

SCÁRLETY LEMOS DE SOUZA

**ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE INDUTÂNCIA E RESISTÊNCIA UTILIZANDO O
CONCEITO DE ENERGIA SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

SCÁRLETY LEMOS DE SOUZA

Orientador

Prof. Dr. Aldemir Ap. Cavallini Junior

**ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE INDUTÂNCIA E RESISTÊNCIA UTILIZANDO O
CONCEITO DE ENERGIA SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Aeronáutica
da Universidade Federal de Uberlândia,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de **BACHAREL em**
ENGENHARIA AERONÁUTICA

UBERLÂNDIA - MG

2017

**ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE INDUTÂNCIA E RESISTÊNCIA UTILIZANDO O
CONCEITO DE ENERGIA SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS**

Projeto de Conclusão de Curso
APROVADO pelo Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Aldemir Ap. Cavallini Junior – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Thiago Augusto Machado Guimarães
Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Lucas Altamirando de Andrade da Rocha
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA, 01 de Agosto de 2017

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Mais uma importante etapa da minha vida está chegando ao fim, meu grande sonho está se realizando. Sei que esta caminhada não seria concretizada sem a ajuda daqueles que eu amo e estão sempre ao meu lado, por isso manifesto minha gratidão. Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e a Nossa Senhora por realizarem incríveis milagres em minha vida e estarem sempre ao meu lado dando forças e me amparando para que eu chegasse até aqui. Dedico esta vitória aos meus pais, Ricardo e Viviane, e ao meu irmão, Ricardinho, que não mediram esforços para que o sonho de me formar fosse realizado.

Agradeço também aos meus avós, Odivaldo e Sônia, que durante esta jornada me acolheram em sua casa e cuidaram de mim com muito amor e carinho, e aos meus avós, Luiz e Neide, que sempre me apoiaram e incentivaram. Aos meus amigos, especialmente a 4ª turma de Engenharia Aeronáutica, que me proporcionou amizades sinceras que vou levar para o resto da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr, por sua orientação e convívio. O senhor mostrou-se muito empenhado e paciente e esteve disposto a ajudar mesmo com tanto trabalho. Muito obrigada.

Ao Governo Federal Brasileiro, que me deu a oportunidade de realizar um intercâmbio nos Estados Unidos, estudar na University of Colorado e realizar a pesquisa voltada para a área de carros elétricos na Florida International University.

Agradeço ao grupo PETMEC (Programa de Educação Tutorial da FEMEC), onde tive a oportunidade de trabalhar por dois anos. Foi um tempo de grande aprendizado profissional e pessoal, graças as pessoas envolvidas no grupo.

SOUZA, S.L. **Análise das Equações de Indutância e Resistência Utilizando o Conceito de Energia sem Fio para Aplicação em Carros Elétricos**, 2017. 26p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

O consumo exagerado dos combustíveis fósseis já trouxe vários problemas para a humanidade, além de não ser um combustível renovável, traz diversos prejuízos ambientais. Neste contexto, a eletricidade surge como um potencial substituto, principalmente no que se diz respeito a veículos baseados em força motriz. Sendo assim, o intuito deste trabalho é apresentar um breve histórico dos carros elétricos e como eles vem sendo aperfeiçoados ao longo dos anos. Além disso, apresentar o conceito de energia sem fio, desenvolvido por Tesla, que propõe que os carros elétricos sejam carregados em movimento, reduzindo consideravelmente o peso das baterias, já que o armazenamento de energia pode ser menor se o veículo for recarregado enquanto o condutor dirige. Por fim, o objetivo principal deste trabalho consiste em, através das equações de indutância e resistência, analisar e otimizar alguns modelos de bobinas, afim de chegar a um modelo ideal para bobinas de veículos movidos à eletricidade.

PALAVRAS CHAVE: carros elétricos, energia sem fio, bateria, equações de indutância e resistência, bobina ideal.

SOUZA, S.L. Inductance and Resistance Analysis Equations Using the Wireless Energy Concept for Application in Electric Cars, 2017. 26p. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

The exceeded consumption of fossil fuels has already brought several problems for humanity, besides not being a renewable fuel, it brings several environmental damages. In this context, electricity appear as a potential substitute, especially for motor-based vehicles. Therefore, the purpose of this work is to present a brief history of electric cars and how they are being improved over the years. In addition, to introduce the concept of wireless power, developed by Tesla, which proposes that electric cars can be loaded in motion, reducing considerably the batteries weight, once the energy storage may be less if the vehicle recharge while moving. Finally, the main objective of this work is to analyze and optimize some coil models through the inductance and resistance equations, in order to obtain an ideal model for electric vehicle coils.

KEY WORDS: electric cars, wireless energy, battery, inductance and resistance equations, ideal coil.

Lista de Abreviações

AC	Corrente Alternada
EV	Veículo Elétrico
FEM	Força Eletromotriz
PCC	Projeto de Conclusão de Curso
SI	Sistema Internacional de Unidades
WPT	Wireless Power Transfer

Lista de Símbolos

a	Raio interno da bobina
β	Variável de integração da transformada de Henkel
\vec{B}	Campo Magnético
ΔL	Efeito do meio na indutância
$\Delta\Phi$	Variação de fluxo magnético
ΔR	Efeito do meio na resistência
Δt	Variação do tempo
d_{lj}	Distância entre o meio inferior e a bobina
d_{uj}	Distância entre o meio superior e a bobina
ε	Força eletromotriz
I	Corrente elétrica
$J_1(\beta a_{jmj})$	Função de Bessel
L	Indutância
μ	Constante de permeabilidade magnética do ar
μ_0	Constante de permeabilidade magnética do vácuo
ω	Frequência
Φ_{leq}	Efeito do meio inferior na indutância da espira
Φ_{ueq}	Efeito do meio superior na indutância da espira
r_0	Raio da secção transversal da bobina
R_0	Resistência
σ_{Cu}	Condutividade elétrica do cobre

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivos.....	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 O Início da História dos Carros Elétricos	4
2.2 Carros Elétricos Convencionais.....	6
2.3 Conceito da Transferência de Energia sem Fio (WPT – Wireless Power Transfer)	8
3. Análise e Resultados	11
3.1 Análise 3D em Elementos Finitos	12
3.2 Abordagem Utilizando Método de Elementos Finitos 2D.....	14
3.2.1 Caso 1	14
3.2.2 Caso 2.....	20
3.2.3 Caso 3.....	22
4. Conclusões	24
Referências Bibliográficas	26

Lista de Figuras

Figura 1 - Conceito da Transferência de Energia sem Fio	2
Figura 2 - Thomas Edison e seu primeiro carro elétrico	4
Figura 3 - Evolução dos carros elétricos	6
Figura 4 - Carro Elétrico: 1 - Bateria, 2 - Módulo de Controle, 3 - Motor Elétrico, 4 - Transmissão, 5 - Freio Regenerativo	7
<i>Figura 5 - Experimento da Bobina de Tesla</i>	8
Figura 6 - Direção e sentido do campo magnético produzido por um fio retilíneo.....	9
Figura 7 - O experimento de Faraday.....	10
Figura 8 - Modelo 3D.....	12
Figura 9 - Modelo 3D na caixa de ar.....	13
Figura 10 - Vista 2D axissimétrica.....	15
Figura 11 - Vista 2D (Acero,2006).....	15
Figura 12 - (a) Bobina não carregada; (b) Lâmina de alumínio semi infinita posicionada acima da bobina; (c) Lâmina de alumínio com espessura de 3mm posicionada acima da bobina	16
Figura 13 - Indutância x frequência para a bobina não carregada.....	17
Figura 14 – Indutância x frequência para lâmina de alumínio semi infinita posicionada acima da bobina	18
Figura 15 – Indutância x Frequência para lâmina de alumínio com espessura de 3mm posicionada acima da bobina	19
Figura 16 - (a) Acero (2006); (b) Resultado obtido das equações analíticas no Matlab®.	19
Figura 17 - Vista 2D para o caso 2	20
Figura 18 - Permeabilidade complexa x frequência da ferrita (3C90)	21
Figura 19 - (a) Resultado obtido no Matlab®; (b) Resultado obtido no Comsol®	21
Figura 20 - Densidade de Fluxo Magnético - 2D	22
Figura 21 - Densidade do Fluxo Magnético - 3D.....	22
Figura 22 - Indutância x Frequência para o caso 3.....	23
Figura 23 - Resistência x Frequência para o caso 3	23

1. Introdução

O veículo elétrico tem sido largamente estudado por laboratórios de pesquisa em Universidades pelo mundo. Isso se deve ao fato de que a gasolina, diesel ou óleo, principais fontes de combustível dos automóveis atualmente, não são renováveis. Embora no Brasil o uso de combustíveis não fósseis, como o etanol, seja alto, no resto do mundo a gasolina ainda é utilizada em grande escala. Outra grande desvantagem do veículo movido a combustível fóssil é a poluição. Quando os combustíveis são queimados, eles geram gases como o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso e o metano, que são liberados pelo escapamento do veículo. Estes gases potencializam o efeito estufa e contribuem para o aumento da temperatura, gerando o aquecimento global. O aquecimento da Terra está ocasionando o derretimento das calotas polares e, conseqüentemente, o aumento do nível dos mares, fazendo com que muitas cidades litorâneas desapareçam.

Sendo assim, os veículos alternativos estão se tornando cada vez mais atrativos e necessários. Os veículos elétricos além de permitirem uma diminuição drástica dos resíduos poluentes, possuem melhor eficiência energética. De acordo com Odair (2015), a eficiência dos motores elétricos é bem maior quando comparada com os motores a combustão, a eficiência dos motores a combustão não passa de 40%, enquanto os motores elétricos possuem mais de 90% de eficiência. Outra vantagem importante é a redução de ruído. Os motores elétricos são mais silenciosos, gerando também a diminuição da poluição sonora.

Segundo Odair (2015), as principais desvantagens do carro elétrico são relacionadas com a utilização da bateria. Geralmente, as baterias possuem baixa autonomia, ou seja, elas não armazenam a mesma quantidade de energia contida em um tanque de combustível fóssil. Isso significa que para a mesma autonomia de um veículo movido a combustível fóssil, o volume da bateria seria muito maior que o do tanque, aumentando consideravelmente o peso do veículo. Outro ponto negativo é a durabilidade da bateria. As melhores tecnologias em termos de capacidade de carga têm problemas de durabilidade, ou seja, elas se recarregam menos conforme o tempo de utilização. Para que a vida útil da bateria seja otimizada, a recarga deve ser lenta, o que não é viável para o dono do automóvel elétrico.

A saída para as limitações da bateria é o conceito de Wireless Power Transfer (WPT), que propõe que o veículo elétrico seja recarregado em movimento. O peso da bateria pode ser reduzido

considerando que o armazenamento de energia pode ser menor se o veículo for recarregado enquanto o condutor dirige.

O conceito de transferência de energia sem fio começou a ser desenvolvido em 1890, com o físico e engenheiro Tesla e reuniu basicamente o conceito de duas leis, a Lei de Ampere e a Lei de Faraday. Hans Cristian Oersted, através dos seus experimentos, comprovou a existência de um campo magnético ao redor de um fio quando esse era percorrido por uma corrente elétrica. Mas, foi Ampere que equacionou este campo. A lei de Ampere, como ficou conhecida, estabelece que o campo magnético (\vec{B}) gerado por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica I a uma distância r do condutor.

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (1.1)$$

μ é a constante de permeabilidade magnética do vácuo definida como $\mu = 4\pi 10^{-7} \frac{Tm}{A}$.

A Lei de Faraday surgiu em 1831 com o inglês Michael Faraday. Quando Faraday aproximou dois circuitos elétricos, percebeu que no momento em que um deles era ligado ou desligado, aparecia por um instante de tempo uma corrente elétrica no outro circuito, e o sentido da corrente era diferente se o circuito estava sendo ligado ou desligado. Para confirmar que esse era um efeito magnético, ele aproximou um ímã, e também observou o aparecimento da corrente elétrica. Essa corrente só se mantinha enquanto o ímã estava em movimento. A conclusão de Faraday é que a variação do fluxo magnético que atravessa o circuito produz uma tensão elétrica, que dá origem a corrente.

A partir da Lei de Faraday e da Lei de Ampere surgiu o conceito de transferência de energia sem fio, proposta por Tesla (veja a Fig. 1).

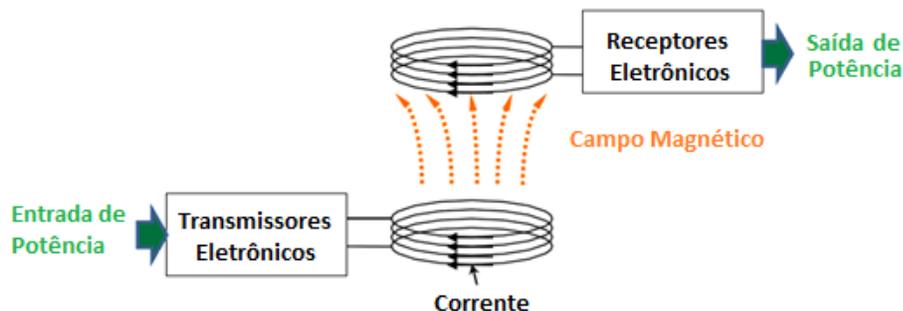


Figura 1 - Conceito da Transferência de Energia sem Fio

1.1 Objetivos

O objetivo deste PCC é analisar a influência de aspectos construtivos de uma bobina utilizada em veículos elétricos. O trabalho foi dividido em 3 casos, cada um com as particularidades no que se diz respeito aos aspectos construtivos da bobina (veja Tab. 1). Sendo assim, pode-se atribuir outros objetivos ao trabalho, são eles:

- Reproduzir diferentes casos de artigos acadêmicos utilizados como referência e assim, validar o código com as equações apresentadas neste trabalho.
- Validar computacionalmente os modelos desenvolvidos através do método de elementos finitos utilizando o software Comsol®.

Tabela 1- Casos reproduzidos para Validação das Equações

Casos Reproduzidos	
Caso 1	Efeito do material condutor posicionado acima de uma espira de uma volta (Material condutor utilizado: Alumínio).
Caso 2	Efeito de uma camada semi infinita, posicionada acima e abaixo de uma espira de uma volta. (Materiais utilizados: Alumínio e ferrita)
Caso 3	Efeito de uma camada semi infinita posicionada acima e abaixo de uma espira de múltiplas voltas.

Esses três casos foram escolhidos para analisar a influência de materiais condutores, como o alumínio e a ferrita, no sistema do veículo elétrico. Além disso, analisar como a espessura destes materiais podem influenciar na indutância da espira. Estes são os casos mais abordados em artigos acadêmicos para aplicação em diversas áreas da engenharia, por isso foram contemplados para validação das equações.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 O Início da História dos Carros Elétricos

A tecnologia dos automóveis elétricos não é uma inovação recente, os veículos elétricos já foram concorrentes dos automóveis a combustão interna. A história começa em meados do século XIX. De acordo com Hoyer (2008), ela está relacionada à história das baterias. Em 1859, a primeira bateria de chumbo e ácido foi relevada pelo belga Gaston Planté, que veio a ser utilizada por diversos veículos elétricos desenvolvidos na França, EUA e Reino Unido, na década de 1880. Em 1885, Benz mostrou ao mundo o primeiro motor de combustão interna. Em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria de níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo, só que com custo de produção mais elevado.

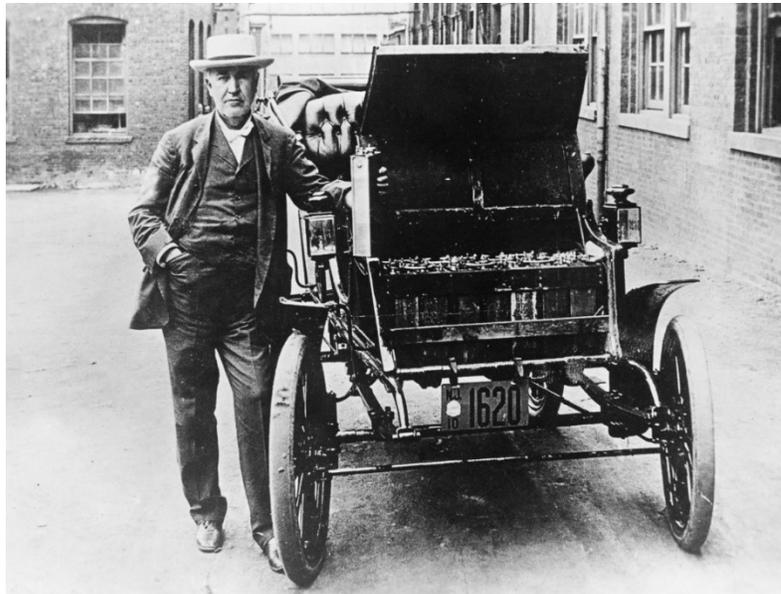


Figura 2 - Thomas Edison e seu primeiro carro elétrico

Na cidade de Nova York haviam cerca de quatro mil automóveis no ano de 1903, sendo 20% elétricos, 27% a gasolina e 53% a vapor. De acordo com Struben e Sterman (2006), em 1912, a quantidade de veículos a gasolina já era 30 vezes maior do que a quantidade de veículos elétricos. A partir de então, a produção de carros elétricos teve uma forte queda devido ao sistema de produção em série dos automóveis a gasolina, desenvolvido por Henry Ford. Esse sistema permitiu

com que o preço final dos carros ficasse entre US\$ 500 e US\$ 1.000, o que correspondia à metade do preço dos carros elétricos. Além disso, em 1912, a partida elétrica foi inventada, o que eliminou a necessidade do uso da manivela para acionar os motores movidos a gasolina, proporcionando mais uma vantagem para os motores movidos a gasolina.

No ano de 1920, as rodovias dos Estados Unidos já interligavam muitas cidades, o que demandava veículos capazes de percorrerem longas distâncias. A derrocada do veículo elétrico se concretizou com as descobertas de petróleo no Texas, que reduziu o preço da gasolina, tornando-a um combustível atrativo.

De acordo com Hoyer (2008), em 1903, já haviam registros de produção de carros híbridos: o motor de combustão interna era utilizado para fornecer tração às rodas e para carregar a bateria, enquanto o motor elétrico fornecia potência extra ao motor de combustão ou trabalhava sozinho quando estava em baixa velocidade.

Com o desenvolvimento dos países, carros com melhores performances foram sendo necessários e o motor a combustão interna oferecia isto. A rede de distribuição de gasolina se expandiu rapidamente. Além do mais, a manutenção dos primeiros automóveis movidos a gasolina era realizada por profissionais que consertavam bicicletas, agregando um baixo valor a manutenção. Já a manutenção de carros elétricos era bem mais difícil, tendo em vista que estes veículos utilizam baterias, as quais eram pouco conhecidas pelos mecânicos da época.

De acordo com Baran e Legey (2017), os veículos elétricos somente voltaram a atrair as grandes montadoras de carros após a década de 1960, quando os problemas ambientais começaram a surgir e fazer parte do debate sobre a geração e consumo de energia. Em 1972, o Clube de Roma publicou o livro *Limites para o Crescimento*, que enfatizou a atenção para a exploração de recursos naturais não renováveis. A crise do petróleo, em 1973, também impactou muito a economia no mundo. Mas isso não foi suficiente para que os carros elétricos concorressem com os automóveis convencionais.

A década de 90 apresentou um grande alavanque para a indústria de carros elétricos. De acordo com Baran e Legey (2017), em 1992 a Agenda 21, resultado da conferência Rio-92, que discutiu pela primeira vez o aquecimento global e suas consequências, reforçou os problemas causados pelo uso de combustíveis fósseis, ocasionando agitação nas principais montadoras mundiais. A partir de 1997 foi possível ver um discreto, porém crescente aumento na produção dos veículos elétricos, começando com a montadora de carros japoneses, Toyota, que lançou no

mercado o Prius, híbrido que revolucionaria o mercado na época. Sem ficar para trás, a Audi lançou o Duo no mercado europeu. Em 1999, a Honda lançou o Insight e mais tarde, em 2003, a versão híbrida do já consagrado Honda Civic. Logo em seguida a americana Ford lançou o Escape e assim os carros elétricos voltam ao mercado. A Fig. 3 mostra resumidamente a evolução dos carros elétricos.



Figura 3 - Evolução dos carros elétricos

2.2 Carros Elétricos Convencionais

Existem dois principais tipos de veículos elétricos (EV), os que utilizam para armazenamento de energia somente a bateria e devem ser conectados para serem recarregados e os veículos elétricos híbridos, que utilizam tanto o sistema de combustível quanto a bateria. Nos dois casos o motor elétrico é bastante eficiente: entre 90 e 95% da energia disponível é utilizada para movimentar o veículo de acordo com Widmen (2017). Entretanto o uso de baterias ainda possui dois grandes desafios: o custo e o alcance. A maioria dos carros puramente elétricos não armazenam energia suficiente para percorrerem uma distância maior que 250 quilômetros por recarga, já os veículos híbridos podem percorrer 500 quilômetros ou mais dependendo da capacidade de combustão do motor.

Carros híbridos possuem transmissão que executa a mesma função básica da transmissão de um carro convencional, além disso, também possuem o motor a gasolina e o tanque de combustível. A presença do motor elétrico e baterias tem como objetivo aumentar a eficiência do veículo. Quando os veículos param durante o tráfego, o motor convencional desliga e a bateria alimenta o sistema de ar condicionado e acessórios. A bateria também é capaz de ligar o veículo e o colocar em movimento novamente. Freio “regenerativo” também é outra característica utilizada para economizar combustível no modelo híbrido. Carros movidos somente a combustão dependem do atrito para frearem, dissipando a energia cinética na forma de calor, enquanto o freio

“regenerativo” possibilita que parte desta energia dissipada seja capturada, convertendo em eletricidade e armazenando nas baterias. Esta energia armazenada pode ser utilizada posteriormente para acelerar o veículo.

O veículo puramente elétrico possui bateria, módulo de controle, motor elétrico, transmissão e o freio regenerativo. As baterias mais populares são de íon – lítio, como as de celulares. Para terem a capacidade necessária para recarregar um veículo, pesam cerca de 200 kg. Representam de 10 a 20% do peso do veículo e até 40% do seu custo. O módulo de controle recebe a informação do acelerador para gerenciar a eletricidade que flui da bateria para o motor, regulando a velocidade do carro. O motor elétrico transforma a energia elétrica em energia cinética para girar o eixo do carro e fazê-lo mover. O motor é cerca de 3 vezes mais eficiente do que o movido a gasolina, além de ter metade do peso e do volume. A força que o movimenta é diretamente proporcional à energia fornecida pelo motor, então não se usam as engrenagens típicas de um carro normal. O freio regenerativo tem a mesma função no modelo híbrido. A Fig. 4 mostra um carro elétrico.



Figura 4 - Carro Elétrico: 1 - Bateria, 2 - Módulo de Controle, 3 - Motor Elétrico, 4 - Transmissão, 5 - Freio Regenerativo

2.3 Conceito da Transferência de Energia sem Fio (WPT)

No conceito de transferência de energia sem fio não há necessidade de meios físicos para transportar a corrente. WPT pode fornecer energia de uma fonte de corrente alternada (AC) para baterias ou dispositivos sem conectores ou fios, ou seja, pode recarregar telefones, drones e carros. Este conceito, no entanto, existe desde o final da década de 1890. Nikola Tesla conseguiu acender lâmpadas elétricas sem fio no seu laboratório em Colorado Springs, utilizando o conceito de indução eletrodinâmica.

De acordo com o Instituto de Física da Universidade de Brasília (2017), Tesla utilizou uma bobina que produzia tensões elevadas sob altas frequências. O funcionamento é simples, um transformador primário eleva a tensão de rede de 110 volts para algo em torno de 5000 volts. Esta tensão é fornecida a um centelhador, que está ligado em paralelo com um capacitor e a bobina primária do transformador secundário (estes em série). Quando o capacitor carrega, a tensão no centelhador eleva-se até o ponto onde há a quebra da rigidez dielétrica do ar, fazendo com que um “pico” de corrente elétrica elevado atravesse o circuito. Esta corrente passa pela bobina primária do transformador secundário gerando um campo magnético, este campo induz uma corrente elétrica na bobina secundária. Como o número de espiras na bobina secundária é bem maior que o número de espiras na bobina primária, a corrente elétrica induzida nela é pequena, mas a tensão obtida nos seus terminais é elevada. Ao se aproximar a lâmpada fluorescente do terminal da bobina secundária, ela se acende e há a formação de pequenos “raios” (veja Fig. 5).

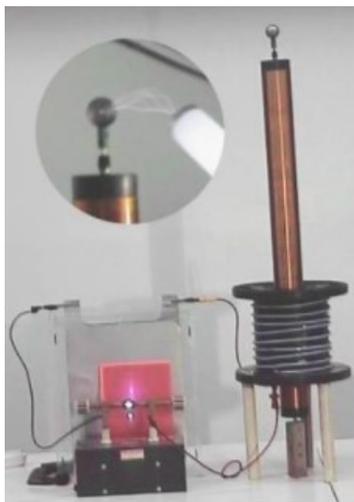


Figura 5 - Experimento da Bobina de Tesla

O conceito de campo magnético desempenha um papel central no eletromagnetismo, não há como fazer uma descrição dos fenômenos elétricos e magnéticos sem fazer uso de tal conceito. O campo magnético é representado por \vec{B} e a unidade de medida no sistema SI, é o **Tesla**. O conceito de transferência de energia sem fio começou a ser desenvolvido em 1890, com o físico e engenheiro Tesla e reuniu basicamente o conceito de duas leis, a Lei de Ampère e a Lei de Faraday.

Ampère elaborou a ideia básica de que a passagem de uma corrente elétrica gera a criação de um campo magnético (veja Fig. 6). De acordo com Marques (2014), a relação entre a corrente num fio e o campo magnético gerado por ele não é tão simples, pois envolve o conceito de circulação do campo B ao longo do fio. A lei estabelece uma relação linear entre a circulação do campo magnético ao longo de um caminho fechado e a corrente, ou seja:

$$\text{circulação do campo magnético} = \mu_0 I \quad (2.1)$$

μ é a constante de permeabilidade magnética do vácuo definida como $\mu = 4\pi 10^{-7} \frac{Tm}{A}$.

A formulação matemática mais precisa da lei de Ampère é:

$$\oint_r \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (2.2)$$

Assim, a lei de Ampère estabelece uma relação entre um fenômeno elétrico (cargas elétricas em movimento) e o elemento essencial dos fenômenos magnéticos (o campo magnético).

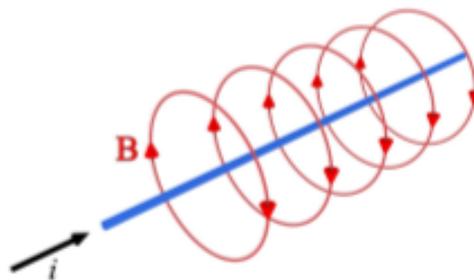


Figura 6 - Direção e sentido do campo magnético produzido por um fio retilíneo

A lei de Faraday foi determinada por um experimento simples, Faraday utilizou uma bobina, um voltímetro e um ímã. A medida que o ímã era movimentado próximo a bobina, verificava-se o aparecimento de uma corrente elétrica (veja Fig. 7).

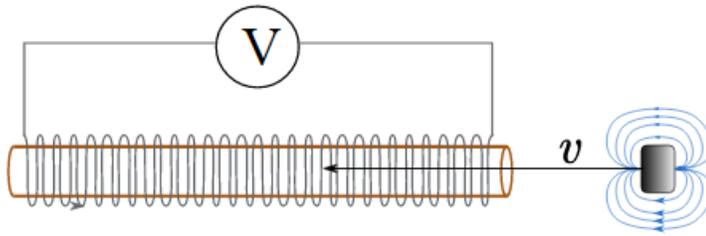


Figura 7 - O experimento de Faraday

A lei de Faraday relaciona a FEM gerada entre os terminais de um condutor sujeito à variação de fluxo magnético com o módulo da variação de fluxo em função de um intervalo de tempo em que esta variação acontece, sendo expressa matematicamente por:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.3)$$

onde $\Delta\Phi$ representa a variação do fluxo magnético e Δt representa o intervalo de tempo.

O sinal negativo da expressão é uma consequência da Lei de Lenz, que diz que a corrente induzida tem um sentido que gera um fluxo induzido oposto ao fluxo indutor.

3. Análise e Resultados

Buscando uma abordagem melhor definida para projetar e otimizar as bobinas, é necessário avaliar alguns parâmetros, como a indutância, o efeito do meio na indutância, a resistência e o efeito do meio na resistência. A Equação de Maxwell foi usada para calcular a indutância:

$$L = \mu_0 a \left(\log \frac{8a}{r_0} \right) - 1.75 \quad (3.1)$$

onde μ_0 representa a permeabilidade relativa do ar, a é o raio interno da bobina e r_0 é o raio da seção transversal da bobina.

Conclui-se a partir da Eq. 3.1 que a indutância não depende do material utilizado na bobina.

A Equação 3.2 foi utilizada para calcular o efeito do meio na indutância.

$$\Delta L = i\omega\mu_0\pi \int_0^\infty \left[\sum_{m_j=1}^{n_j} a_{jmj} J_1(\beta a_{jmj}) \right]^2 x \left[\frac{e^{-2\beta d_{uj}} \Phi_{ueq} + 2\Phi_{leq} \Phi_{ueq} e^{-2\beta(d_{uj}+d_{lj})} + e^{-2\beta d_{lj}} \Phi_{leq}}{1 - \Phi_{leq} \Phi_{ueq} e^{-2\beta(d_{uj}+d_{lj})}} \right] \quad (3.2)$$

onde ω representa a frequência, Φ_{leq} e Φ_{ueq} são os efeitos do meio na indutância da espira, β é a variável de integração da transformada de Henkel, $J_1(\beta a_{jmj})$ é a função de Bessel de primeira ordem, d_{uj} e d_{lj} são as distâncias entre a bobina e o meio acima e abaixo, respectivamente.

A Equação 3.3 foi utilizada para calcular a resistência.

$$R_0 = \left(\frac{\epsilon}{r_0 \sigma_{Cu}} \right) \frac{ber(\epsilon r_0) bei'(\epsilon r_0) - ber'(\epsilon r_0) bei(\epsilon r_0)}{ber'^2(\epsilon r_0) + bei'^2(\epsilon r_0)} \sum_i a_i \quad (3.3)$$

onde ϵ representa o inverso da profundidade da camada externa e ber , ber' , bei e bei' são funções de Kelvin e σ_{Cu} é a condutividade elétrica do cobre.

A Equação 3.4 foi utilizada para calcular os efeitos do meio na resistência.

$$\Delta R = Re \left\{ i\omega\mu_0\pi \int_0^\infty \left[\left(\frac{(1 + \Phi_{ueq} e^{-2kd})(1 + \Phi_{leq} e^{-2kH})}{1 - \Phi_{ueq} \Phi_{leq} e^{-k(d+H)}} \right) - 1 \right] T(k) dk \right\} \quad (3.4)$$

$$T(k) = \left[\sum_{q=1}^n a_q a_p J_1(ka_q) \right]^2 \quad (3.5)$$

Neste trabalho foram utilizados materiais condutores como barras de ferrita e lâminas de alumínio com o propósito de verificar a influência destes nos parâmetros do circuito, como indutância, o efeito do meio na indutância, a resistência e o efeito do meio na resistência. Todas as equações foram verificadas utilizando elementos finitos e o software MATLAB[®]. O principal objetivo é utilizar as equações verificadas para avaliar as considerações do projeto e realizar a otimização.

3.1 Análise 3D em Elementos Finitos

A análise em elementos finitos consiste em uma técnica numérica para encontrar soluções para equações diferenciais, discretizando o sistema sob análise em vários elementos. Considerando que o objetivo deste trabalho é projetar os acopladores com eficiência máxima, um modelo 3D foi simulado no Comsol[®]. A Figura 8 mostra o modelo reproduzido. De acordo com Mi e Rim (2017), são utilizadas barras da ferrita em detrimento de lâminas para se obter uma estrutura mais compacta, peso reduzido e menor custo para o sistema. A ferrita possui um alto custo no mercado, sendo assim, é vantagem utilizar as barras ao invés das lâminas.

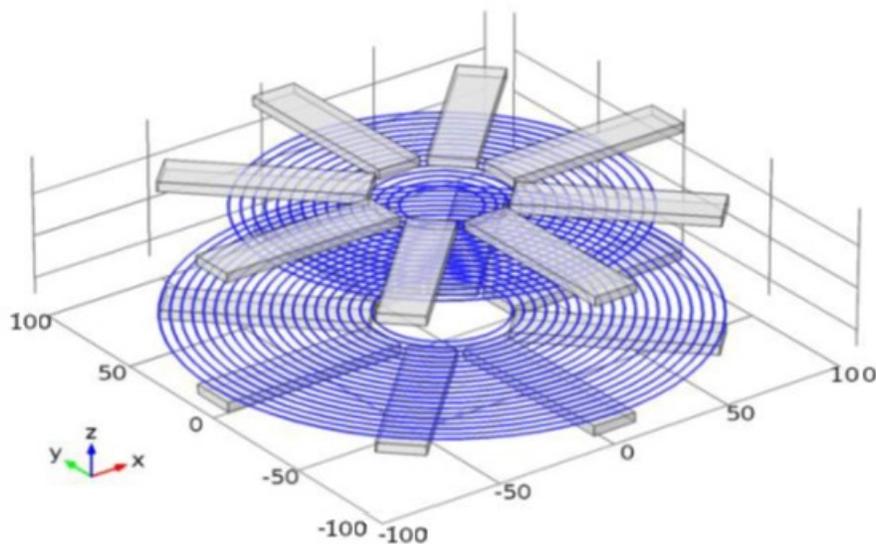


Figura 8 - Modelo 3D

O modelo consiste em duas bobinas, a maior representa a bobina emissora com 20 voltas e raio interno $a_{j1} = 25 \text{ mm}$ e raio externo $a_{j20} = 100 \text{ mm}$. A bobina menor é a receptora e contém

15 voltas com $a_{j1} = 15 \text{ mm}$ e $a_{j15} = 75 \text{ mm}$. Acima da bobina emissora, oito barras de ferrita foram posicionadas com dimensões de $75 \times 18 \times 4,5 \text{ mm}$. Abaixo da bobina receptora, também foram posicionadas 8 barras de ferrita com dimensões $62 \times 18 \times 4,5 \text{ mm}$. A distância entre as barras e as bobinas é de $1,5 \text{ mm}$ e a distância entre as bobinas é de 50 mm .

O modelo foi simulado utilizando um solucionador direto e o módulo AC/DC. Este módulo é usado para simular campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos em aplicações estáticas. Aplicações típicas incluem capacitores, indutores, isoladores, bobinas, motores, atuadores e sensores. Ele possui ferramentas dedicadas para extrair parâmetros como resistência, capacitância, indutância, impedância, força e torque.

A simulação demonstrou uma aproximação não otimizada. Devido ao fato da geometria ser bastante complexa, o número de graus de liberdade foi de 6109160 e depois de 5 dias de simulação não foi encontrado um resultado satisfatório. Considerando que o principal objetivo deste trabalho era validar as equações descritas no item 3.0 através da análise em elementos finitos, a simulação foi cancelada pelo fato desta requerer um número elevado de horas para um possível resultado. Sendo assim, um erro ao final da simulação, inviabilizaria um processo iterativo para validação das equações. A Fig. 9 mostra o modelo inserido em uma caixa de ar, esta tem a função de limitar o fluxo magnético.

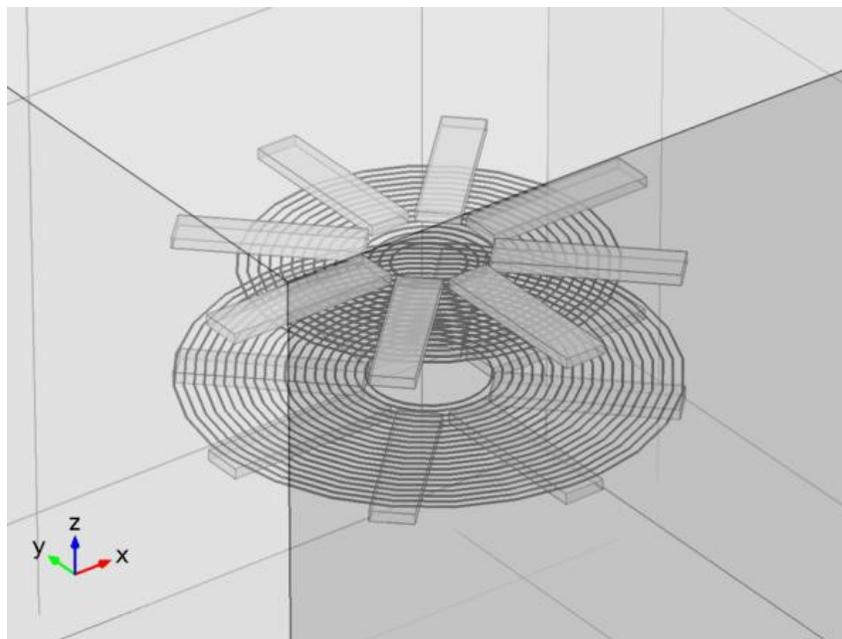


Figura 9 - Modelo 3D na caixa de ar

Como na simulação 3D não foi encontrado um resultado coerente, então decidiu-se utilizar a simulação 2D e verificar casos mais simples para validar corretamente as equações em um menor intervalo de tempo.

3.2 Abordagem Utilizando Método de Elementos Finitos 2D

3.2.1 Caso 1

Para verificar todas as equações analíticas precisamente, uma abordagem utilizando o método de elementos finitos em 2D foi utilizada. Foram reproduzidos no software Comsol® diferentes casos de artigos utilizados como referência. Este software foi escolhido por modelar diferentes problemas, principalmente, eletromagnéticos. O Comsol® utiliza o método de elementos finitos e pode modelar geometrias complexas em 2D e 3D. Além disso, possui uma biblioteca com diferentes propriedades de materiais para utilização.

A Tab. 1 mostra os principais casos que foram simulados para validação das equações. Uma modelagem 2D axissimétrica foi utilizada por poder resolver o modelo adotado de forma mais ágil que um modelo completo tridimensional. O modelo 2D axissimétrico consiste em um eixo simétrico, um lado do modelo é desenhado de forma com que este rotacione 360° em torno do eixo. Para os casos reproduzidos em 2D, o maior número de graus de liberdade foi obtido para o caso 3, sendo este igual a 136810, ou seja, aproximadamente 44 vezes menor que o número encontrado para o caso em 3D. A Fig. 10 mostra apenas um único lado do modelo do Caso 1.

Para todos os casos analisados, a bobina foi conduzida por uma corrente contínua de $I = 1A$, para um faixa de frequência de 10^3 a 10^6 Hz. A indutância da espira foi calculada através do fluxo magnético total criado pela corrente passante na espira, ou seja, para todos os casos as bobinas em análise são emissoras.

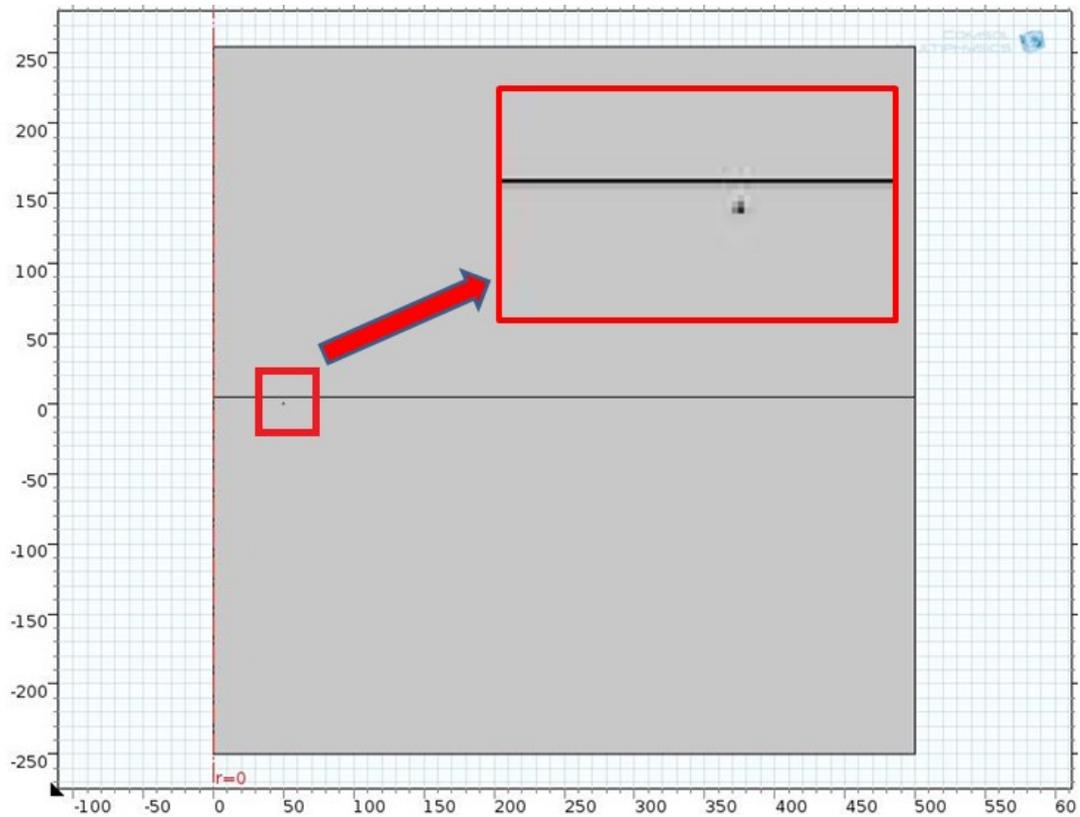


Figura 10 - Vista 2D axissimétrica

No Caso 1 foi abordado o efeito de uma lâmina de alumínio posicionada acima da bobina, ou seja, a espessura da lâmina foi a variável principal do caso analisado. Uma lâmina de alumínio com largura de 0,012 mm foi posicionada a uma distância de 4,5 mm da bobina. A bobina possui apenas uma espira e raio interno de 50 mm. A Fig. 11 mostra a vista 2D Neste caso também foi abordado o efeito de uma camada de alumínio semi infinita acima da bobina.

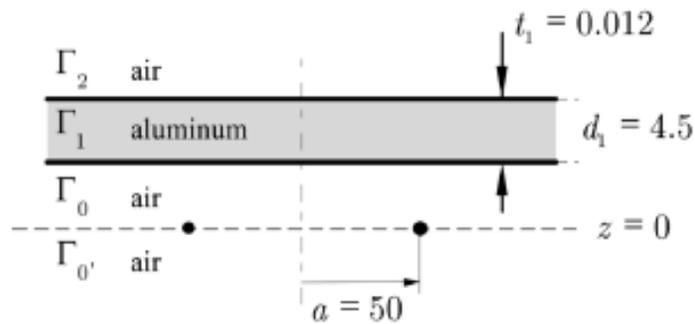


Figura 11 - Vista 2D (Acero,2006)

A Fig. 12 mostra o gráfico da indutância pela frequência de acordo com Acero (2006). Nota-se que a indutância alcança melhores resultados com a presença da lâmina de alumínio com espessura limitada do que com a lâmina de alumínio semi infinita, o que significa que pode ser obtido um aprimoramento da dissipação de energia selecionando adequadamente a espessura do material condutor. Para obtenção do gráfico da Fig. 12 foram utilizadas as Equações (3.1) e (3.2).

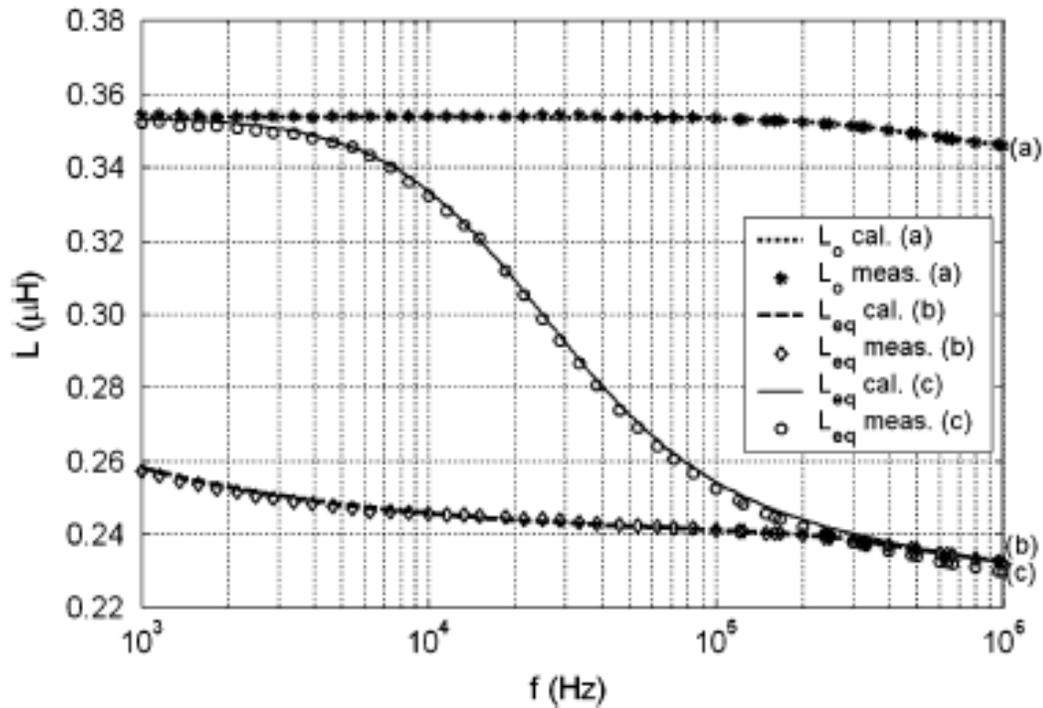


Figura 12 - (a) Bobina não carregada; (b) Lâmina de alumínio semi infinita posicionada acima da bobina; (c) Lâmina de alumínio com espessura de 3mm posicionada acima da bobina

As Figs. 13, 14 e 15 mostram os gráficos obtidos no software Comsol[®] para os casos a, b e c, respectivamente. Verifica-se que os valores obtidos são coerentes com o artigo utilizado como referência (Acero, 2006). Na Fig. 13 para a frequência de 10³ Hz, foi obtido um valor de 0,354 μH para a indutância, e para a frequência de 10⁶ Hz foi obtido um valor de aproximadamente 0,344 μH para a indutância. Com a finalidade de realizar as simulações em um menor intervalo de tempo, foram utilizados poucos pontos de frequência, o que explicam os gráficos obtidos variarem linearmente.

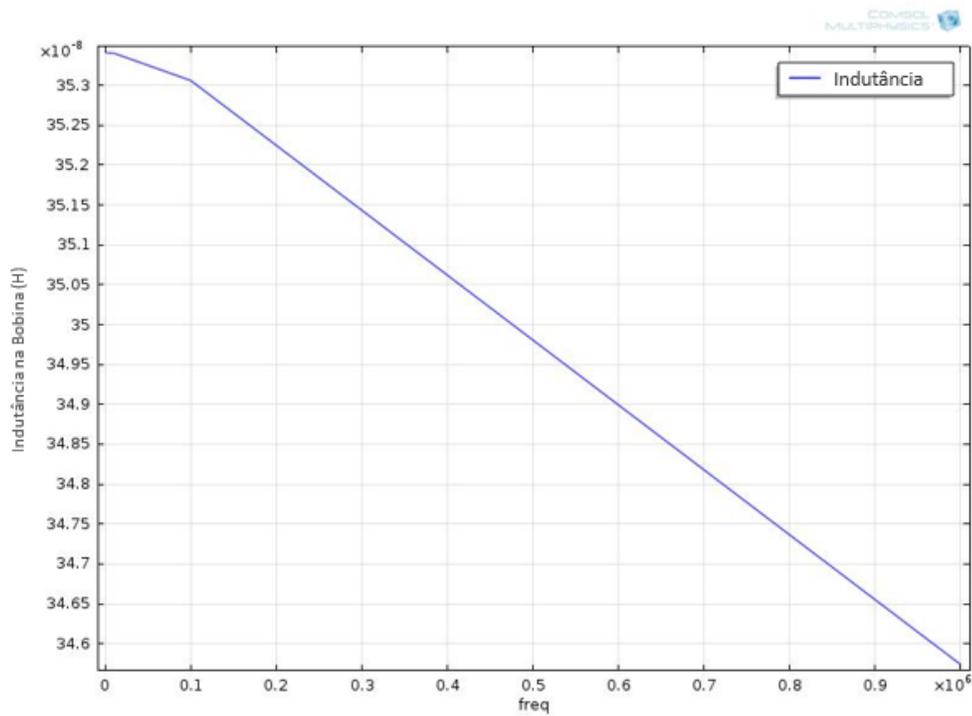


Figura 13 - Indutância x frequência para a bobina não carregada

A Fig. 14 mostra o resultado obtido para o caso b. Para a frequência de 10^3 Hz, foi obtido um valor de aproximadamente $0,26 \mu\text{H}$ para a indutância, e para a frequência de 10^6 Hz foi obtido um valor de aproximadamente $0,232 \mu\text{H}$ para a indutância.

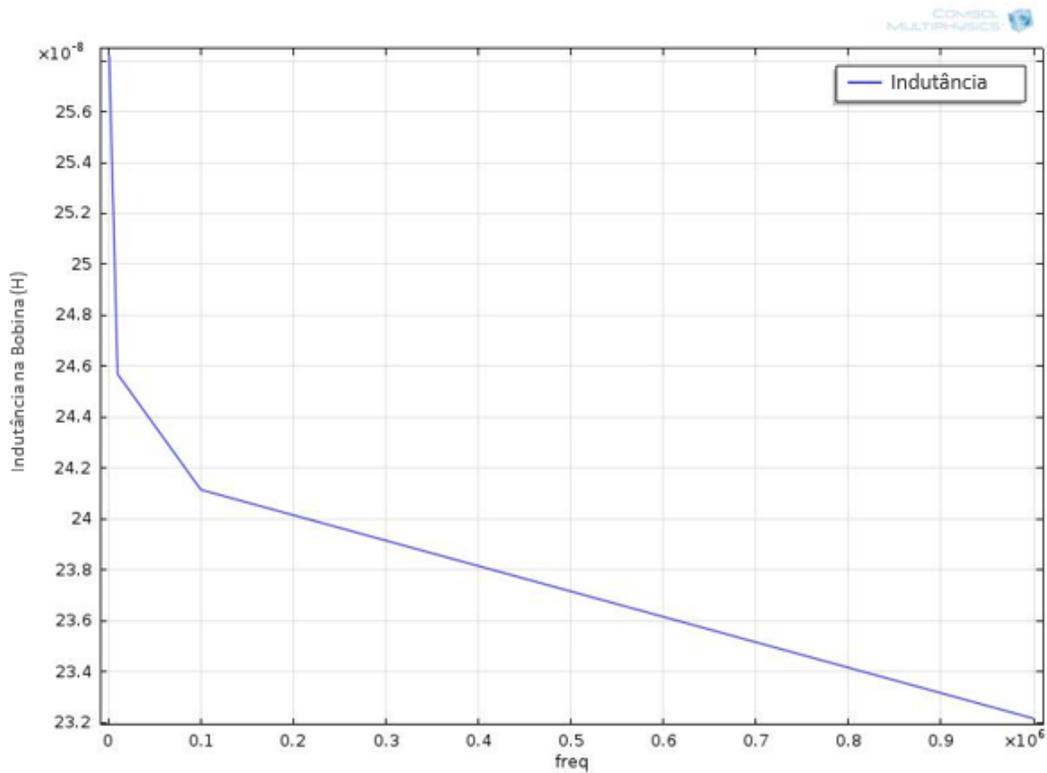


Figura 14 – Indutância x frequência para lâmina de alumínio semi infinita posicionada acima da bobina

A Fig. 15 mostra o resultado obtido para o caso c. Para a frequência de 10^3 Hz, foi obtido um valor de aproximadamente $0,36 \mu\text{H}$ para a indutância, e para a frequência de 10^6 Hz foi obtido um valor de aproximadamente $0,23 \mu\text{H}$ para a indutância. Conclui-se que quando é utilizada uma lâmina com espessura limitada, é possível otimizar esta espessura com o objetivo de se obter um determinado valor de indutância.

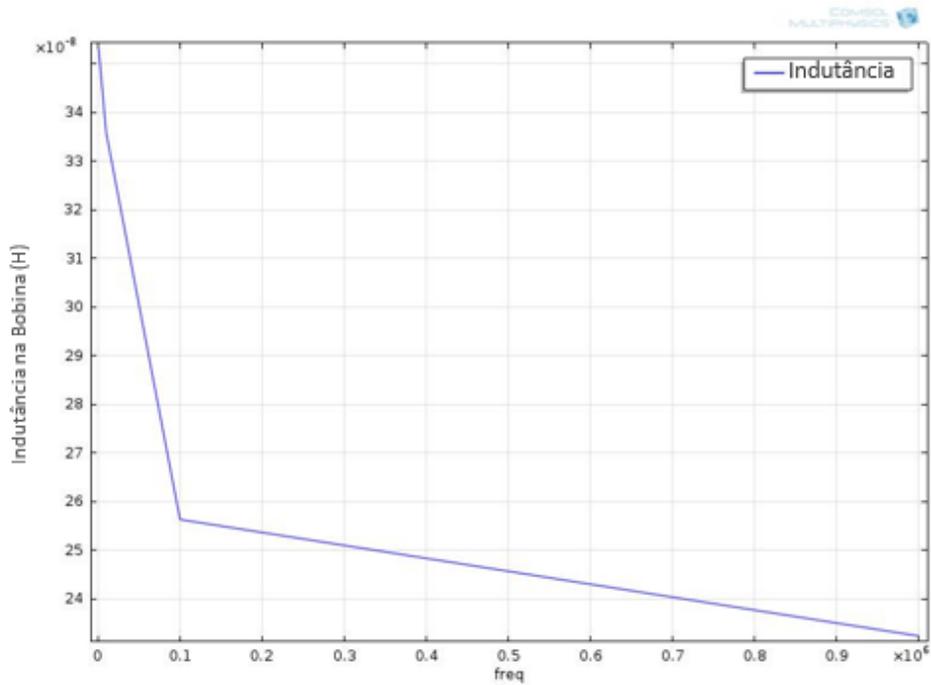


Figura 15 – Indutância x Frequência para lâmina de alumínio com espessura de 3mm posicionada acima da bobina

Para validação das Equações (3.1) e (3.2) também foi verificado a indutância equivalente em função da condutividade para os casos a e c. Verifica-se que o valor obtido quando a condutividade é menor corresponde a indutância da bobina inserida no ar. Aumentando a condutividade, as correntes induzidas pelo material se tornam mais efetivas reduzindo o fluxo magnético. Observa-se também que a camada de alumínio com espessura de 3 mm oferece melhor indutância em determinados valores de condutividade. De acordo com Acero (2006), quanto menor o valor da camada de alumínio, melhor os valores encontrados para a indutância.

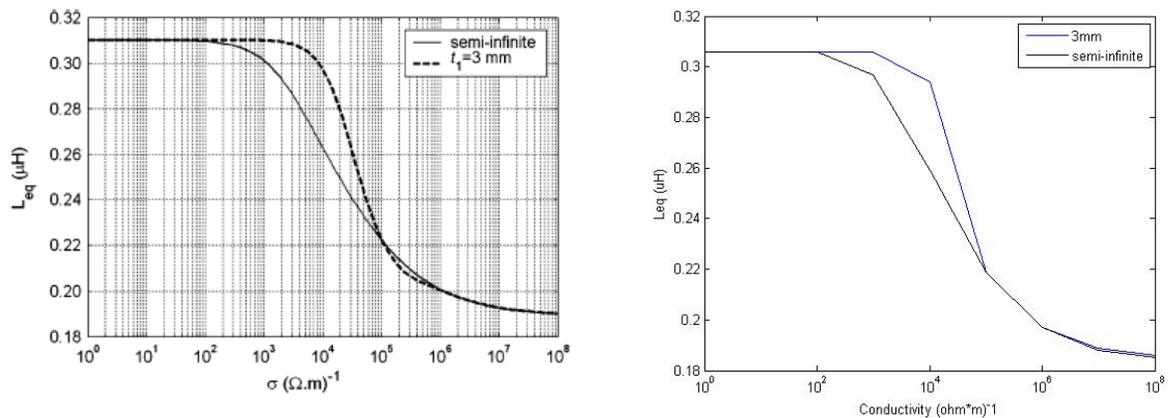


Figura 16 - (a) Acero (2006); (b) Resultado obtido das equações analíticas no Matlab®.

3.2.2 Caso 2

No Caso 2, uma camada semi infinita, em modelo sanduíche (posicionada acima e abaixo da bobina), com uma bobina de 1 volta, foi simulada. O material utilizado para a camada superior foi alumínio, enquanto o material da camada inferior foi ferrita. (veja Fig. 17)

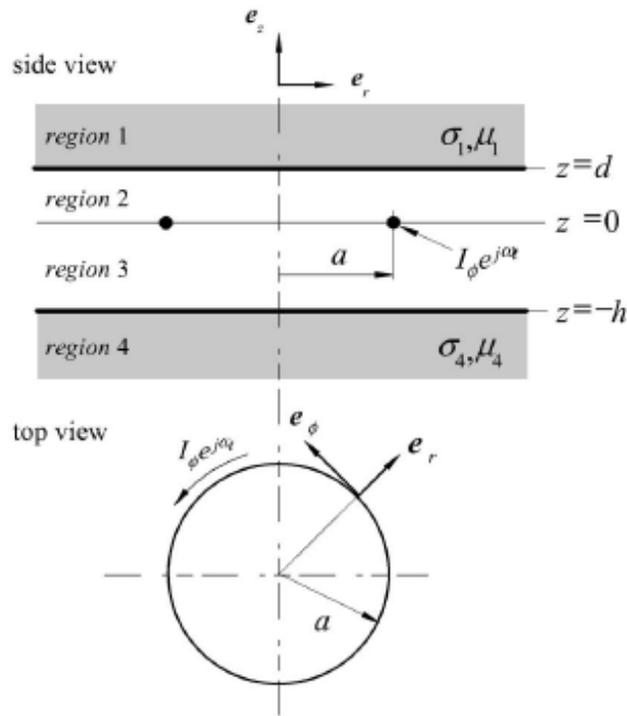


Figura 17 - Vista 2D para o caso 2

De acordo com Acero (2006), verifica-se que para a camada semi infinita de ferrita foram utilizadas as propriedades do material 3C90. A permeabilidade deste material se dá através de um número complexo, e a variação é maior em altas frequências (veja Fig. 18). A ferrita, além de ser um material que tem a capacidade de aumentar a indutância, também é um escudo efetivo para variação de campo magnético. Assim, as ferritas evitam o aquecimento de elementos metálicos, como chassis, suportes ou caixas nas quais as bobinas podem ser alojadas.

$$\mu_{r1'} = \mu' - j\mu'' \quad (3.2.1)$$

onde μ' é a parte real da frequência e μ'' a parte complexa.

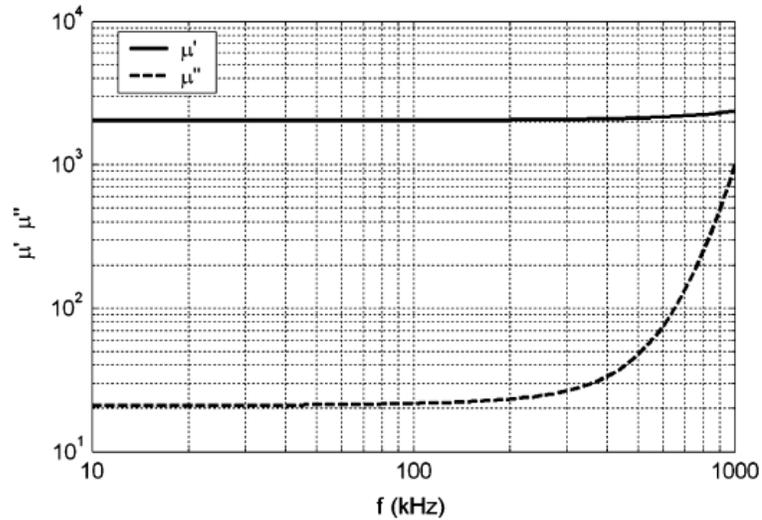


Figura 18 - Permeabilidade complexa x frequência da ferrita (3C90)

Para simplificação dos resultados não foi utilizado na análise das equações a permeabilidade complexa da ferrita, adotou-se um valor específico para a permeabilidade, 10^4 , e comparou-se os resultados obtidos no Matlab® e Comsol® (veja Fig. 19). Verifica-se que os resultados obtidos são muito próximos, o que comprova a validação das Equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4).

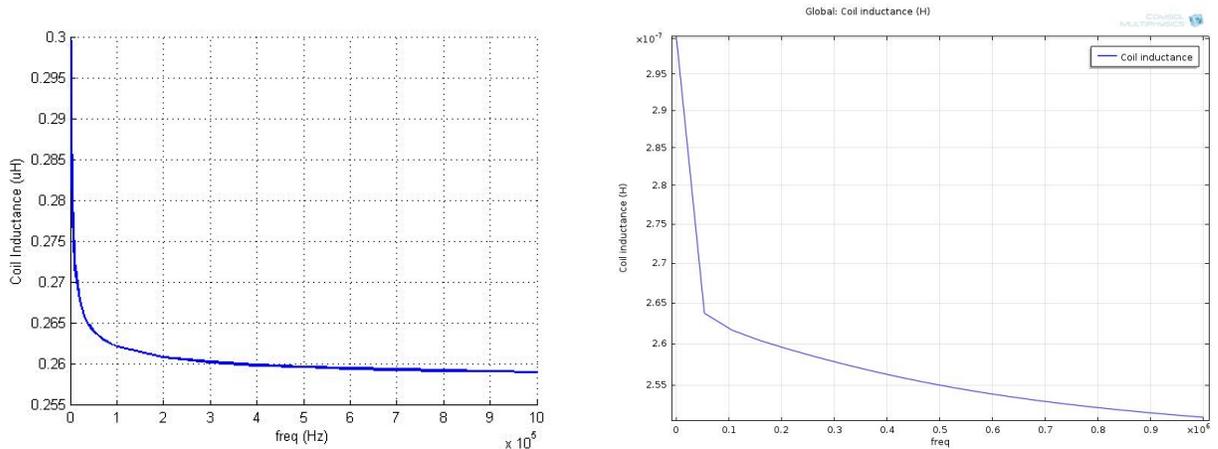


Figura 19 - (a) Resultado obtido no Matlab®; (b) Resultado obtido no Comsol®

3.2.3 Caso 3

No Caso 3, foi simulado um modelo de uma camada semi-infinita posicionada acima e abaixo de uma espira de 23 voltas. As Figs 20 e 21 mostram a densidade do fluxo magnético em 2D e 3D, respectivamente.

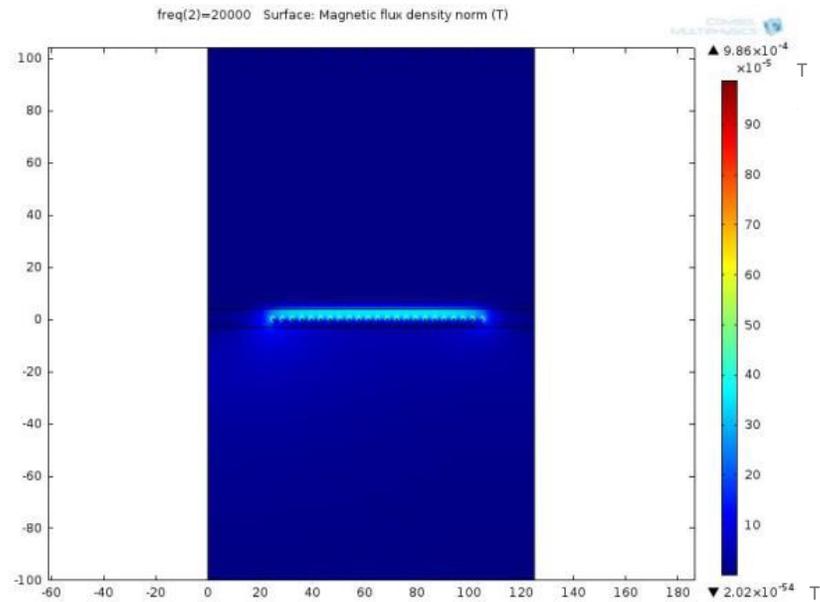


Figura 20 - Densidade de Fluxo Magnético – 2D

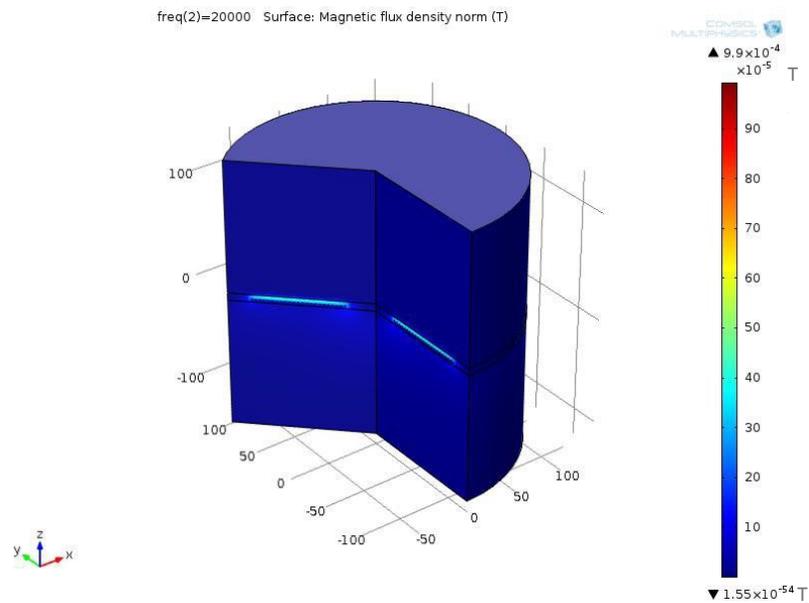


Figura 21 - Densidade do Fluxo Magnético - 3D

Com todas as equações apresentadas no item 3.0 neste trabalho validadas para os Casos 1 e 2, os resultados obtidos para o Caso 3 também foram satisfatórios. A Fig. 22 mostra o resultado da indutância pela frequência obtido no Comsol®, e a Fig. 23 mostra o resultado da resistência pela frequência obtido no Matlab®. Na Fig. 23 verifica-se que a resistência aumenta à medida que a frequência aumenta, resultado condizente com o apresentado em Acero (2006).

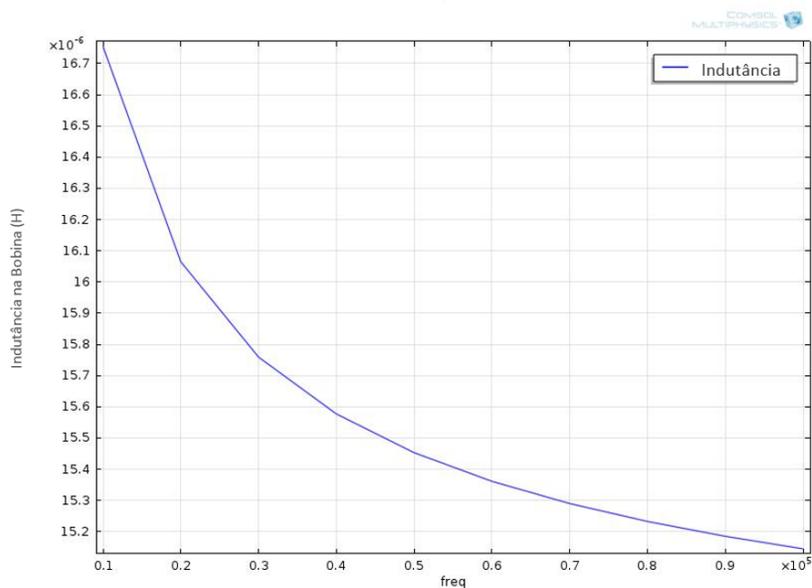


Figura 22 - Indutância x Frequência para o caso 3

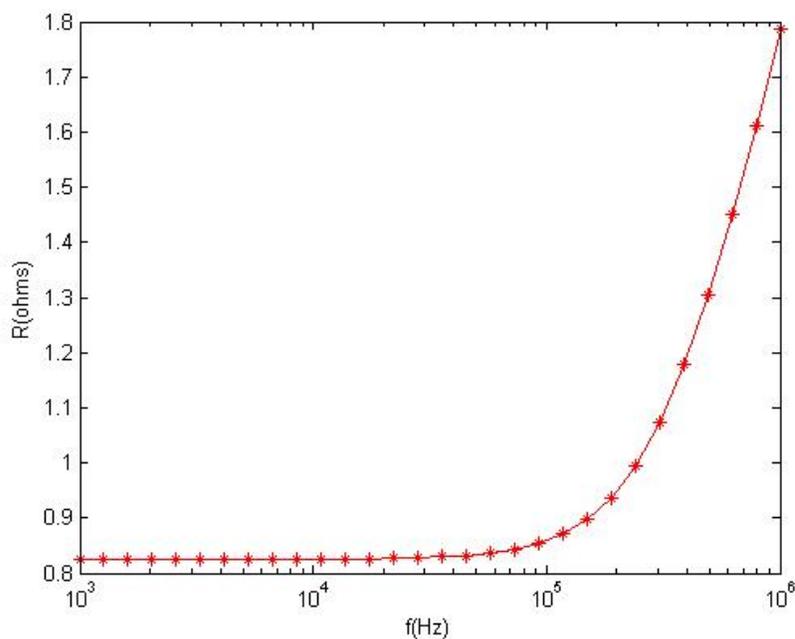


Figura 23 - Resistência x Frequência para o caso 3

4. Conclusões

Todas as equações analíticas foram verificadas e reproduzidas utilizando o Método de Elementos Finitos. Utilizando as equações verificadas, as considerações para o projeto podem ser levadas em conta para uma possível otimização do sistema e construção do modelo experimental.

No Caso 1 observou-se a influência positiva da utilização de lâminas com espessura limitada no valor da indutância. Variando a frequência de 10^3 a 10^6 , para o meio semi infinito de ar e alumínio posicionado acima da bobina, obteve-se uma variação de indutância de apenas $0,1$ e $0,2 \mu H$, respectivamente (veja Fig. 12). Porém, para a lâmina com espessura de 3 mm, obteve-se uma variação significativa de aproximadamente $0,10 \mu H$ (veja Fig. 12). Conclui-se que a utilização de lâminas de materiais condutores com espessura limitada é ideal devido ao fato de que estas possibilitam encontrar um valor de indutância específico para determinadas frequências.

No caso 2 observou-se os benefícios da utilização da ferrita no sistema. A ferrita, além de ser um material que tem a capacidade de aumentar a indutância, também é um escudo efetivo para variação de campo magnético. Assim, as ferritas evitam o aquecimento de elementos metálicos, como chassis, suportes ou caixas nas quais as bobinas podem ser alojadas. Observou-se o aumento da indutância quando a ferrita foi utilizada. Para o caso 1, quando uma lâmina semi infinita foi posicionada acima da bobina, obteve-se uma indutância de $0,26 \mu H$ (veja Fig. 14). Para o caso 2, quando uma lâmina semi infinita de ferrita foi adicionada abaixo da espira, obteve-se um valor de $0,3 \mu H$ (veja Fig. 19).

Também se conclui que a medida que o número de espiras da bobina aumenta, a indutância também aumenta. Para a bobina não carregada de apenas uma volta foi obtida uma indutância de aproximadamente, $35,4 \times 10^{-8} H$, para a frequência de 10^3 Hz (veja Fig. 13). Entretanto, para a bobina de 23 voltas, foi obtido uma indutância de aproximadamente, $16,75 \times 10^{-6} H$ para a mesma frequência (veja Fig. 22).

Com as equações de indutância e resistência validadas, o estudo de carros elétricos com tecnologia WPT podem ser iniciados, tendo em vista que são encontrados poucos artigos na literatura brasileira e internacional. Desta forma, este trabalho cumpre seu objetivo, trilhando um pequeno caminho para que futuros interessados continuem esta linha de pesquisa.

O conceito de Wireless Power Transfer (WPT) pode trazer os carros elétricos para enfoque no futuro. Tendo em vista que estes veículos serão recarregados em movimento, o peso da bateria

poderá ser reduzido considerando que o armazenamento de energia poderá ser menor, reduzindo peso e custo dos carros elétricos.

Referências Bibliográficas

Hoyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2), 63-71.

Struben, J., Sterman, J. D. (2008). Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(6), 1070-1097.

INSTITUTO DE FÍSICA, Universidade de Brasília. Bobina de Testa. Website: <http://www.fis.unb.br/>. Acessado em: 15 de Junho de 2017.

MARQUES, G. C. Eletromagnetismo, A lei de Ampère, 2014.

Acero, J., Alonso, R., Barragán, L. A., Burdio, J. M. (2006) "Modeling of planar spiral inductors between two multilayer media for induction heating applications." *IEEE transactions on magnetics*, 42(11), 3719-3729.

INERGIAE. Website: <http://inergiae.com.br>. Acessado em: 15 de Junho de 2017

Baran, R., Legey, L. F. L. (2011) Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.

Rim, C. T., Mi, C. (2017) "Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices." John Wiley & Sons.

A. Hariri, A. Elsayed, O. A. Mohammed (2007), "An Integrated Characterization Model and Multiobjective Optimization for the Design of an EV Charger's Circular Wireless Power Transfer Pads," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.