Corrente elétrica da bobina acoplada ao condutor;

$L_1$  - Autoindutância do condutor acoplado à bobina;

$L_2$  - Autoindutância da bobina acoplada ao condutor;

$M_{12}$  - Indutância mútua do condutor acoplado à bobina;

$M_{21}$  - Indutância mútua da bobina acoplada ao condutor;

$N_1$  - Número de espiras do condutor acoplado à bobina;

$N_2$  - Número de espiras da bobina acoplada ao condutor;

$V_1$  - Potencial elétrico do condutor acoplado à bobina;

$v_L$  - Tensão induzida na bobina;

$\eta_1$  - Impedância intrínseca do meio 1;

$\eta_2$  – Impedância intrínseca do meio 2;

$\mu_0$  - Permeabilidade magnética no vácuo;

$\mu_r$  - Permeabilidade relativa;

$\varphi_c$  - Fluxo magnético concatenado;

$I$  - Corrente elétrica;

$J$  - Densidade de corrente elétrica de condução;

$L$  - Autoindutância;

$M$  - Fator de correção de múltiplas reflexões da blindagem;

$M$  - Indutância mútua;

$N$  - Número de espiras;

$PA$  - Perdas por absorção na blindagem;

$PR$  - Perdas por reflexão na blindagem;

$S$  - Eficácia da blindagem;

$d$  - Espessura da blindagem;

$f$  - Frequência;

$k$  - Coeficiente de acoplamento magnético entre o condutor e a bobina;

$m$  - Constante dependente das características construtivas do instrumento;

$r$  - Raio ou ponto do condutor até outro ponto aonde se deseja calcular o campo magnético;

$t$  - Tempo;

$\delta$  - Profundidade pelicular;

$\varepsilon$  - Força eletromotriz;

$\mu$  - Permeabilidade magnética;

$\rho$  - Densidade de carga elétrica;

$\sigma$  - Condutividade elétrica.

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os principais estudos realizados relacionados à medição de tensão e corrente de forma não invasiva são focados no monitoramento do consumo de energia e do fator de potência. A maioria dos sensores estudados são adequados para medição de cabos com apenas um condutor, no entanto, nas indústrias é comum a utilização de cabos multicondutores.

A principal vantagem da técnica de medição não invasiva remete à possibilidade de sua realização ocorrer sem a necessidade da remoção do isolamento dos condutores. Desta forma, os sensores têm baixo custo de instalação, visto que não necessitam do desligamento da energia elétrica do sistema (LAWRENCE, 2016).

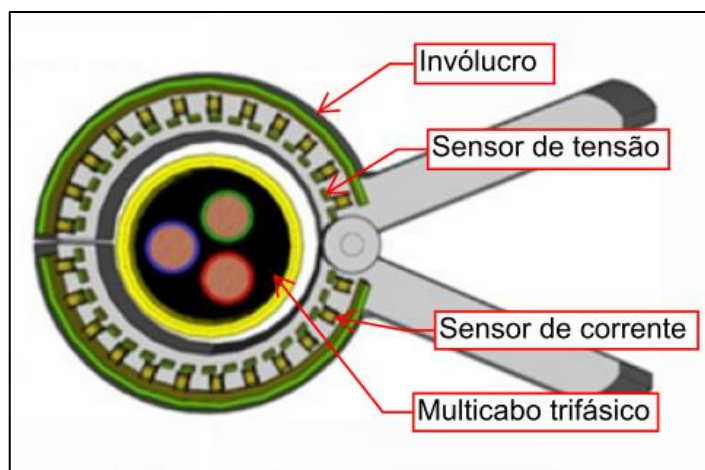
Segundo Lawrence (2016), na maioria dos casos, ainda é necessário que se tenha o conhecimento da geometria do cabo e dos sensores para determinar com precisão a reconstrução da tensão e corrente aferida pelos sensores eletromagnéticos. No entanto, existem técnicas de calibração que utilizam cargas de referência que permitem o uso de sensores sem contato, fazendo com que não haja a necessidade do conhecimento prévio da geometria do condutor.

Este trabalho descreve a modelagem e análise de acoplamentos eletromagnéticos em um instrumento de medição de tensão e corrente sem contato e posterior análise de diferentes materiais para a blindagem do mesmo. O dispositivo apresentado foi projetado de forma a realizar a medição dos sinais de tensão e corrente a partir do campo elétrico e magnético gerado por cabos multicondutores (CROVATO, 2018). O foco do estudo e análise neste trabalho, porém, será no sensoriamento da corrente.

O sistema para medição do dispositivo estudado é composto por duas partes, o dispositivo de sensoriamento e o dispositivo de calibração. O dispositivo de sensoriamento possui um arranjo de sensores de corrente e tensão como mostrado na Figura 1.



**Figura 1:** Arranjo dos sensores do medidor de energia remoto.



Fonte: o autor.

O sensoriamento do sinal da corrente variável no tempo é realizado através do campo magnético gerado ao seu redor. Cada corrente circulante nos condutores, será responsável pela criação de um fluxo magnético que será medido pelas bobinas, influenciado pelas distâncias entre os componentes do dispositivo.

O princípio de funcionamento do dispositivo foi baseado na lei de Faraday. Conforme a Equação 1, a tensão induzida nos terminais de uma bobina ( $v_L$ ) pode ser expressa matematicamente de uma forma simplificada através do seu número de espiras ( $N$ ) e o fluxo concatenado pela corrente do condutor ( $\varphi_c$ ).

$$v_L = -N \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (1)$$

Ressalta-se, no entanto, que a expressão mostrada na Equação 1 é uma simplificação do problema, visto que em um modelo real seriam consideradas as equações de Maxwell, que serão mostradas posteriormente na seção 2.1.1. Essa simplificação pode acarretar inclusive na inviabilização técnica das medições, visto que ao medir cargas equilibradas a saída tende a ser zero, de forma que efeitos desconsiderados inicialmente, possam ter influência nos resultados obtidos na ordem do próprio sinal de interesse. Observa-se ainda que o foco desse trabalho se concentra no projeto da blindagem de sinais espúrios (interferentes) e que o sistema de medida em si, encontra-se em desenvolvimento e ainda não foi validado.

Como não é possível determinar o fluxo original concatenado pela bobina, assume-se que a tensão induzida é proporcional à derivada da corrente que passa pelo condutor ( $i$ ), por uma constante ( $m$ ) dependente da geometria do problema e de questões construtivas do instrumento, conforme mostrado na Equação 2.

$$v_L = m \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Cada bobina, de forma genérica, apresenta em seus terminais uma tensão induzida em função das derivadas das correntes circulantes em cada um dos condutores do cabo, responsável pela geração de campos magnéticos variantes, obedecendo a soma ponderada mostrada na Equação 3.

$$v_L = m_1 \frac{di_1}{dt} + m_2 \frac{di_2}{dt} + m_3 \frac{di_3}{dt} \quad (3)$$

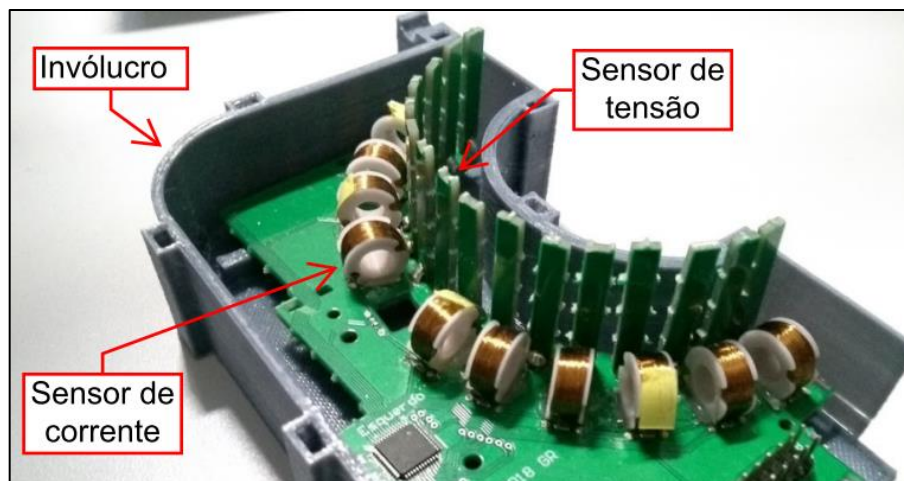
Reorganizando as equações das bobinas do arranjo em quadratura na forma matricial, tem-se a representação mostrada na Equação 4.

$$\begin{bmatrix} v_{L1} \\ v_{L2} \\ v_{L3} \\ \dots \\ v_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{1n} & m_{2n} & m_{3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ di_3/dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

As constantes  $m$  podem ser determinadas por meio de ensaios prévios, para cada uma das condições geométricas em que o cabo se encontra dentro do dispositivo. No entanto, a quantidade de cobre do cabo deforma o campo magnético podendo provocar desvios quando utilizados cabos com diferentes seções. Desta forma, destaca-se a importância da utilização de um dispositivo de calibração em campo para que se possa gerar padrões de corrente nos cabos, de forma a determinar a matriz de constantes  $m$ .

A precisão da reconstrução dos sinais de corrente dos condutores está relacionada com o número de sensores de corrente presentes no instrumento. Quanto mais sensores posicionados na região ao redor do cabo, melhor será a precisão da reconstrução do sinal medido. O dispositivo analisado possui um arranjo com 24 bobinas dispostas em formato circular. Na Figura 2 é possível verificar uma parte do instrumento fabricado.

**Figura 2:** Arranjo de bobinas responsáveis pelo acoplamento magnético.



Fonte: o autor.

A corrente de cada um dos cabos condutores irá criar um fluxo magnético que será concatenado com as bobinas, gerando 24 sinais de tensão induzida. Entretanto, por realizar a medição de condutores trifásicos, a tensão induzida nos terminais das bobinas é muito baixa e consequentemente os sinais de corrente do dispositivo sofrem com interferências eletromagnéticas.

A prevenção de interferências eletromagnéticas em dispositivos de instrumentação tem grande relevância devido à quantidade de fontes potenciais de interferências no meio industrial. Linhas de energia, sinais de rádio, máquinas e outros equipamentos geram interferências uns nos outros em função das elevadas intensidades de campos eletromagnéticos gerados.

## 1.1 Motivação

A supressão de interferências em blocos analógicos de instrumentação e automação é de extrema importância para o controle de sistemas, visto que um processo mal instrumentado pode vir a se tornar um problema até mesmo com os melhores instrumentos e hardwares de aquisição de sinais.

O protótipo fabricado do medidor remoto de energia disponível em laboratório não realiza a aquisição dos dados de corrente e tensão de maneira adequada, em vista das interferências de campos eletromagnéticos externos, de modo que se faça o estudo de um sistema de blindagem de forma a atenuar estes campos.

## 1.2 Objetivo

Visando proporcionar uma melhor qualidade dos sinais de corrente adquiridos pelo dispositivo medidor de energia remoto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma blindagem para interferências eletromagnéticas nas medidas de corrente feitas pelas bobinas dispostas em torno dos condutores. O objetivo da blindagem é atenuar a interferência de campos magnéticos externos oriundos de cabos próximos ao dispositivo nos sinais de corrente.

## 1.3 Estrutura do trabalho

A realização do projeto consiste, em um primeiro momento, apresentar uma breve revisão de alguns tópicos acerca das Equações de Maxwell e de técnicas de blindagem de campos eletromagnéticos, de forma a assimilar de uma forma mais clara o princípio de funcionamento do dispositivo e determinar a origem das fontes de interferências eletromagnéticas no instrumento, assim como realizar sua atenuação.

Na etapa subsequente, o protótipo será modelado em software de elementos finitos, a fim de realizar um estudo mais aprofundado da incidência do campo magnético no interior do instrumento e dos acoplamentos presentes entre os componentes do dispositivo, de forma a determinar as prováveis fontes de interferências eletromagnéticas.

Na etapa seguinte, serão estudadas e implementadas as formas mais utilizadas para blindagem de campos eletromagnéticos para que em seguida seja realizada a simulação do novo protótipo para o medidor a fim de verificar o comportamento do equipamento com uma blindagem que envolva o sensor, a fim de atenuar interferências de campos magnéticos externos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conceitos aplicáveis ao presente estudo se relacionam às propriedades fundamentais do eletromagnetismo e blindagem eletromagnética. Nas seções a seguir serão descritos alguns conceitos básicos utilizados neste trabalho de conclusão de curso.

### 2.1 Eletromagnetismo

Oersted foi um dos pioneiros nos estudos de campos eletromagnéticos, ao observar que, ao posicionar um condutor com cargas elétricas se movimentando próximo a uma agulha, a mesma sofria uma deflexão em relação a sua posição original, provando que cargas elétricas em movimento podem gerar campo magnético. Este fato desencadeou uma série de estudos que permitiram a união, posteriormente, em uma só teoria, da eletricidade e do magnetismo.

#### 2.1.1 Equações de Maxwell

Baseando-se nos estudos de Faraday, Maxwell unificou todos os fenômenos elétricos e magnéticos observáveis em um trabalho que estabeleceu conexões entre as várias teorias da época. Com essa nova teoria, Maxwell demonstrou que todos os fenômenos elétricos e magnéticos poderiam ser descritos em apenas quatro equações.

Segundo Ramo (1994), o campo eletromagnético está associado a cargas elétricas discretas que podem estar ou não em movimento, sendo definido por quatro vetores que são função das coordenadas  $(x, y, z)$  do ponto no espaço e do tempo. São eles o campo elétrico ( $\vec{E}$ ), o campo magnético ( $\vec{H}$ ), o deslocamento elétrico ou densidade de fluxo elétrico ( $\vec{D}$ ) e a indução magnética ou densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ).

As equações de Maxwell para o eletromagnetismo constam da unificação entre as Leis de Gauss para a eletricidade e para o magnetismo, a Lei de Ampère e a Lei de Faraday para a indução eletromagnética. As quatro equações de Maxwell podem ser divididas em dois grupos de duas equações que serão mostrados a seguir

O primeiro grupo de equações estabelece a relação entre o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e o campo magnético ( $\vec{H}$ ). Sob a forma diferencial, as duas equações em meios contínuos e na ausência de campos aplicados podem ser definidas pelas Equações 5 e 6 (RAMO, 1994).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6)$$

A Equação 5, conhecida como Lei de Faraday ou lei da indução eletromagnética, estabelece que a variação do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) acarreta em uma variação no vetor de densidade de campo magnético ( $\vec{B}$ ). Em outras palavras, a variação temporal do campo magnético induz um campo elétrico de natureza solenoidal, cujas linhas devem ser fechadas.

A Equação 6, conhecida como Lei de Ampère-Maxwell, mostra que um campo magnético ( $\vec{H}$ ) de natureza solenoidal, cujas linhas são fechadas, pode ser produzido tanto pela densidade de corrente elétrica de condução ( $J$ ), que constitui-se de cargas em movimento, quanto pela densidade de corrente de deslocamento, que representa a taxa de variação temporal do vetor de deslocamento elétrico ( $\vec{D}$ ). Deste modo, conclui-se que tanto as cargas em movimento quanto a variação temporal do campo elétrico podem gerar um campo magnético de natureza solenoidal, cujas linhas devem ser fechadas.

O segundo grupo de equações define as informações do meio, que também são conhecidas como equações constitutivas. Desta forma, em consequência das Equações 5 e 6 e tomando como válida a hipótese de conservação de carga, obtém-se as outras duas equações de Maxwell, mostradas nas Equações 7 e 8 (RAMO, 1994).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (8)$$

A Equação 7, conhecida como Lei de Gauss-Coulomb, define que as cargas elétricas, distribuídas com uma densidade  $\rho$  são a origem do deslocamento elétrico ( $\vec{D}$ ), ou seja, as linhas de campo elétrico nascem (divergem) nas regiões que contém densidade de cargas positivas e terminam (convergem) nas regiões de densidade de cargas negativas.

A Equação 8, conhecida como Lei de Gauss magnética ou lei da ausência do monopolo magnético, define que a divergência do vetor densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ) é exatamente igual a zero. Em outras palavras, não existe monopolo magnético (ou carga magnética) e, portanto, a densidade de suas linhas de força por um determinado volume representa usualmente caminhos fechados.

### 2.1.2 Permeabilidade magnética

Segundo Bastos (1992), a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) de um meio expressa sua capacidade de suscetibilidade à passagem de fluxo magnético, podendo ser expressa matematicamente pela relação entre o campo magnético ( $\vec{H}$ ) e a densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ), conforme a Equação 9.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (9)$$

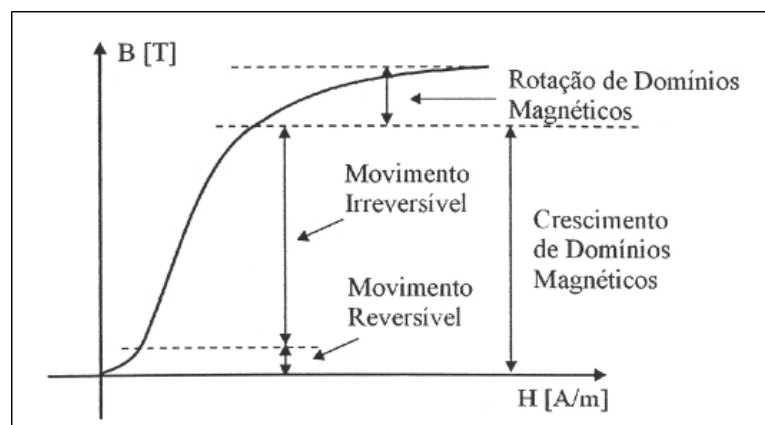
Para o vácuo, tem-se que a permeabilidade magnética é uma constante  $\mu_0$  com valor de  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ . A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) não é em geral uma constante, pois a densidade de fluxo magnético não é uma função linear do campo magnético para alguns materiais. Desta forma, mais importante que o valor da permeabilidade, constitui-se a representação usual da relação dada pela Equação 9 fornecida através da curva de magnetização dos materiais.

### 2.1.3 Curva de Magnetização

As propriedades de materiais ferromagnéticos e suas ligas são representadas geralmente por meio de curvas de magnetização. A curva de magnetização é apresentada relacionando o campo magnético e a densidade de fluxo magnético. A curva é iniciada no estado de desmagnetização, onde o campo magnético é zero. Elevando-se a intensidade de campo gradativamente, nota-se que uma elevação do campo magnético não traz mais uma elevação da densidade do fluxo magnético. Esse é o estado de saturação em que, apesar de elevarmos a corrente, não haverá disponibilidade de maior indução magnética (ROCHA, 2005).

Na Figura 3 é apresentada uma curva típica de magnetização.

**Figura 3:** Exemplo de curva de magnetização.



Fonte: (LEITE, 2002).

### 2.1.4 Saturação magnética

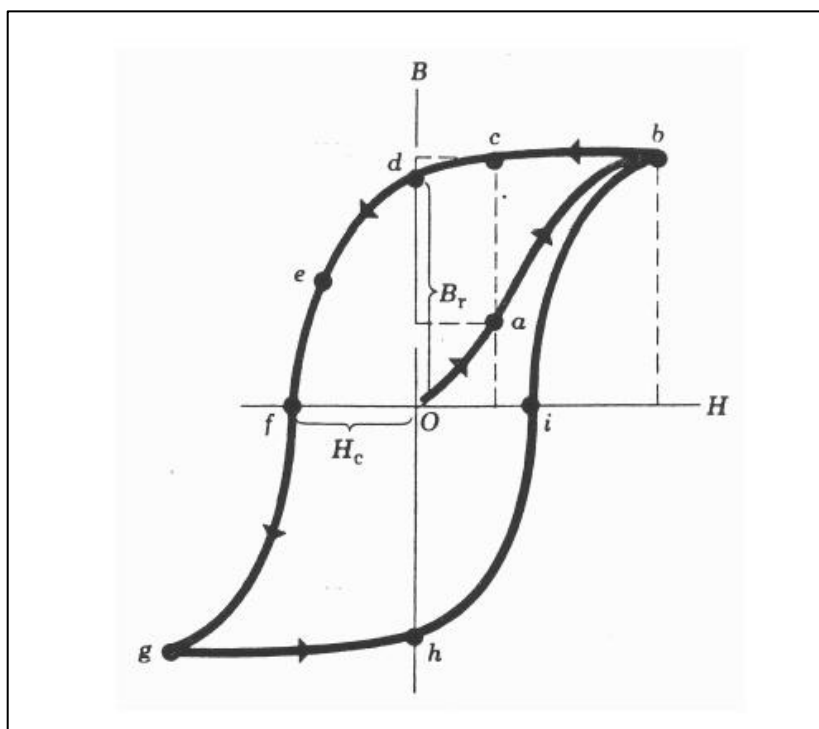
A saturação magnética de um material é o estado alcançado quando um aumento na aplicação externa de um campo magnético não pode mais aumentar a magnetização do material, de modo que a indução magnética seja limitada. O ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de “ciclo de histerese” (PLONUS, 1978).

A saturação é mais claramente vista na curva de magnetização do material. À medida que o campo magnético aumenta, a indução magnética aproxima-se de um valor máximo. Uma vez atingido o estado de saturação, diminui-se a tensão no circuito em análise para tentar desmagnetizar o material. Ao realizar a desmagnetização, observa-se que os valores da indução magnética não coincidem com os valores iniciais da curva.

Chegando-se ao campo magnético igual a zero, não se tem uma indução magnética igual a zero. O valor para o qual a indução magnética é zero será obtido para um valor negativo de campo magnético. Repetindo-se o processo com valores de campo magnético na orientação contrária, obtém-se uma repetição do fenômeno, formando-se o denominado laço de histerese.

Na Figura 4 é ilustrada a curva completa de histerese para um material ferromagnético genérico.

**Figura 4:** Ciclo de histerese.



Fonte: (SEARS, 1984).



O campo de indução magnética que permanece depois que o material foi magnetizado até a saturação e, em seguida o campo magnético reduzido a zero, é chamado de magnetismo residual ( $B_r$ ). O campo magnético reverso necessário para reduzir a indução magnética a zero, é chamado de campo coercivo ( $H_c$ ). Desta forma, pode-se afirmar que, o campo coercivo é o campo capaz de anular o magnetismo residual, ou seja, desmagnetizar completamente o material (ROCHA, 2005).

Uma das consequências significativa do fenômeno de histerese é a dissipação de energia em materiais ferromagnéticos, cada vez que forem levados a percorrer seu ciclo de histerese.

### 2.1.5 Acoplamento capacitivo

O acoplamento capacitivo é definido como a interação do campo elétrico entre condutores. O efeito de capacitância que surge entre dois corpos com cargas elétricas separadas por um dielétrico é denominado capacitância mútua. O nível de interferência deste tipo de acoplamento depende da variação do potencial elétrico e o valor da capacitância de acoplamento entre os condutores.

### 2.1.6 Acoplamento magnético

O acoplamento magnético é representado pela interação do campo magnético entre condutores. Neste caso, a interferência depende da variação da corrente e da indutância mútua do acoplamento e da distância entre os condutores.

Seja um condutor, com potencial elétrico  $V_1$ , corrente elétrica  $I_1$  e coeficiente de autoindutância  $L_1$ , acoplado magneticamente a uma bobina constituída por  $N_2$  espiras e autoindutância  $L_2$ . Os terminais da bobina encontram-se em aberto, de forma que a corrente e o fluxo magnético na bobina são nulos.

Substituindo os valores deste acoplamento na Lei de Faraday, demonstrada na Equação 1, e expressando o potencial elétrico em função da corrente no condutor e seu respectivo coeficiente de autoindutância, tem-se a Equação 10.

$$V_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad (10)$$

A Lei de Faraday estabelece que a tensão induzida nos terminais da bobina pode ser representada pelo fluxo magnético induzido pelo condutor. O fluxo magnético induzido pode

ser expresso através da corrente do condutor e pela indutância mútua entre o condutor e a bobina ( $M_{12}$ ), conforme a Equação 11.

$$V_{IND} = M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (11)$$

Desta forma, pode-se representar o coeficiente de indutância mútua entre o condutor e a bobina conforme a Equação 12.

$$M_{12} = k \frac{N_2}{N_1} L_1 \quad (12)$$

Realizando a análise para o caso contrário, obtém-se a relação demonstrada na Equação 13.

$$M_{21} = k \frac{N_1}{N_2} L_2 \quad (13)$$

A igualdade entre os coeficientes de indutância mútua das Equações 12 e 13 permite obter a relação para obtenção do coeficiente de acoplamento magnético ( $k$ ), demonstrado na Equação 14.

$$M = M_{12} = M_{21} = k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (14)$$

## 2.2 Blindagem magnética

Conforme a Equação 8, ou lei da ausência de monopolo magnético, demonstrou-se que é impossível separar polos magnéticos, de forma com que não seja possível a anulação completa do campo magnético. No entanto, é possível realizar uma atenuação das interferências eletromagnéticas, conforme é proposto por Ott (1988), através de uma blindagem física entre dois ambientes que controla a propagação de campos elétricos e magnéticos.

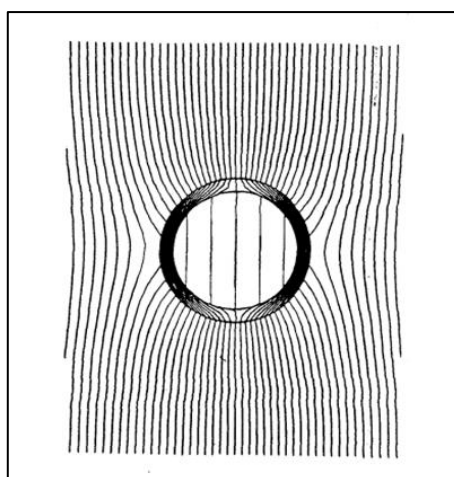
A blindagem irá permitir que as linhas de campo terminem nos polos opostos, mas por uma rota diferente. Essas blindagens podem ser projetadas com materiais ferromagnéticos e/ou condutores (SOUZA, 2018).

Segundo Kalafala (1993), os materiais ferromagnéticos possuem alta permeabilidade magnética e são eficazes para contenção do campo magnético para correntes contínuas e correntes alternadas. Isto se dá, pois, estes materiais fornecem um caminho de baixa relutância, desviando as linhas de fluxo a partir da região de interesse.

Ao adotar um material ferromagnético para blindagens de campo magnético oriundo de correntes alternadas, deve-se levar em consideração a saturação eletromagnética do material, que diminui substancialmente a sua capacidade de blindagem (YICHAO, 2007). Cada material possui uma permeabilidade máxima ao fluxo magnético e, uma vez atingido este valor, o material perde suas características ferromagnéticas para o fluxo excedente.

Segundo Souza (2018), em blindagens com materiais ferromagnéticos, o mecanismo predominante consiste no confinamento das linhas de campo pela baixa relutância do material, conforme mostrado na Figura 5.

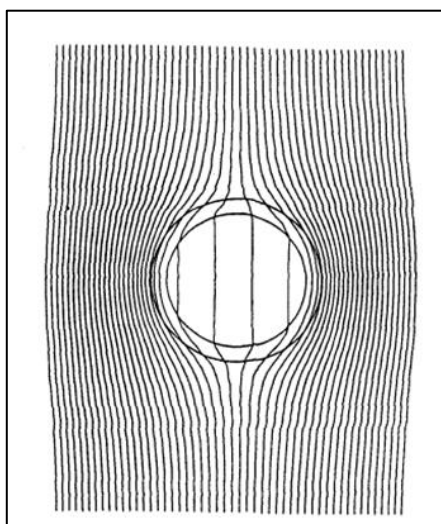
**Figura 5:** Blindagem com material ferromagnético.



Fonte: (SALINAS, 2003).

Segundo Souza (2018), em blindagens com materiais condutores o campo magnético é repellido pelas correntes parasitas induzidas no material, conforme mostrado na Figura 6.

**Figura 6:** Blindagem com material condutor.



Fonte: (SALINAS, 2003).

Neste tipo de blindagem, as correntes criam um campo magnético alternado de orientação oposta no interior da blindagem. Este efeito aumenta com a frequência, resultando em uma blindagem bastante efetiva em altas frequências (BJÖRKLÖF, 1999). Este tipo de blindagem é comum em equipamentos de imagem por ressonância magnética, podendo ser fabricadas com alumínio ou cobre (SOUZA, 2018).

Wentworth (2008), ressalta também que, para obtenção de uma blindagem robusta, deve-se evitar pequenas imperfeições na superfície da fronteira entre o ar e a blindagem, visto que isso pode acarretar em um resultado negativo significativo na eficácia da blindagem.

### 2.2.1 Eficácia da blindagem

A eficácia de uma blindagem pode ser determinada em termos da redução de intensidade do campo eletromagnético, podendo variar de acordo com a frequência de onda submetida ao material (KLINKERBUSCH, 2005) e a geometria da blindagem (TOSAKA, 2005).

Ott (1988), Björklöf (1999), Wentworth (2008) e Menezes (2016) concordam que é possível realizar a atenuação de uma onda eletromagnética através de um meio com certas propriedades eletromagnéticas. Esta atenuação pode ser quantificada por um termo conhecido como eficácia total de blindagem, tendo contribuição de dois efeitos distintos, a absorção e a reflexão (GUAN, 2003).

Um terceiro efeito também é considerada para os cálculos da eficiência da blindagem, sendo ele o fator de correção para múltiplas reflexões, que considera a possibilidade de uma onda eletromagnética sofrer reflexão em ambas as faces da blindagem (WENTWORTH, 2008) (OTT, 1988) (GUAN, 2003). O somatório destes efeitos resulta na eficácia da blindagem ( $S$ ) em decibéis ( $dB$ ), mostrada na Equação 15.

$$S = PA + PR + M \quad (15)$$

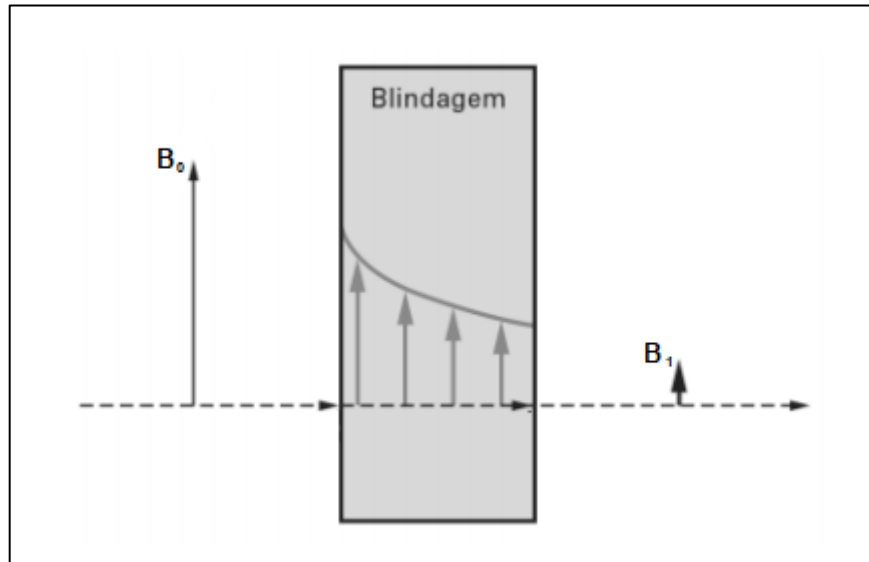
Ott (1988) sugere que a eficácia de uma blindagem para campos magnéticos pode ser definida também através das Equações 16 e 17, onde  $H_0$  e  $B_0$  são a intensidade do campo e fluxo magnéticos incidente antes da blindagem, respectivamente, e  $H_1$  e  $B_1$  são a intensidade do campo e fluxo magnéticos transmitidos que emergem do outro lado da blindagem, respectivamente.

$$S = 20 \cdot \log \frac{H_0}{H_1} \quad (16)$$

$$S = 20 \cdot \log \frac{B_0}{B_1} \quad (17)$$

A Figura 7 ilustra o comportamento da onda transmitida através de uma blindagem.

**Figura 7:** Onda transmitida em blindagem eletromagnética.



Fonte: adaptado de Menezes (2016).

### 2.2.1.1 Perdas por absorção (PA)

A amplitude de uma onda eletromagnética que incide na superfície de um material tende a diminuir exponencialmente. Essa relação pode ser encontrada relacionando a amplitude do campo magnético antes e depois da incidência da blindagem de espessura  $d$ , conforme a Equação 18 (OTT, 1988).

$$B_1 = B_0 e^{-d/\delta} \quad (18)$$

Onde  $\delta$  é chamado profundidade pelicular, que corresponde a distância a partir da borda do material onde a onda incidente é absorvida, podendo ser calculada através da frequência do meio ( $f$ ), a permeabilidade relativa do material ( $\mu$ ) e a condutividade do material ( $\sigma$ ), conforme a Equação 19 (OTT, 1988).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (19)$$

Segundo Menezes (2016), esta profundidade pelicular pode ser um indicador importante na escolha da espessura do material a ser utilizado em uma blindagem eletromagnética, visto que a utilização de material em excesso acarreta em custos desnecessários de projeto.

Conforme a Equação 19, observa-se que materiais com alta permeabilidade e alta condutividade terão profundidade pelicular menor, podendo oferecer grande absorção com pequenas espessuras.

Substituindo a Equação 18 na Equação 17, tem-se que a contribuição das perdas por absorção ( $PA$ ) no cálculo da eficácia total da blindagem pode ser descrita através da Equação 20, onde  $d$  é a espessura do material da blindagem.

$$PA = 8,69 \left( \frac{d}{\delta} \right) \quad (20)$$

### 2.2.1.2 Perdas por reflexão (PR)

Perdas por reflexão ocorrem quando a impedância de um meio onde o campo se propaga é muito diferente da impedância da blindagem. Na passagem de um meio para o outro há uma redução na transferência de energia do campo na proporção da diferença entre as impedâncias.

Segundo Ribeiro (2004), em sua abordagem sobre as perdas por reflexão entre dois meios distintos, a reflexão sofrida por um campo que se propaga em um meio com impedância intrínseca  $\eta_1$  e incide em um meio com impedância intrínseca  $\eta_2$ , considerando uma incidência normal com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , pode ser estimada através das Equações 21 e 22. Onde  $H_0$  e  $E_0$  são as intensidades do campo magnético e elétrico incidentes na blindagem, respectivamente, e  $H_1$  e  $E_1$  são as parcelas de campo magnético e elétrico incidentes transmitida para o segundo meio, respectivamente.

$$H_1 = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} H_0 \quad (21)$$

$$E_1 = \frac{2\eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_0 \quad (22)$$

Embora as expressões para as perdas por reflexão sejam proporcionais para campos elétricos e magnéticos, existe uma diferença entre ambos. Caso a impedância do primeiro meio seja muito maior que a do segundo meio ( $\eta_1 \gg \eta_2$ ), como no caso do ar com algum material condutor, observa-se através da Equação 22 que campos elétricos tem grande potencial de reflexão no primeiro limite entre os dois meios. Desta forma, é possível afirmar que materiais condutores apresentam uma reflexão significativa para campo elétrico.

O mesmo caso analisado para o campo magnético, com base na Equação 21, não haveria grande potencial de reflexão no primeiro limite entre os dois meios, mas sim no segundo limite

entre estes meios, de forma com que a blindagem de campo magnético seja mais efetiva utilizando-se os efeitos de absorção (GUAN, 2003) (SINDURA, 2011).

### **2.2.1.3 Fator de correção de múltiplas reflexões (M)**

Quando as perdas por absorção da blindagem são baixas, menores que 10 dB, uma fração significativa de energia é refletida na segunda superfície da blindagem e, finalmente, atravessa a blindagem desprotegendo a área a ser blindada. Esta energia refletida é calculada através do fator de correção de múltiplas reflexões, conforme a Equação 23 (OTT, 1988).

$$M = 20. \log |1 - e^{-2d/\delta}| \quad (23)$$

### 3 DESENVOLVIMENTO

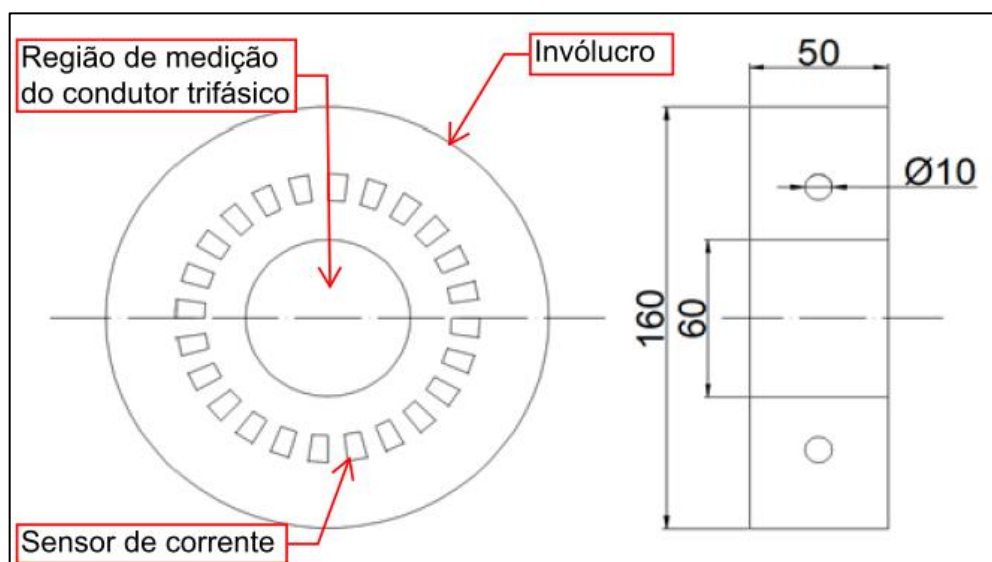
O desenvolvimento do projeto divide-se em duas partes. A primeira parte consiste na modelagem dos sensores e dos cabos no software de elementos finitos Ansoft Maxwell, versão 14, na forma tridimensional. Esta análise visa verificar o comportamento do campo magnético gerado pelos condutores no interior do instrumento e analisar os fenômenos do acoplamento magnético e capacitivo existentes, a fim de determinar a indutância e capacitância mútua entre os componentes e analisar as prováveis fontes de interferências eletromagnéticas no sinal de corrente do medidor.

A segunda parte do projeto refere-se à análise de diferentes materiais para atenuação de campos eletromagnéticos e projeto de uma blindagem para interferências eletromagnéticas nas medidas de corrente feitas pelas bobinas dispostas em torno dos condutores.

#### 3.1 Sensores de corrente

Para realizar a modelagem do protótipo, foram feitas as medições dos componentes do equipamento (bobinas e invólucro) e as distâncias entre eles. As medições foram realizadas com o auxílio de um paquímetro e as medidas foram arredondadas para o valor inteiro mais próximo. O desenho da vista frontal e o corte do dispositivo com as respectivas medidas são mostradas na Figura 8.

**Figura 8:** Vista frontal e corte do dispositivo (medidas em mm).



Fonte: o autor.



## 3.2 Simulação do protótipo

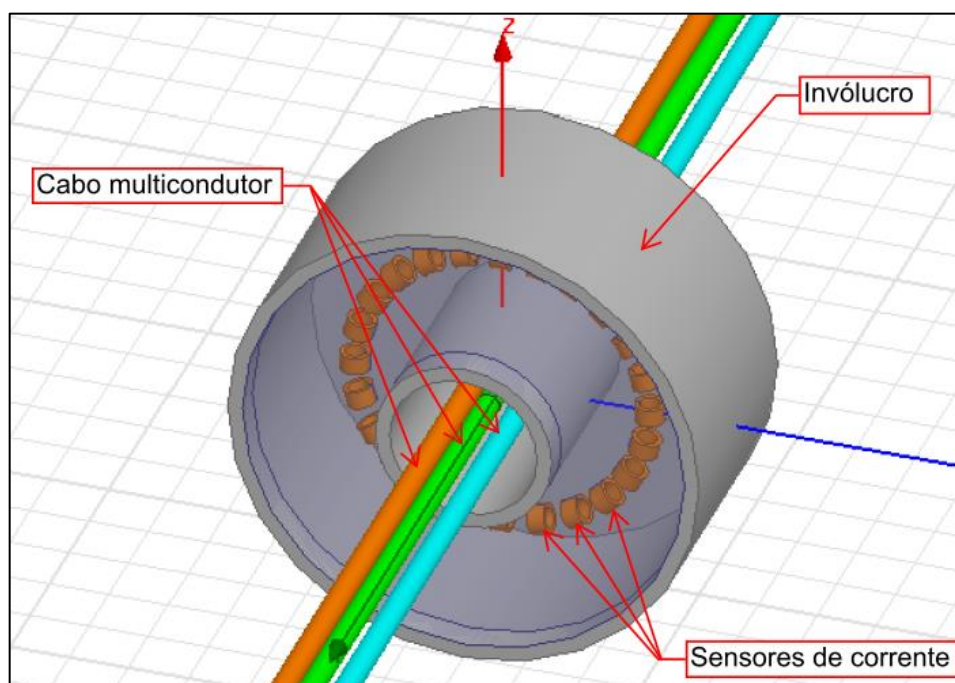
Depois de realizadas as medições, fez-se a modelagem dos componentes envolvidos no processo de medição dentro do dispositivo no software de elementos finitos, a fim de realizar as simulações necessárias para o projeto.

### 3.2.1 Simulação sem interferência externa com excitação de corrente

A primeira simulação do dispositivo foi realizada com a análise da influência da corrente elétrica que passa pelos condutores, a fim de determinar a incidência de campo magnético originada pelos condutores do cabo multicondutor localizado no centro do instrumento e o acoplamento magnético entre o cabo e os sensores de corrente.

O dispositivo modelado com as medidas mostradas na seção 3.1 é mostrado na Figura 9. Os condutores são representados nas cores verde, azul e laranja passando pela abertura central do instrumento e o arranjo com 24 bobinas são representadas na cor marrom.

**Figura 9:** Modelagem do dispositivo no software Maxwell.



Fonte: o autor.

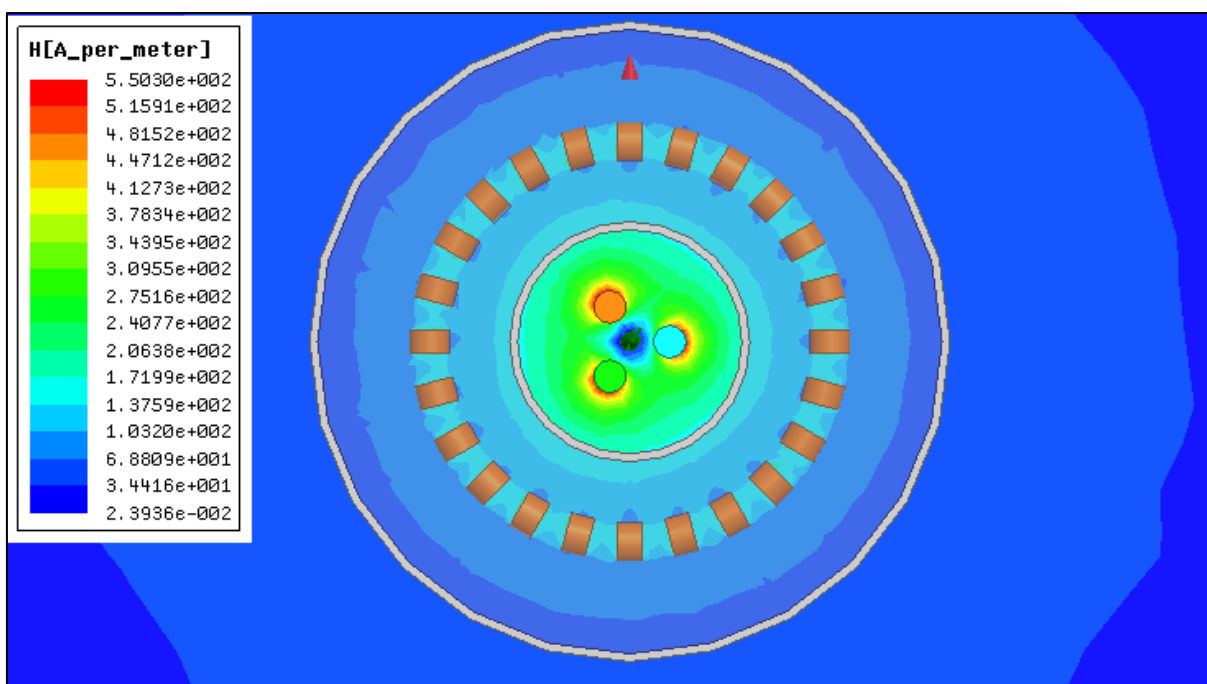
O cabo multicondutor e os sensores de corrente foram modelados em cobre, visto que foi o material utilizado na confecção das bobinas e é o material mais comumente utilizado em condutores. O invólucro do protótipo foi modelado em material não condutor, tal qual foi fabricado.

Nos condutores internos ao instrumento foram aplicadas correntes de 10 A, enquanto que nas bobinas foram aplicadas correntes dependentes da excitação dos condutores.

A fim de obter uma melhor precisão dos valores encontrados para a indutância mútua entre os componentes do dispositivo, determinaram-se a quantidade de espiras de cada um dos sensores no software. Cada uma das bobinas utilizadas como sensor de corrente no protótipo possui três mil espiras. Os condutores do cabo foram modelados como condutores retilíneos.

Com o dispositivo modelado, fez-se a análise da incidência do campo magnético gerado pelos três condutores presentes no interior do instrumento, a fim de determinar a intensidade do campo magnético incidente nas bobinas. Na Figura 10 é possível verificar a incidência do campo magnético no instrumento.

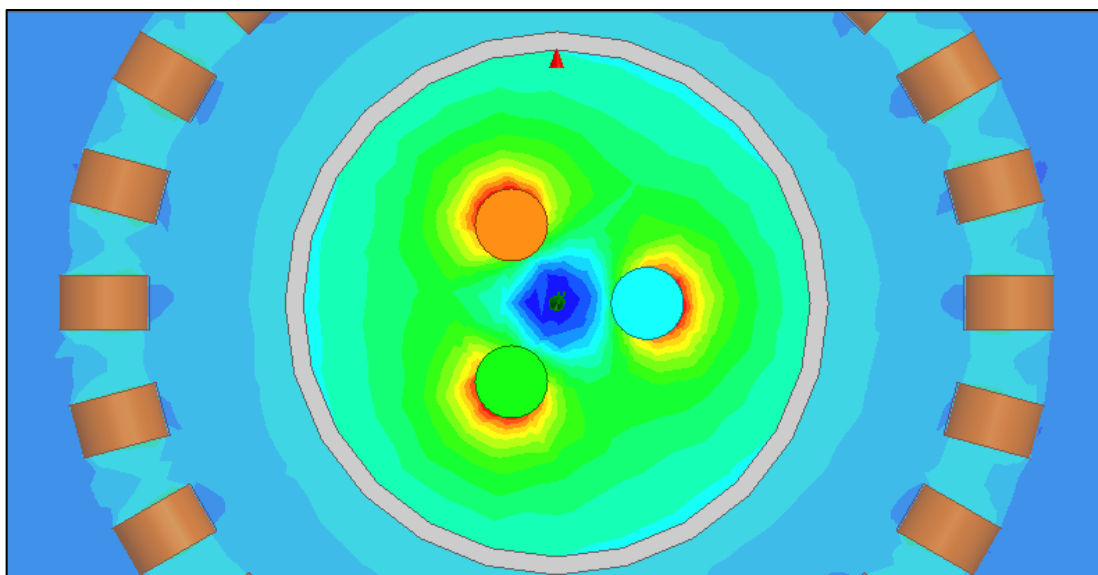
**Figura 10:** Campo magnético gerado pelos três condutores do cabo.



Fonte: o autor.

Aproximando a imagem é possível notar que, mais próximo do centro do instrumento, as linhas de campo magnético não são equipotenciais, conforme a Figura 11. No entanto, ao distanciar-se do centro do instrumento, o campo tende a equipotencializar até chegar aos sensores de corrente, conforme mostrado na Figura 10.

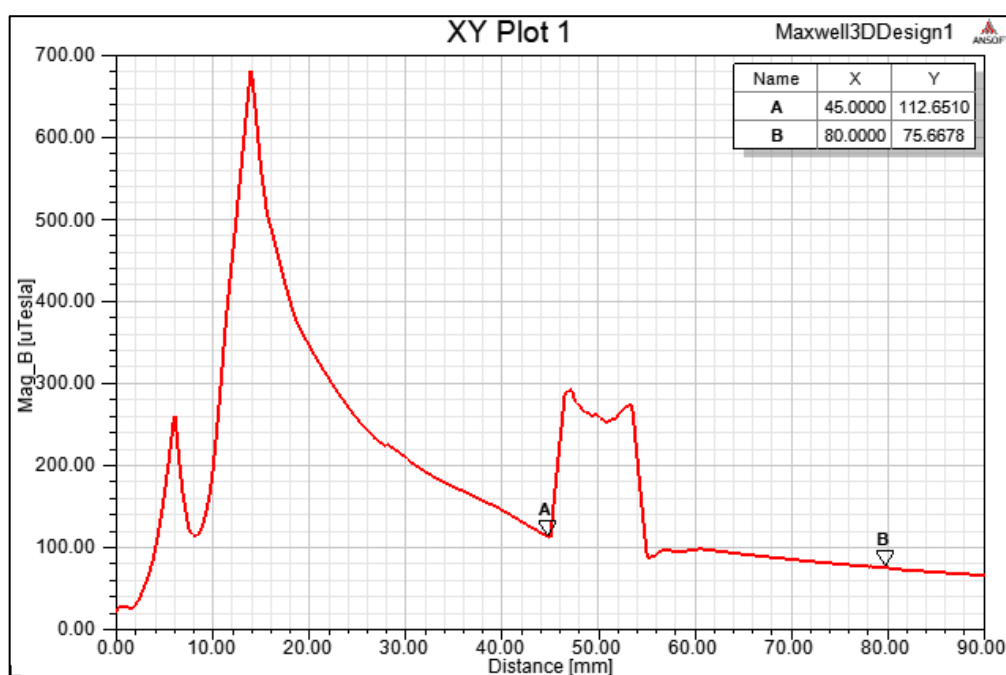
**Figura 11:** Aproximação do campo magnético gerado pelos três condutores.



Fonte: o autor.

Para determinar a densidade de fluxo magnético gerado pelos três condutores, foi traçada uma linha ao longo do eixo XY partindo do centro do instrumento até a extremidade do invólucro. A densidade de fluxo magnético que incide nas bobinas é de aproximadamente  $112,65 \mu T$ , conforme mostrado no ponto A na Figura 12. Também é possível notar que, sem a presença de interferências eletromagnéticas externas, a densidade de fluxo magnético no entorno do instrumento é de aproximadamente  $75,66 \mu T$ , no ponto B.

**Figura 12:** Comportamento da densidade de fluxo magnético sem interferência externa.



Fonte: o autor.

Para determinar o acoplamento presente entre os instrumentos, o software realiza a análise do dispositivo resultando em uma matriz com a autoindutância ( $L$ ) de todos os elementos e a indutância mútua ( $M$ ) entre todos os elementos, possibilitando a análise do dispositivo, conforme exemplo mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Matriz de indutâncias.

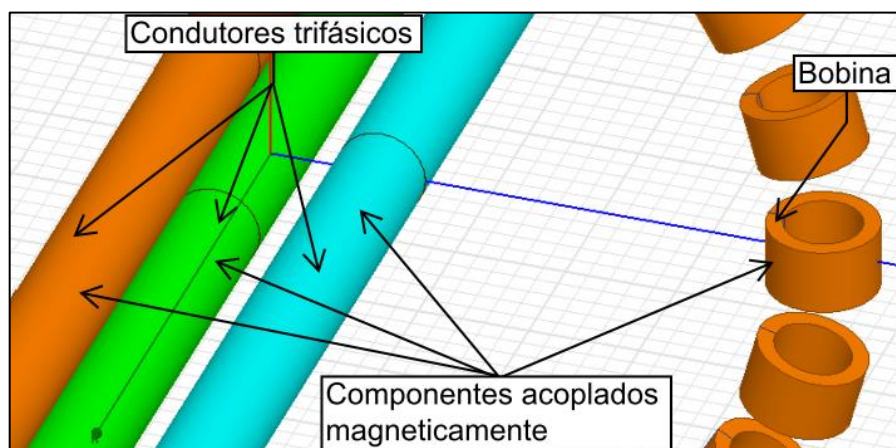
	Componente 1	Componente 2	...	Componente n
Componente 1	$L_1$	$M_{21}$	...	$M_{n1}$
Componente 2	$M_{12}$	$L_2$	...	$M_{n2}$
	...	...	...	...
Componente n	$M_{1n}$	$M_{2n}$	...	$L_n$

Onde os coeficientes  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_n$  representam a autoindutância dos componentes e os demais coeficientes  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{1n}$ ,  $M_{n1}$ ,  $M_{2n}$  e  $M_{n2}$  representam a indutância mútua entre os componentes.

### 3.2.1.1 Acoplamento magnético entre os condutores e a bobina

A primeira análise dos acoplamentos presentes no dispositivo se deu na tensão induzida nos terminais de uma das bobinas presentes no instrumento em decorrência do campo magnético gerado pelos condutores, sem a presença de interferências eletromagnéticas externas ao dispositivo de medição, conforme a Figura 13.

**Figura 13:** Condutores trifásicos e bobina acoplados magneticamente.



Fonte: o autor.

Foram observados os valores referentes ao acoplamento magnético dos condutores trifásicos com a bobina. Os valores da matriz de indutâncias para este caso podem ser vistos na Tabela 2.

**Tabela 2:** Matriz de indutâncias do dispositivo em operação normal com uma bobina.

	Fase A	Fase B	Fase C	Bobina
Fase A	1,03390 $\mu H$	0,68797 $\mu H$	0,68805 $\mu H$	0,57181 $\mu H$
Fase B	0,68797 $\mu H$	1,03380 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	0,80840 $\mu H$
Fase C	0,68805 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	1,03370 $\mu H$	0,64953 $\mu H$
Bobina	0,57181 $\mu H$	0,80840 $\mu H$	0,64953 $\mu H$	0,057311 H

A partir dos valores encontrados para o acoplamento magnético, pode-se determinar o coeficiente de acoplamento magnético deste sistema, utilizando-se a Equação 14.

$$k_{AB1} = 2,34905 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{BB1} = 3,32115 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{CB1} = 2,66859 \cdot 10^{-3}$$

Onde  $k_{AB1}$ ,  $k_{BB1}$  e  $k_{CB1}$  são os coeficientes de acoplamento magnético da bobina com os condutores nas fases A, B e C, respectivamente. Nota-se que, apesar dos condutores possuírem a mesma geometria, apresentam coeficientes de acoplamento diferentes. Isso se deve ao fato de que os três condutores estão em distâncias diferentes até a bobina.

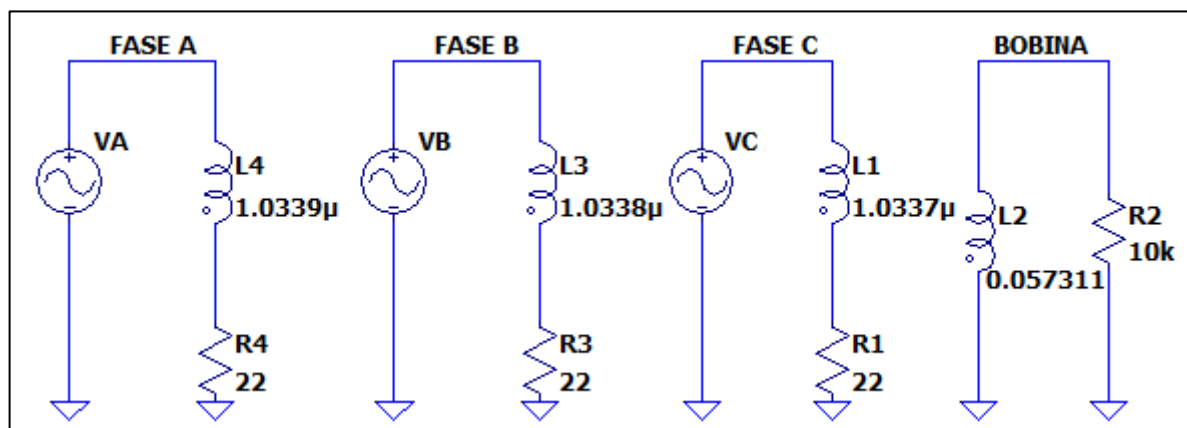
Com os valores dos coeficientes de acoplamento magnético calculados é possível substituir estes valores em um circuito elétrico equivalente, a fim de determinar a tensão induzida que deverá surgir nos terminais da bobina.

Para a análise do sistema foi utilizado o software LTspice. Os condutores trifásicos foram simulados por três fontes de tensão senoidais com amplitude de 220  $V_{RMS}$  e frequência de 60 Hz, defasadas em 120° entre si. Uma resistência de 22  $\Omega$  foi colocada no final do circuito de cada um dos condutores de forma a obter uma corrente de aproximadamente 10  $A_{RMS}$ .

Em seguida, acoplou-se a bobina aos três condutores, com os valores de acoplamento obtidos anteriormente. Uma resistência de 10 k $\Omega$  foi incluída nos terminais da bobina, equivalente a resistência de entrada do amplificador que integra o sinal de tensão induzida a

fim de determinar a corrente que circula nos condutores. O circuito elétrico analisado é mostrado na Figura 14.

**Figura 14:** Circuito equivalente do dispositivo operando em condição normal.



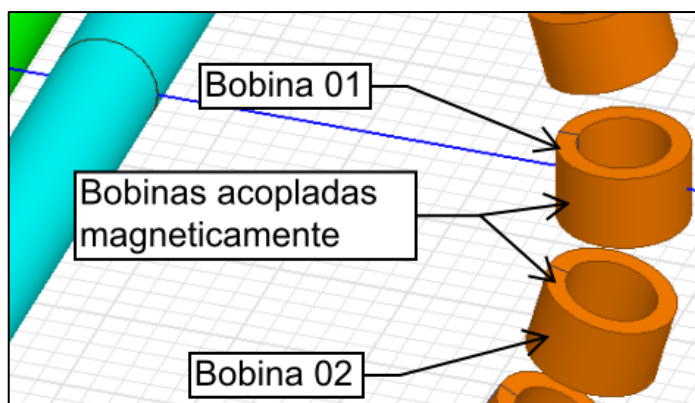
Fonte: o autor.

Os resultados encontrados para a tensão induzida nos terminais da bobina neste caso serão apresentados e debatidos na seção 4.1.

### 3.2.1.2 Acoplamento magnético entre as bobinas

Determinada a tensão induzida nos terminais de uma das bobinas para o caso normal de operação do dispositivo, buscou-se analisar as fontes de interferência presentes no dispositivo. A primeira fonte de interferência analisada se deu no efeito do acoplamento magnético entre as próprias bobinas, conforme demonstrado na Figura 15. Por serem materiais condutores, as bobinas se acoplam magneticamente umas às outras, de forma com que a interferência entre elas não possa ser desprezada.

**Figura 15:** Bobinas acopladas magneticamente.



Fonte: o autor.

Esta análise foi realizada ainda sem a presença de interferências externas, a fim de determinar apenas a influência do acoplamento magnético entre duas bobinas adjacentes presentes no dispositivo. O acoplamento magnético está presente entre todas as bobinas presentes no instrumento, no entanto, optou-se por analisar o efeito deste acoplamento em duas bobinas adjacentes, visto que o efeito e, portanto, a interferência oriunda deste acoplamento, será maior em relação aos demais casos. Foram observados os valores de acoplamento magnético entre os três condutores e duas das bobinas, conforme pode ser visto na Tabela 3.

**Tabela 3:** Matriz de indutâncias do dispositivo em operação normal com duas bobinas.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>	<b>Bobina 01</b>	<b>Bobina 02</b>
<b>Fase A</b>	1,03400 $\mu H$	0,68797 $\mu H$	0,68805 $\mu H$	0,65186 $\mu H$	0,68753 $\mu H$
<b>Fase B</b>	0,68797 $\mu H$	1,03420 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	0,80947 $\mu H$	0,76755 $\mu H$
<b>Fase C</b>	0,68805 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	1,03430 $\mu H$	0,57249 $\mu H$	0,56582 $\mu H$
<b>Bobina 01</b>	0,65186 $\mu H$	0,80947 $\mu H$	0,57249 $\mu H$	0,058451 H	0,001969 H
<b>Bobina 02</b>	0,68753 $\mu H$	0,76755 $\mu H$	0,56582 $\mu H$	0,001969 H	0,058224 H

A partir dos valores encontrados, pode-se determinar os coeficientes de acoplamento magnético deste sistema, conforme Equação 14.

$$k_{AB1} = 2,65153 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{BB1} = 3,28979 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{CB1} = 2,32656 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{AB2} = 2,80207 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{BB2} = 3,13197 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{CB2} = 2,30570 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{B1B2} = 33,7485 \cdot 10^{-3}$$

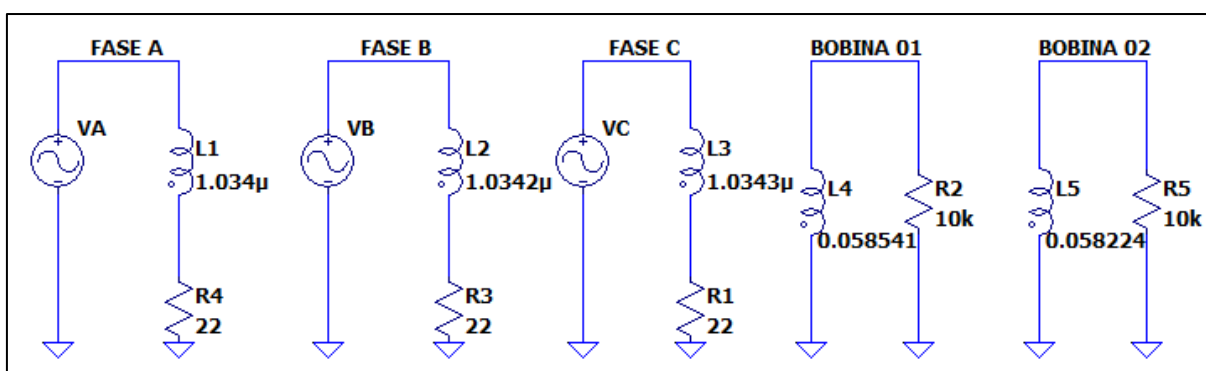
Onde  $k_{AB1}$ ,  $k_{BB1}$  e  $k_{CB1}$  são os coeficientes de acoplamento magnético da primeira bobina com os condutores nas fases A, B e C, respectivamente, e os coeficientes  $k_{AB2}$ ,  $k_{BB2}$  e  $k_{CB2}$  são os coeficientes de acoplamento magnético da segunda bobina com os condutores nas fases A, B e C, respectivamente. O coeficiente  $k_{B1B2}$  é o coeficiente de acoplamento magnético entre as duas bobinas adjacentes.

Neste caso, é possível notar que existe uma diferença no coeficiente de acoplamento magnético de cada condutor com as duas bobinas. Essa diferença é esperada, visto que os condutores não estão centralizados, de forma com que a distância entre o condutor e cada uma das bobinas seja diferente. Como já visto anteriormente, o valor da indutância mútua varia com a distância, de forma com que essa diferença possa ser explicada.

Nota-se também que o coeficiente de acoplamento magnético entre as bobinas é maior que o dos condutores trifásicos com as bobinas. Isso ocorre em decorrência da proximidade das bobinas uma das outras, o que torna a influência do campo magnético entre elas, maior.

Com os coeficientes de acoplamento obtidos, simula-se novamente o circuito elétrico equivalente no LTSpice, desta vez, com a inclusão da segunda bobina, conforme Figura 16.

**Figura 16:** Circuito equivalente da segunda análise no software LTSpice.



Fonte: o autor.

Os resultados encontrados para a tensão induzida nos terminais da bobina neste caso serão apresentados e debatidos na seção 4.2.

### 3.2.2 Simulação sem interferência externa com excitação de tensão

A segunda simulação do instrumento foi realizada com a análise da influência da tensão dos condutores, a fim de determinar o acoplamento capacitivo entre os condutores e o arranjo de bobinas através da matriz de capacitâncias entre os componentes do dispositivo, visto que a interação entre o campo elétrico dos condutores e dos sensores de corrente acarreta em capacitâncias parasitas no circuito.

Neste caso, serão analisadas apenas as capacitâncias parasitas dos condutores com os sensores de corrente, visto que as capacitâncias entre os próprios condutores não influenciam nos sinais de corrente das bobinas.

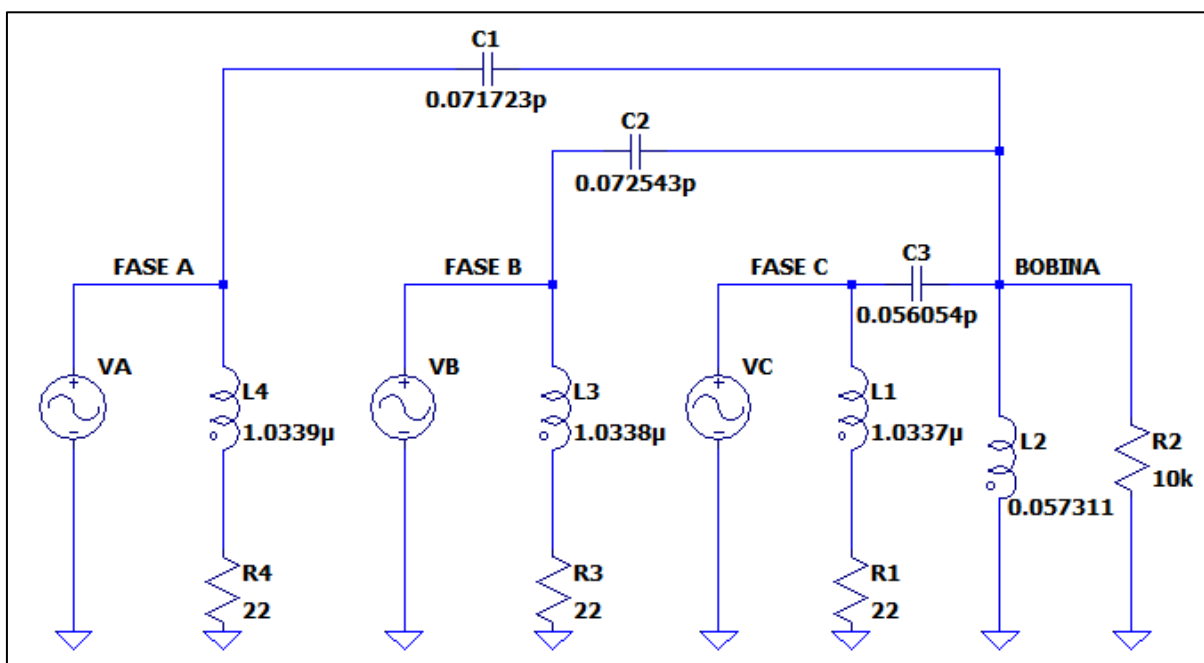
A simulação foi realizada no dispositivo já modelado no software, porém, as excitações de corrente foram substituídas por excitações de potencial elétrico. A partir da matriz obtida



serão realizadas as análises do efeito do acoplamento capacitivo na tensão induzida nos terminais das bobinas.

A capacitância parasita entre a bobina e os condutores de fases A, B e C foram  $0,071723 \text{ pF}$ ,  $0,072543 \text{ pF}$  e  $0,056504 \text{ pF}$ , respectivamente. Os valores obtidos para as capacitâncias parasitas são aplicados no circuito da Figura 17. As capacitâncias parasitas foram acopladas entre cada um dos condutores e a bobina.

**Figura 17:** Circuito equivalente do acoplamento capacitivo no software LTspice.



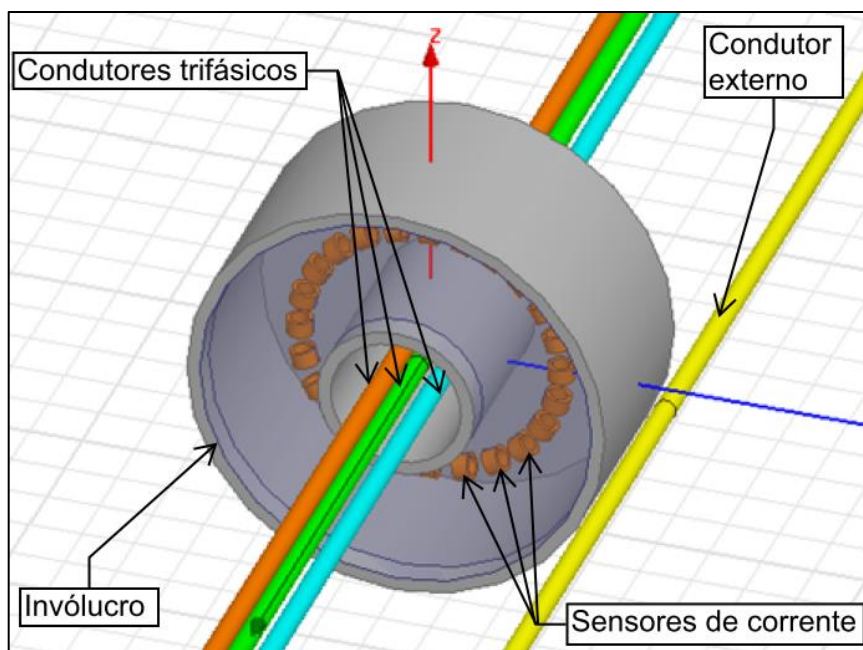
Fonte: o autor.

Os resultados encontrados para a tensão induzida nos terminais da bobina neste caso serão apresentados e debatidos na seção 4.3.

### 3.2.3 Simulação com interferência externa com excitação de corrente

Na mesma modelagem utilizada para as análises anteriores, foi incluído um condutor na região externa do instrumento, conforme mostrado na Figura 18. O condutor foi incluído com seção igual aos condutores presentes na região interna do instrumento, com corrente de 10 A, alocado com distância de 10 mm do invólucro do dispositivo, de modo que o acoplamento magnético do mesmo com os sensores de corrente fosse suficientemente grande para análise do mesmo. Os condutores trifásicos permanecem nas cores verde, azul e laranja, enquanto que o condutor na região externa foi identificado com a cor amarela.

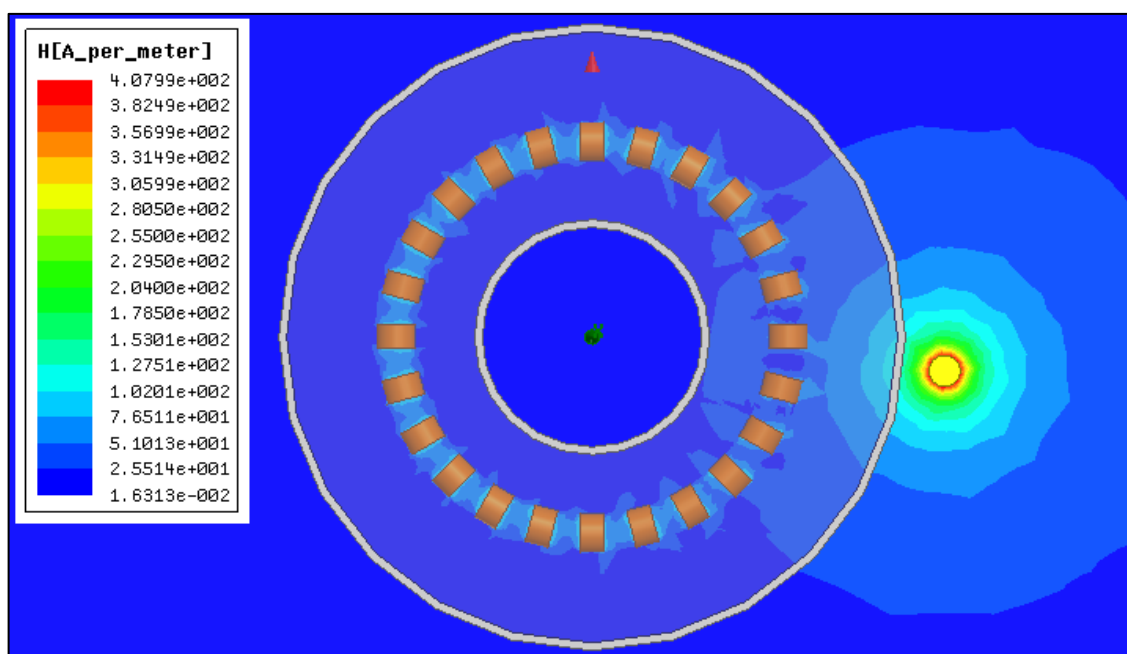
**Figura 18:** Modelagem do dispositivo com condutor próximo no software Maxwell.



Fonte: o autor.

Analisou-se novamente o campo magnético gerado no interior do instrumento, porém, desta vez apenas o campo gerado pelo condutor externo ao instrumento, a fim de verificar o comportamento do mesmo. Na Figura 19 é possível verificar a incidência do campo magnético do condutor externo ao instrumento e nota-se que o mesmo apresenta influência significativa nas bobinas mais próximas do invólucro naquela região.

**Figura 19:** Campo magnético gerado pelo condutor externo ao instrumento.

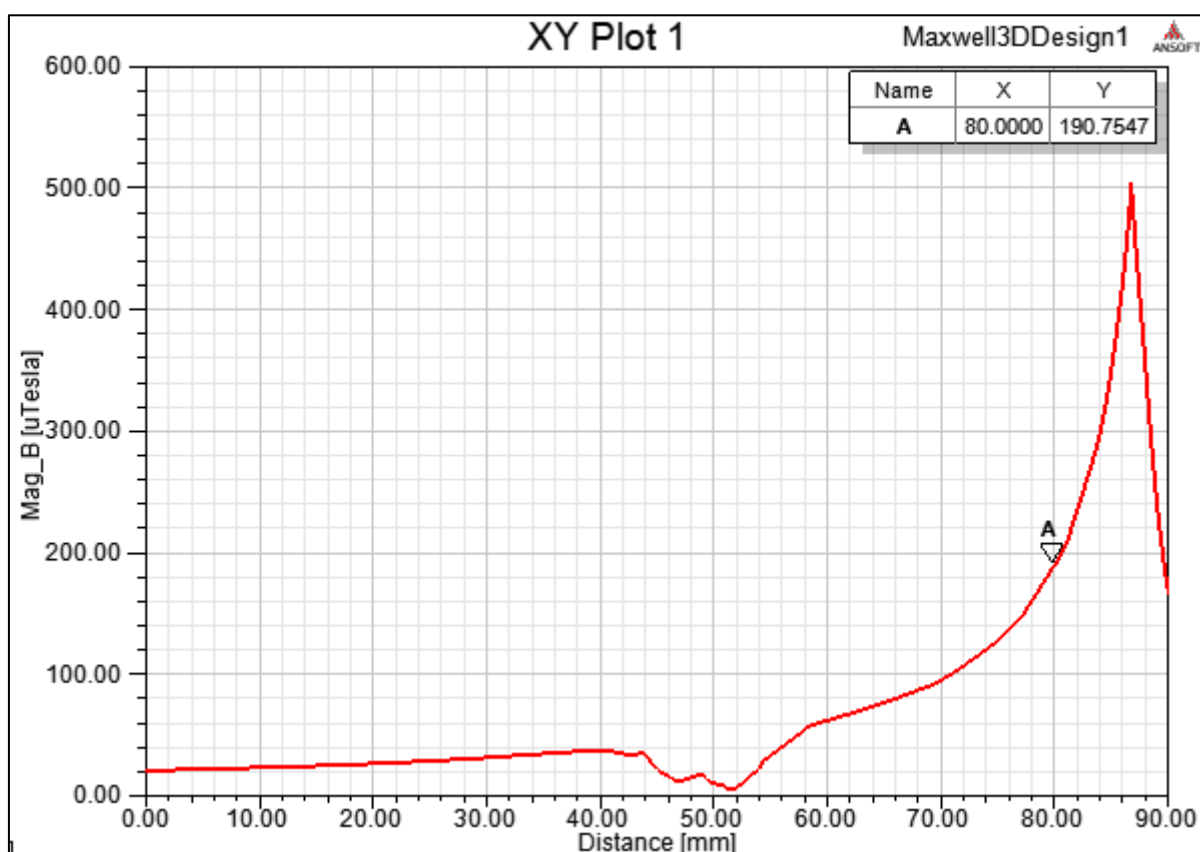


Fonte: o autor.

A fim de determinar a densidade de fluxo magnético gerado pelo condutor que incide no invólucro do instrumento, traçou-se novamente uma linha ao longo do eixo XY partindo do centro do instrumento até a extremidade do invólucro.

Neste caso, é possível observar que a densidade de fluxo magnético que incide na face externa do invólucro é de aproximadamente  $190,75 \mu T$ , conforme mostrado no ponto A na Figura 20.

**Figura 20:** Comportamento da densidade de fluxo magnético da interferência externa.



Fonte: o autor.

Assim como realizado para os casos anteriores, a análise deste caso também irá resultar em uma matriz de indutâncias incluindo o condutor na região externa. Esta simulação possibilitará a análise da interferência que o condutor externo acarreta na medição de corrente do dispositivo. A interferência analisada refere-se ao acoplamento magnético entre o condutor externo e as bobinas responsáveis por medir a corrente dos três condutores.

Para a análise, foi escolhida a bobina mais próxima ao cabo externo, de forma a determinar a máxima interferência, dentre as bobinas do dispositivo. Os valores de acoplamento magnético podem ser vistos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Matriz de indutâncias do dispositivo com interferências externas.

	Fase A	Fase B	Fase C	Interferência	Bobina
Fase A	1,03400 $\mu H$	0,68797 $\mu H$	0,68805 $\mu H$	0,37997 $\mu H$	0,84742 $\mu H$
Fase B	0,68797 $\mu H$	1,03420 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	0,34446 $\mu H$	0,60036 $\mu H$
Fase C	0,68805 $\mu H$	0,68800 $\mu H$	1,03430 $\mu H$	0,34763 $\mu H$	0,60008 $\mu H$
Interferência	0,37997 $\mu H$	0,34446 $\mu H$	0,34763 $\mu H$	1,02920 $\mu H$	<b>-0,79347 <math>\mu H</math></b>
Bobina	0,84742 $\mu H$	0,60036 $\mu H$	0,60008 $\mu H$	<b>-0,79347 <math>\mu H</math></b>	0,057426 H

Analisando os valores obtidos, nota-se que o software retornou valores negativos para a indutância mútua entra a bobina e o condutor externo ao instrumento. Neste caso, o sinal negativo indica que o fluxo magnético que passa pela região da bobina gerado pelo condutor externo é contrário ao sentido da corrente.

Determinou-se então o coeficiente de acoplamento magnético de ambos os condutores com a bobina, conforme Equação 14.

$$k_{AB1} = 3,47784 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{BB1} = 2,46351 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{CB1} = 2,46224 \cdot 10^{-3}$$

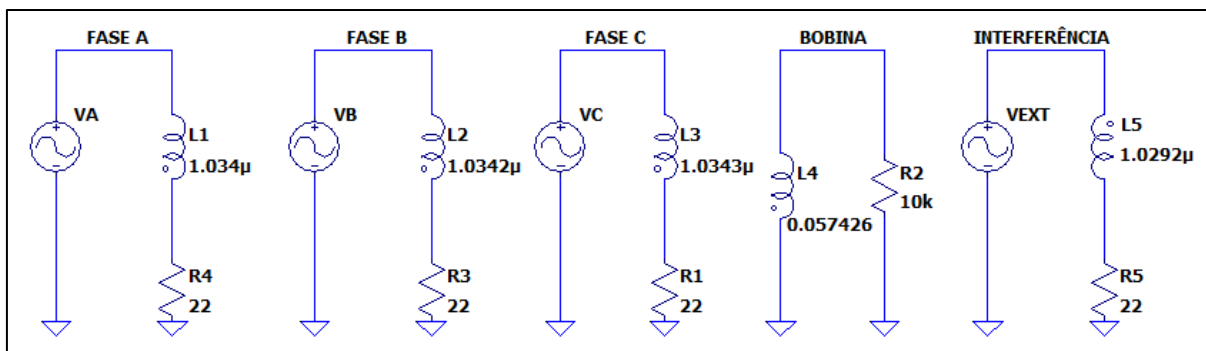
$$k_{EXTB1} = 3,26382 \cdot 10^{-3}$$

Onde  $k_{AB1}$ ,  $k_{BB1}$  e  $k_{CB1}$  são os coeficientes de acoplamento magnético da bobina com os condutores nas fases A, B e C, respectivamente, e o coeficiente  $k_{EXTB1}$  representa o acoplamento magnético entre a bobina e o condutor externo ao dispositivo.

Nota-se que o acoplamento magnético do condutor na região externa é maior que o acoplamento de alguns dos cabos que se pretende medir, o que reforça a hipótese de que o mesmo esteja interferindo significativamente no sinal de corrente.

Com os coeficientes de acoplamento obtidos, simula-se novamente o circuito equivalente no LTSpice, desta vez, com a inclusão do condutor externo ao dispositivo, conforme Figura 21.

**Figura 21:** Circuito equivalente com interferência externa no software LTspice.



Fonte: o autor.

Os resultados encontrados para a tensão induzida nos terminais da bobina neste caso serão apresentados e debatidos na seção 4.4.

### 3.3 Blindagem do instrumento

Com base nos resultados encontrados nas simulações anteriores, notou-se que os principais propagadores de interferências na tensão induzida nos terminais da bobina são os condutores externos ao instrumento, de forma com que se faça necessário a implementação de uma blindagem física para atenuar o acoplamento magnético e reduzir estas interferências.

Conforme apresentado na seção 2.2, a blindagem para o dispositivo deve ser projetada levando-se em conta duas características do material: a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica. A alta permeabilidade magnética é uma característica de materiais ferromagnéticos, enquanto que a alta condutividade elétrica é uma característica de materiais condutores.

Para o dispositivo em questão, pretende-se realizar a blindagem do campo magnético oriundo dos condutores externos ao instrumento. Desta forma, conforme observado na seção 2.2.1.2 e dado o escopo do trabalho, optou-se por selecionar materiais ferromagnéticos, visto que a atenuação por absorção tende a ser mais efetiva na blindagem desses campos magnéticos.

Para análise e escolha do material para a blindagem, foram selecionados três materiais com propriedades ferromagnéticas distintas, sendo eles o Níquel, o MuMetal e o Supermalloy. As propriedades eletromagnéticas dos materiais citados são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5:** Materiais e suas propriedades eletromagnéticas.

<b>Material</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\sigma</math>)</b>	<b>Permeabilidade Relativa (<math>\mu_r</math>)</b>	<b>Saturação (mT)</b>
<b>Níquel</b>	12,3	100	500
<b>MuMetal</b>	1,85	20.000	720
<b>Supermalloy</b>	1,85	100.000	800

Fonte: adaptado de Menezes (2016).

### 3.3.1 Determinação da eficácia da blindagem

A determinação da eficácia da blindagem que o novo invólucro a ser projetado deveria possuir foi determinada com base na intensidade da densidade de fluxo magnético que incide nas bobinas gerada pelos condutores que se pretende medir a corrente e o fluxo magnético no invólucro do instrumento gerado pelo condutor externo. Conforme observado na Figura 12, a densidade de fluxo magnético gerado pelos três condutores incidente na bobina é de aproximadamente  $112,65 \mu T$ . Conforme observado na Figura 20, a densidade de fluxo magnético gerado pelo condutor externo ao instrumento incidente no invólucro do instrumento é de aproximadamente  $190,75 \mu T$ .

Para o dispositivo analisado, procura-se projetar um novo invólucro que reduza a densidade de fluxo magnético gerado pelo condutor externo para um valor com duas ordens de grandeza menor (cem vezes menor) que a densidade de fluxo magnético que incide nas bobinas gerados pelos três condutores centrais, de forma a atenuar o efeito do campo magnético nos sensores de corrente.

Desta forma, tem-se uma intensidade de densidade de fluxo magnético de aproximadamente  $190,75 \mu T$  antes do invólucro ( $B_0$ ) e espera-se obter uma intensidade de  $1,1265 \mu T$  depois da blindagem ( $B_1$ ). Substituindo os valores na Equação 17, tem-se que a eficácia da blindagem esperada no dispositivo deve ser de aproximadamente  $100 \text{ dB}$ .

$$S = 20 \cdot \log \frac{190,75 \cdot 10^{-6}}{1,1265 \cdot 10^{-6}} = 102,63 \text{ dB}$$

### 3.3.2 Determinação da espessura da blindagem para os materiais propostos

A escolha da espessura da blindagem não deve ser realizada de forma arbitrária, desta forma, deve-se determinar, primeiramente, os valores da profundidade pelicular dos materiais. Segundo Sanches (2010), uma espessura de blindagem maior que a profundidade pelicular é suficiente para garantir que uma interferência sofra perdas por absorção, reduzindo a intensidade da mesma a pelo menos 63% do seu valor inicial. No entanto, o critério utilizado para a espessura mínima de material que a blindagem deverá possuir será a eficácia de 100 dB, determinada anteriormente.

Com base na Equação 19, a profundidade pelicular do material diminui quanto menor for a frequência, desta forma, ao garantir uma boa blindagem para frequência de 60 Hz deve assegurar um bom desempenho para frequências maiores. Na Tabela 6 são demonstrados os valores calculados das profundidades peliculares para os cinco materiais propostos na Tabela 5.

**Tabela 6:** Profundidade pelicular dos materiais em 60 Hz.

<b>Material</b>	<b>Profundidade Pelicular (mm)</b>
<b>Níquel</b>	6,6
<b>MuMetal</b>	0,378
<b>Supermalloy</b>	0,053

Conforme discutido na seção 2.2.1.1, a profundidade pelicular é um fator importante para o cálculo das perdas por absorção de interferências eletromagnéticas, principalmente para materiais ferromagnéticos, visto que materiais com alta permeabilidade terão profundidade pelicular menor, podendo oferecer grande absorção com pequenas espessuras, o que é observado nas espessuras calculadas.

Visto que a absorção é a principal forma de atenuação do campo magnético em materiais ferromagnéticos, a determinação da espessura da blindagem será calculada considerando apenas os efeitos de absorção do material, de forma a encontrar o valor de espessura que satisfaz a Equação 20 para a eficácia da blindagem esperada de 100 dB.

Isolando a espessura na Equação 20, tem-se a expressão para o cálculo da espessura do material, para o caso analisado, mostrada na Equação 24.

$$\frac{PA.\delta}{8,69} = d \quad (24)$$

Substituindo o valor da profundidade pelicular de cada um dos materiais apresentados na Tabela 6 e a eficácia da blindagem calculada para o instrumento, é possível determinar a espessura da blindagem que irá reduzir a densidade de fluxo magnético em duas ordens de grandeza para cada um dos materiais ferromagnéticos. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Espessura do material para obtenção de eficácia da blindagem de 100 dB.

<b>Material</b>	<b>Espessura da Blindagem (mm)</b>
<b>Níquel</b>	75,5
<b>MuMetal</b>	4,4
<b>Supermalloy</b>	0,6

### 3.3.3 Análise de saturação magnética nos materiais propostos

Conforme discutido na seção 2.2, ao optar por projetar uma blindagem para campos magnéticos oriundos de correntes alternadas com material ferromagnético, deve-se levar em consideração a saturação magnética do material, que afeta significativamente a capacidade de blindagem do material.

Esta perda de capacidade da blindagem se dá, pois, ao atingir a região de saturação o material perde suas características ferromagnéticas para o fluxo excedente. Desta forma, o material escolhido para a blindagem do instrumento não deve se aproximar da região de saturação magnética do material.

Ressalta-se que o aterramento da carcaça é um ponto fundamental para o bom funcionamento da blindagem do instrumento, pois fornece um caminho de baixa impedância para correntes geradas na blindagem devido às ondas eletromagnéticas incidentes. Um sistema sem aterramento pode fornecer dados errados e prejudicar a eficácia da blindagem. Ressalta-se também que, por questões de segurança, o aterramento de equipamentos com partes metálicas que possam vir a ser expostos a grandes valores de potencial elétrico são fundamentais (CANTWELL, 1980).



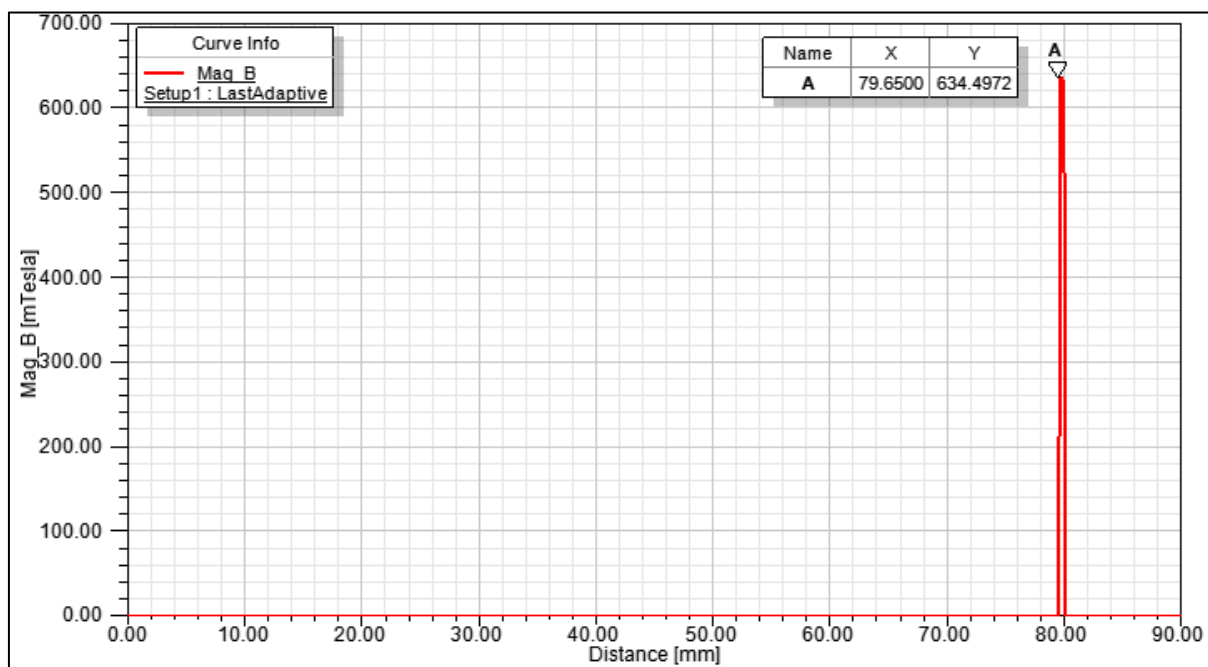
A fim de analisar a viabilidade de utilizar cada um dos materiais citados, o dispositivo com os possíveis materiais e suas respectivas espessuras calculadas foram modelados novamente no software de elementos finitos, de forma a determinar a densidade de fluxo magnético incidente na blindagem do instrumento.

### 3.3.3.1 Análise da blindagem em Supermalloy

A primeira análise realizada para a blindagem do instrumento foi feita com o Supermalloy. A espessura da parede do invólucro foi projetada com 0,6 mm de espessura, conforme valor calculado anteriormente para obter-se uma eficácia da blindagem de aproximadamente 100 dB.

Com o invólucro projetado, fez-se a análise da densidade de fluxo magnético incidente na blindagem do instrumento. Na Figura 22 é possível observar que a densidade de fluxo magnético na blindagem do instrumento é de aproximadamente 634,49 *mT*.

**Figura 22:** Densidade de fluxo magnético com blindagem em Supermalloy.



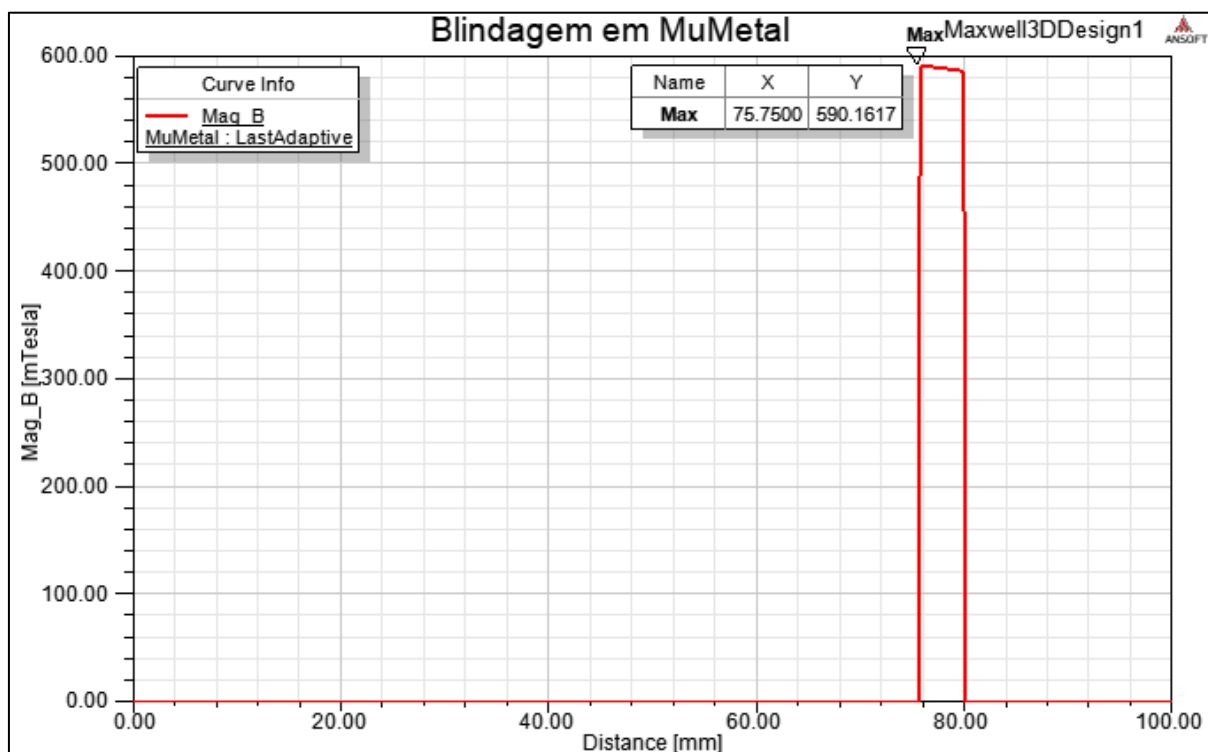
Fonte: o autor.

### 3.3.3.2 Análise da blindagem em MuMetal

A segunda análise realizada para a blindagem do instrumento foi feita com o MuMetal. A espessura da parede do invólucro foi projetada com 4,4 mm de espessura, conforme valor calculado anteriormente para obter-se uma eficácia da blindagem de aproximadamente 100 dB.

Com o invólucro projetado, fez-se a análise da densidade de fluxo magnético incidente na blindagem do instrumento. Na Figura 23 é possível observar que a densidade de fluxo magnético na blindagem do instrumento é de aproximadamente  $590,16 \text{ mT}$ .

**Figura 23:** Densidade de fluxo magnético com blindagem em MuMetal.

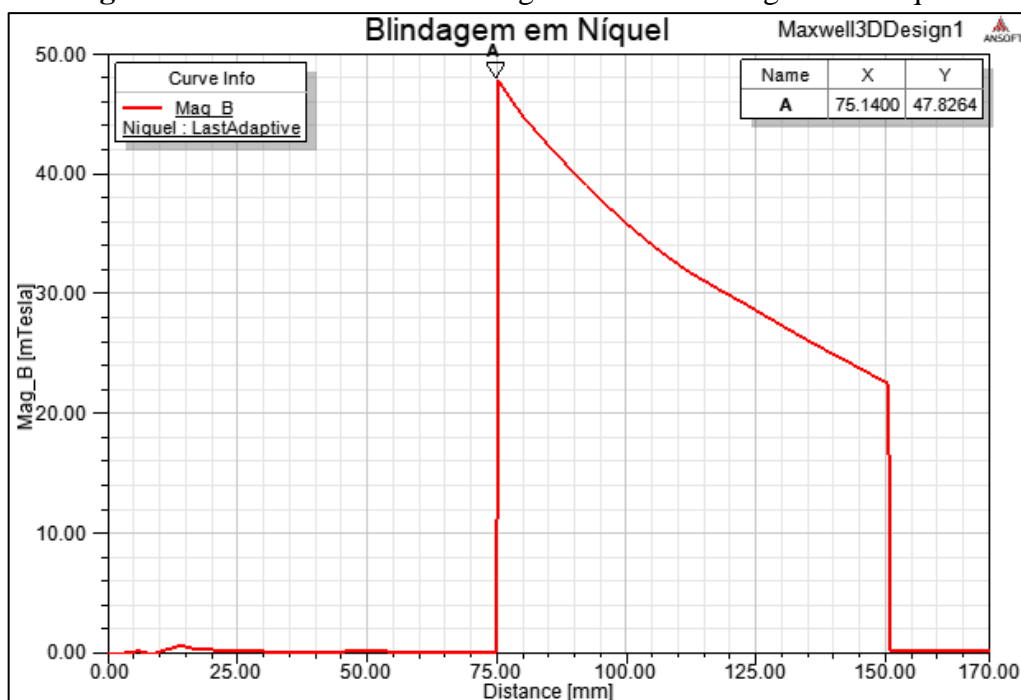


Fonte: o autor.

### 3.3.3.3 Análise da blindagem em Níquel

A terceira análise realizada para a blindagem do instrumento foi feita com o Níquel. A espessura da parede do invólucro para este material é significativamente maior em relação aos materiais analisados anteriormente, sendo projetada com 75,5 mm de espessura, conforme valor calculado anteriormente para obter-se uma eficácia da blindagem de aproximadamente 100 dB.

Com o invólucro projetado, fez-se a análise da densidade de fluxo magnético incidente na blindagem do instrumento. Na Figura 24 é possível observar que a densidade de fluxo magnético na blindagem do instrumento é de aproximadamente  $47,82 \text{ mT}$ .

**Figura 24:** Densidade de fluxo magnético com blindagem em Níquel.

Fonte: o autor.

### 3.3.4 Escolha do material da blindagem

Comparando a densidade de fluxo magnético incidente na blindagem com o ponto de saturação magnética dos três materiais propostos, conforme mostrado na Tabela 8, nota-se que o MuMetal e o Supermalloy, apesar de apresentarem espessuras menores se comparados ao Níquel, atingem fluxos magnéticos próximos da região de saturação do material, de forma com que a sua utilização para a blindagem seja descartada, visto que o magnetismo residual pode acarretar interferindo nas medições realizadas com o dispositivo. O Níquel, por sua vez, apesar de apresentar uma espessura elevada, opera longe da região de saturação, sendo a escolha mais recomendada para este caso.

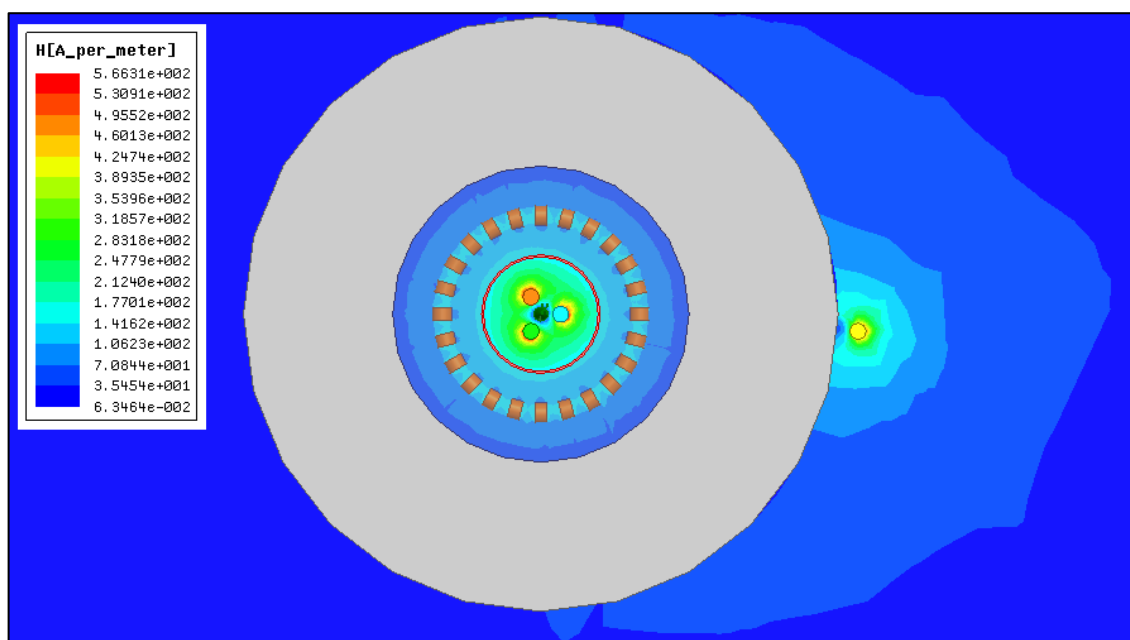
**Tabela 8:** Comparação entre o fluxo incidente na blindagem e saturação do material.

Material	Densidade de fluxo na blindagem (mT)	Saturação (mT)
Níquel	47,82	500
MuMetal	590,16	720
Supermalloy	634,49	800

### 3.3.5 Modelagem e simulação do novo dispositivo

Com o novo invólucro projetado para blindar interferências oriundas de campos magnéticos externos ao instrumento, fez-se novamente a análise do campo magnético no interior do instrumento com todos os condutores. Na Figura 25 é possível verificar que a nova blindagem projetada realiza a completa atenuação do campo magnético gerado pelo condutor externo.

**Figura 25:** Campo magnético gerado no instrumento com a blindagem projetada.



Fonte: o autor.

A partir da blindagem projetada com espessura de 75,5 mm, foram realizadas as análises referentes aos acoplamentos entre os componentes do dispositivo. Os valores de acoplamento magnético obtidos para este caso podem ser vistos na Tabela 9.

**Tabela 9:** Matriz de indutâncias do dispositivo com interferências externas e blindagem.

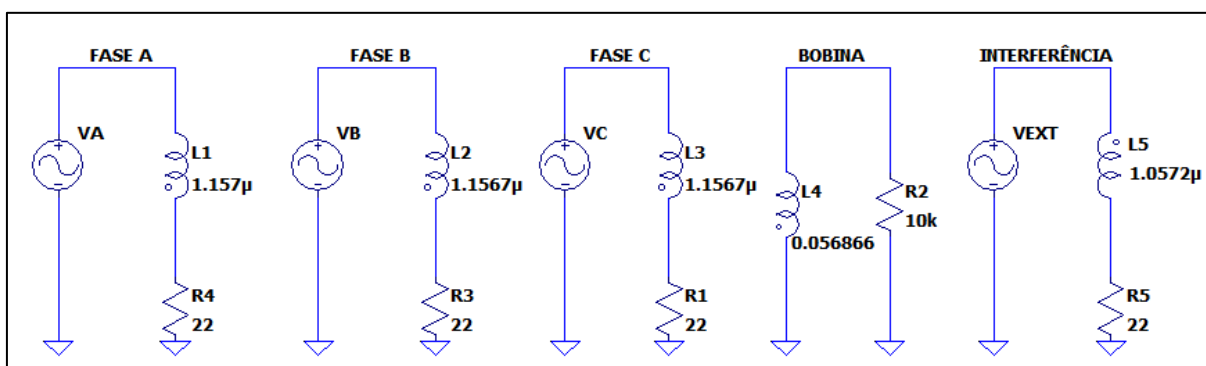
	Fase A	Fase B	Fase C	Interferência	Bobina
Fase A	1,15700 $\mu H$	0,80933 $\mu H$	0,80939 $\mu H$	0,25037 $\mu H$	0,80227 $\mu H$
Fase B	0,80933 $\mu H$	1,15670 $\mu H$	0,80925 $\mu H$	0,23765 $\mu H$	0,63281 $\mu H$
Fase C	0,80939 $\mu H$	0,80925 $\mu H$	1,15670 $\mu H$	0,23833 $\mu H$	0,63123 $\mu H$
Interferência	0,25037 $\mu H$	0,23765 $\mu H$	0,23833 $\mu H$	1,05720 $\mu H$	<b>-0,00066 <math>\mu H</math></b>
Bobina	0,80227 $\mu H$	0,63281 $\mu H$	0,63123 $\mu H$	<b>-0,00066 <math>\mu H</math></b>	0,056866 H

Nota-se que, a indutância mútua entre o condutor externo ao dispositivo e a bobina diminuiu significativamente se comparado ao valor obtido sem a blindagem envolvendo o instrumento. Isto se deve, não somente ao fato da blindagem, mas também pela distância do condutor externo à bobina, visto que, dado a espessura da blindagem projetada, conseqüentemente, a distância entre os componentes também aumentou. Determinou-se o coeficiente de acoplamento magnético do condutor externo com a bobina, com base nos novos valores encontrados, conforme Equação 14.

$$k_{EXTB1} = 0,026918.10^{-3}$$

Nota-se que o acoplamento magnético diminuiu significativamente se comparado ao valor obtido sem a blindagem. Com os novos coeficientes de acoplamento obtidos, simula-se novamente o circuito equivalente no LTSpice, desta vez, com a inclusão do condutor externo ao dispositivo, conforme Figura 26.

**Figura 26:** Circuito equivalente com interferência e blindagem no software LTSpice.



Fonte: o autor.

Os resultados encontrados para a tensão induzida nos terminais da bobina neste caso serão apresentados e debatidos na seção 4.5.

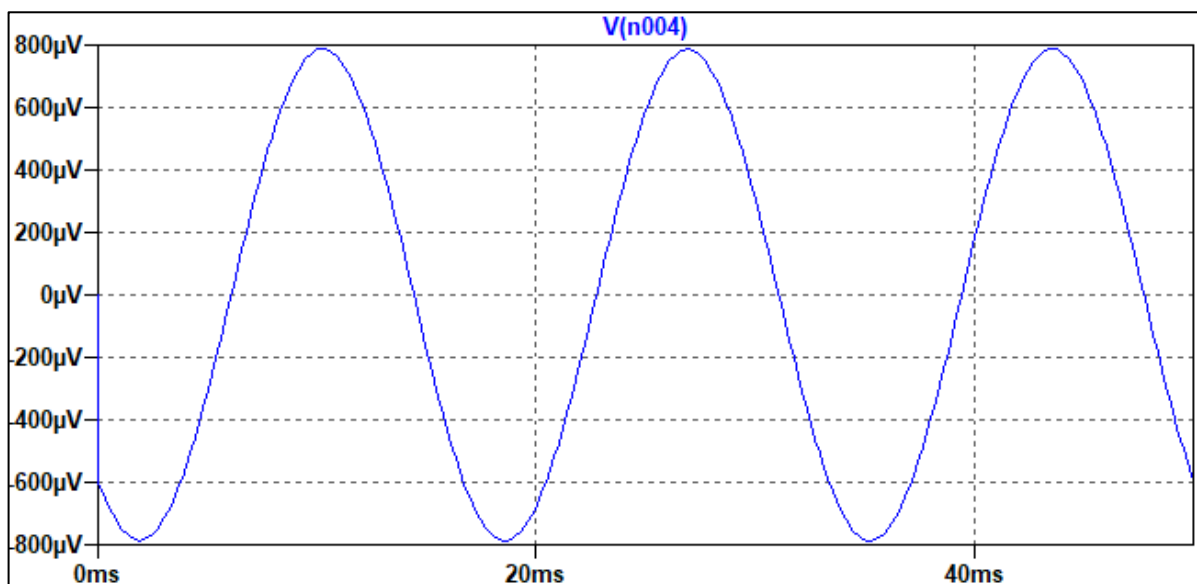
## 4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentadas as análises dos acoplamentos entre os componentes do dispositivo de medição. Serão analisados os resultados obtidos para a tensão induzida na saída dos sensores de corrente a partir do acoplamento magnético e capacitivo entre os componentes. As análises serão feitas com o dispositivo sem e com a blindagem para interferências de baixas frequências, de modo a verificar o desempenho da blindagem projetada.

### 4.1 Acoplamento magnético entre os condutores e as bobinas

A primeira análise visa determinar a tensão induzida nos terminais da bobina gerado pelo acoplamento magnético entre os condutores que se pretende medir a corrente e uma das bobinas. Ao simular o circuito mostrado na Figura 14 obteve-se a forma de onda da tensão induzida nos terminais da bobina, mostrada na Figura 27.

**Figura 27:** Tensão induzida nos terminais de uma das bobinas.



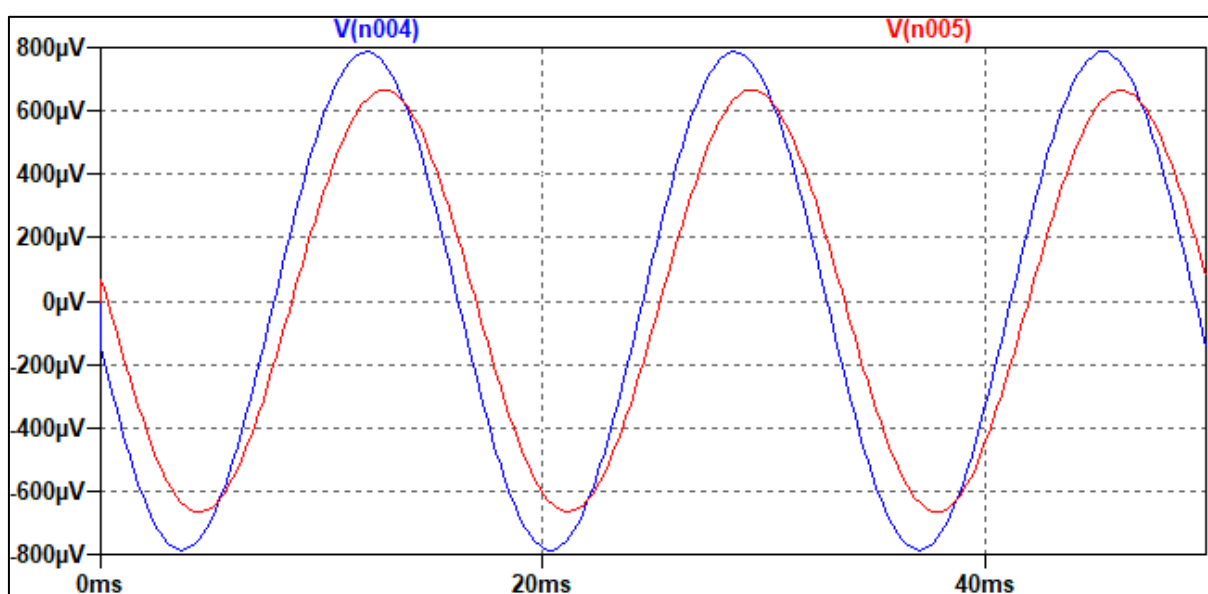
Fonte: o autor.

Pode-se notar que o valor de tensão induzida encontrado na carga é de aproximadamente 787  $\mu\text{V}$ . O resultado obtido, é um somatório da contribuição do fluxo concatenado pela bobina de cada um dos condutores. Este valor será utilizado como referência para as análises posteriores, a fim de determinar a influência das fontes de interferências presentes no meio.

## 4.2 Acoplamento magnético entre as bobinas

A segunda análise visa determinar a tensão induzida nos terminais da bobina gerada com a influência do acoplamento magnético entre duas bobinas adjacentes. Ao simular o circuito mostrado na Figura 16 obtiveram-se as formas de onda demonstradas na Figura 28. A forma de onda na cor azul representa a tensão induzida nos terminais da primeira bobina (mesma bobina analisada na seção 4.1). Nota-se que a amplitude da tensão induzida não sofreu interferência, visto que sua tensão induzida continua em  $787 \mu\text{V}$ . Na segunda bobina, a tensão induzida nos terminais é um pouco menor, ficando em torno de  $680 \mu\text{V}$ .

**Figura 28:** Tensão induzida nos terminais de duas bobinas adjacentes.



Fonte: o autor.

Nota-se também que, apesar do coeficiente de acoplamento magnético entre as bobinas ser maior do que o dos condutores com as bobinas, não há interferência na tensão induzida nos terminais da primeira bobina, visto que a amplitude do sinal de corrente permanece a mesma. Isto ocorre pois, apesar do coeficiente ser dez vezes maior em comparação com os demais coeficientes, a corrente que circula nas bobinas é  $10^8$  vezes menor que a corrente que circula nos condutores que se acoplam às bobinas.

A partir desta análise é possível concluir que, no caso estudado, a interferência decorrente do acoplamento magnético entre as bobinas que compõe o instrumento não é a principal fonte de ruído, tampouco apresenta alguma interferência na medição do sinal de corrente do dispositivo. Neste caso, é possível desprezar o acoplamento magnético entre as bobinas como fonte de interferência, de forma com que uma blindagem interna ao instrumento em cada uma das bobinas não se faça necessária.

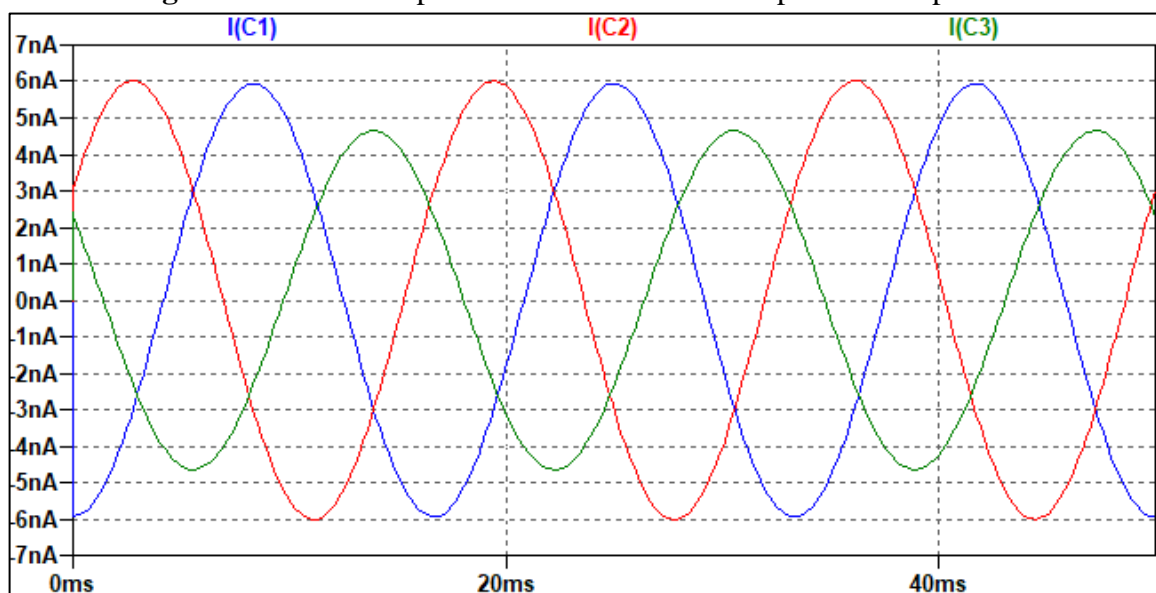
### 4.3 Acoplamento capacitivo entre os condutores e as bobinas

A terceira análise visa determinar a tensão induzida nos terminais da bobina com a influência do acoplamento capacitivo entre os condutores trifásicos e uma das bobinas. Ao simular o circuito mostrado na Figura 17 a tensão induzida não sofreu qualquer interferência, permanecendo com a amplitude em torno de  $787 \mu\text{V}$ .

Através de uma análise mais detalhada, nota-se que o resultado encontrado está de acordo com o esperado, visto que o acoplamento capacitivo aumenta conforme o aumento da frequência, de modo que, para o caso analisado, sua influência não seja significativa.

A baixa influência do acoplamento capacitivo se deve ao baixo valor da capacitância (na ordem de  $10^{-12}$ ) aliada à baixa frequência dos condutores analisados (60 Hz). Desta forma, a corrente parasita que poderia causar interferência nos sinais de corrente obtidos é muito baixa (na ordem de  $10^{-9}$ ), como pode ser visto na Figura 29.

**Figura 29:** Correntes parasitas decorrentes do acoplamento capacitivo.



Fonte: o autor.

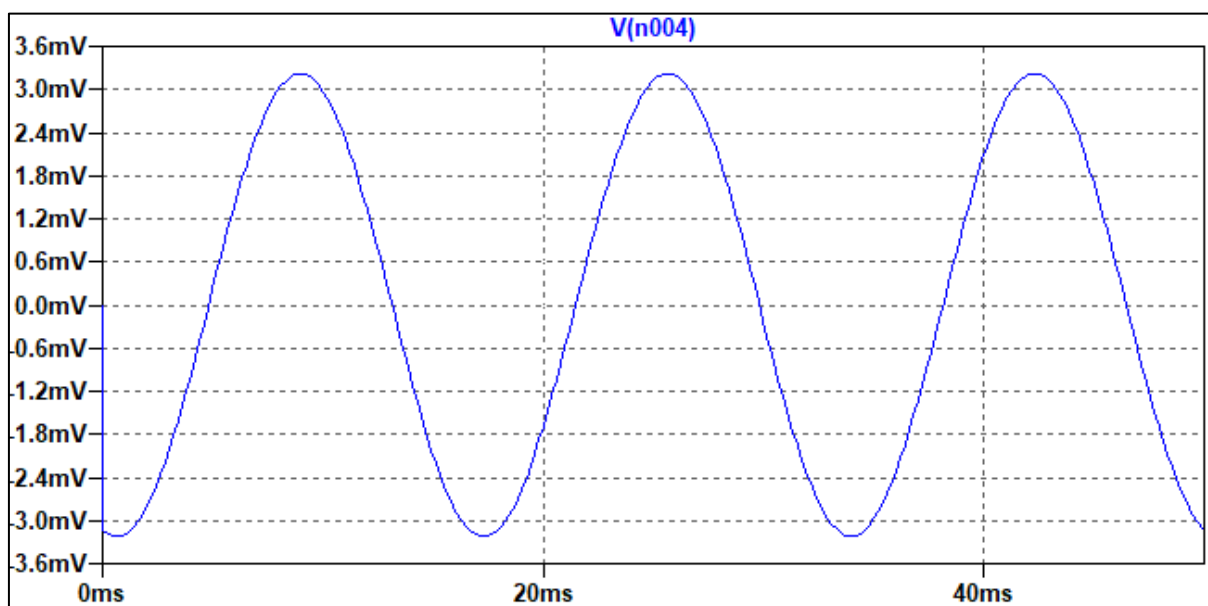
A partir desta análise é possível concluir que, no caso estudado, a interferência decorrente do acoplamento capacitivo entre os condutores e as bobinas pode ser desprezada, visto que a faixa de operação do dispositivo se resume às baixas frequências, de forma com que o acoplamento capacitivo não influencie significativamente.



#### 4.4 Acoplamento magnético dos condutores e da bobina com interferências externas

A quarta análise visa determinar a tensão induzida nos terminais da bobina com a influência do condutor externo ao dispositivo. Ao simular o circuito mostrado na Figura 21 com a presença do condutor externo ao dispositivo, notou-se uma diferença significativa na tensão induzida obtida nos terminais da bobina, conforme demonstrado na Figura 30.

**Figura 30:** Tensão induzida na saída da bobina sem a blindagem.



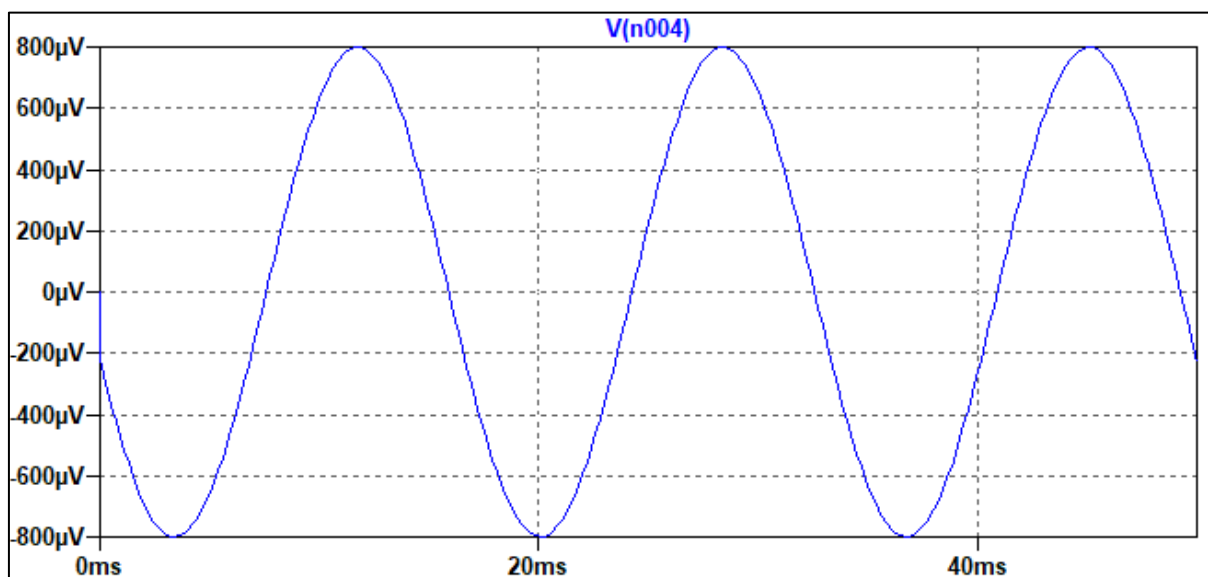
Fonte: o autor.

A amplitude da tensão induzida obtida com a influência do acoplamento magnético de um cabo externo ficou em torno de 3,222 mV, valor quatro vezes maior ao encontrado sem a presença de interferências externas. Conclui-se que o efeito do campo magnético de cabos externos ao dispositivo não pode ser desprezado, de modo com que seja necessário o projeto de uma blindagem para esse tipo de interferência.

## 4.5 Acoplamento magnético do dispositivo com a blindagem

A quinta análise visa determinar a tensão induzida nos terminais da bobina com a influência do condutor externo ao dispositivo, no entanto, com a nova blindagem de 75,5 mm de espessura em níquel envolvendo os sensores do dispositivo. Ao realizar a simulação do circuito com a presença do condutor externo ao dispositivo e a blindagem, foi possível notar uma diferença na tensão induzida obtida nos terminais da bobina em relação à simulação sem a blindagem, conforme demonstrado na Figura 31.

**Figura 31:** Tensão induzida na saída da bobina com a blindagem.



Fonte: o autor.

A amplitude da tensão induzida presente nos terminais da bobina obtida diminuiu consideravelmente com a atenuação ocasionada pela blindagem, retornando à amplitude de de aproximadamente 787  $\mu\text{V}$ . Desta forma, pode-se concluir que a blindagem atenuou em sua totalidade o campo magnético proveniente do condutor externo ao dispositivo.

Comparando o valor da tensão induzida encontrado nas simulações com a blindagem e a tensão induzida com o dispositivo operando sem interferências externas (em condições normais), pode-se dizer que o instrumento não apresenta diferença no sinal amostrado, o que torna o resultado satisfatório para o caso analisado. Conclui-se que a blindagem projetada para o dispositivo funciona de maneira eficaz atenuando interferências provenientes de campos magnéticos de baixa frequência.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso apresenta a análise da incidência do campo magnético e diferentes casos de acoplamentos de interferências eletromagnéticas em um dispositivo desenvolvido para medir energia remotamente. Neste caso, o escopo do trabalho limita-se a analisar os sensores de corrente de um protótipo disponível em laboratório. A análise permitiu observar o efeito do campo elétrico e magnético nos componentes do dispositivo, de forma a proporcionar um estudo dos efeitos de uma blindagem no instrumento.

Considerando que o objetivo deste trabalho era o projeto de um sistema de blindagem para interferências de baixa frequência em um medidor de energia remoto, pode-se concluir que seu propósito foi atingido com êxito: o projeto desenvolvido é capaz de atenuar de forma significativa o campo magnético oriundo de condutores externos à região de medição do instrumento.

Ao longo da análise, constatou-se que o acoplamento magnético entre as bobinas não apresenta uma interferência tão grande para o sensoriamento da corrente que passa pelos condutores em que se pretende medir a corrente, visto que a corrente que circula nas bobinas é significativamente menor que a corrente que circula nos condutores, induzindo uma tensão muito menor nos terminais da bobina. Desta forma, não se fez necessário o projeto de uma blindagem em cada uma das bobinas do dispositivo.

Constatou-se também que a interferência decorrente do acoplamento capacitivo entre os condutores e as bobinas também não apresenta grande interferência na faixa de frequências em que se pretende operar o dispositivo. As baixas capacitâncias parasitas entre os condutores e a bobina somadas à baixa frequência em que o dispositivo opera não interferiu significativamente na tensão induzida utilizada para determinar a corrente dos cabos. Desta forma, não se fez necessário o projeto de uma blindagem para as capacitâncias parasitas do dispositivo.

Segundo os resultados de simulação, notou-se que a maior fonte de interferências em baixas frequências no dispositivo originava-se de acoplamentos magnéticos com condutores próximos ao instrumento. Ao aproximar um condutor ao invólucro do dispositivo, este condutor induzia uma tensão nos terminais da bobina, modificando o sinal de corrente esperado.

Pode-se concluir que a melhor forma de se obter um valor aceitável de atenuação para o campo magnético oriundo de condutores externos é optando por materiais magnéticos. A

análise dos materiais apresentados mostrou que o Níquel, apesar de sua elevada espessura do material necessário para obter a mesma eficácia de blindagem, se comparado ao MuMetal e ao Supermalloy, é o material mais apropriado para a blindagem do instrumento. Isto se dá, pois, para blindagens de campo magnético oriundo de correntes alternadas, deve-se levar em consideração a saturação eletromagnética do material, visto que o mesmo pode perder suas propriedades ao entrar nesta região, desta forma, a escolha do Níquel foi a mais recomendada para o caso analisado.

## **5.1 Trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a implementação física da blindagem no dispositivo, a fim de provar experimentalmente a atenuação do acoplamento magnético de condutores externos ao dispositivo e o projeto de uma camada de blindagem adicional com o objetivo de atenuar interferências oriundas de campos elétricos, a fim de obter um dispositivo adequado de medição sem interferências eletromagnéticas de quaisquer tipos.

## REFERÊNCIAS

- BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2ª Edição. Editora Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- BJÖRKLÖF, D. *Shielding for EMC*. 1999 Compliance Engineering Annual Reference Guide, p. 137-144, 1999.
- CANTWELL, E. *Effective grounding - the key to personnel and proper equipment operation*. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, v. 3, p. 194–199, 1980.
- CROVATO, C. D. P.; SANTOS, C. F.; ANACLETO, T.; LEBORGNE, R. C.; BRUSAMARELLO, V. J. *Contactless Measurement of Voltage Harmonics on Low Voltage Multi-Conductor Cables. Modelling, Measurement & Control*. A, General Physics, Electronics, Electrical Engineering, v. 3, p. 296-309, 2018.
- GUAN, D. *Study on shielding functionally gradient materials with low reflection loss and high absorption loss for electromagnetic wave*. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, v. 2, p. 1259–1262, 2003.
- KALAFALA, A. K. *Optimized configurations for passively shielded magnetic resonance imaging magnets*. IEEE Transactions on Magnetics, v. 29, n. 2, p. 1240-1244, 1993.
- KLINKERBUSCH, L. *On the shielding effectiveness of enclosures*. IEEE Transactions on EMC, v. 47, n. 3, p. 589–601, 2005.
- LAWRENCE, D. *Hardware and Software Architecture for Non-Contact, Non-Intrusive Load Monitoring*. 2016, no. 2014, Ph.D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- LAWRENCE, D.; DONNAL, J. S.; LEEB S. *Current and voltage reconstruction from non-contact field measurements*. 2016, IEEE Sens. J., vol. 16, no. 15, pp. 6095–6103.
- LAWRENCE, D.; DONNAL, J. S.; LEEB, S.; HE Y. *Non-Contact Measurement of Line Voltage*. 2016, IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 24, pp. 8990-8997.

- LEITE, J. V. *Análise De Módulos Diferenciais de Histerese Magnética Considerando Laços Menores de Indução*. 2002. 92 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- MENEZES, P. O. *Análise da eficácia de materiais condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite*. 2016. 89 p. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2016.
- OTT, H. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- PLONUS, M. A. *Applied Electromagnetics*, Mc Graw-Hill, Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 1978, ISBN: 0-07-050345-1. pp. 181-183.
- RAMO, S.; WHINNERY, J. R.; VAN DUZER, T. *Fields and Waves in Communication Electronics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994, 3rd ed.
- RIBEIRO, J. *Propagação das ondas eletromagnéticas: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Erica, 2004.
- ROCHA, M. A.; MEZA R. A. *Modelagem de curvas de magnetização para solução iterativa de circuitos magnéticos não lineares*. 2005. 130p. Monografia. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.
- SALINAS, E. *Field mitigation from secondary substation*. CIRED 2003 Round Table on Magnetic Field Mitigation Techniques, p. 14-19, 2003.
- SANCHES, D. *Tópicos Especiais em Eletrônica - EMI*. 3. ed. [S.l.]: Clube dos Autores, 2010.
- SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. *Física 3 – Eletricidade e Magnetismo*. 2ª Edição, LTC Editora, 1984. 771p.
- SINDURA, G. *Control of electromagnetic waves through electromagnetic shielding*. Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), v. 1, p. 448–452, 2011.
- SOUZA, R. N. *Utilização de alumínio para blindagem de campo magnético de 60 Hz em sala de exames de imagem por ressonância magnética*. 2018. 98p. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.
- WENTWORTH, S. *Eletromagnetismo aplicado: Abordagem antecipada das linhas de transmissão*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

YICHAO, Z.; CHENG, G.; LIHUA, S.; BIHUA, Z. *Analysis and test of EM shielding for lowfrequency magnetic field*. 2007. International Symposium on electromagnetic compatibility, Qingdao, China, p. 345-349, 2007.