



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE

Recuperação de Energia Magnética de Linhas de Transmissão Visando Iluminação de Esferas de Sinalização

Tagleorge Marques Silveira

Orientadores:
Glauco Fontgalland
Benedito Antonio Luciano

Campina Grande, julho de 2018.



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE

Recuperação de Energia Magnética de Linhas de Transmissão Visando Iluminação de Esferas de Sinalização

Tagleorge Marques Silveira

Dissertação apresentada à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores:
Glauco Fontgalland
Benedito Antonio Luciano

Campina Grande, julho de 2018.

S587r

Silveira, Tagleorge Marques.

Recuperação de energia magnética de linhas de transmissão visando iluminação de esferas de sinalização / Sandra de Queiroz Rangel. – Campina Grande, 2018.

60 f. : il. color.

Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Glauco Fontgalland, Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano".

Referências.

1. Bobina Indutiva. 2. Recuperação de Energia Magnética. 3. Esferas de Sinalização Para Aeronaves. 4. Linhas aéreas de Transmissão de Energia elétrica. 5. Conversão eletromagnética. I. Fontgalland, Glauco. II. Luciano, Benedito Antonio. III. Título.

CDU 621.318(043)

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO BIBLIOTECÁRIO ITAPUANA SOARES
DIAS CRB = 15/93**



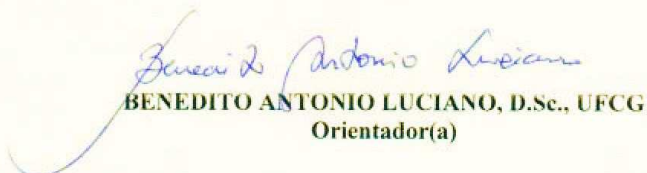
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE

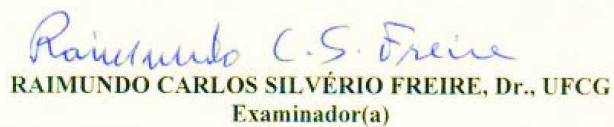
**"RECUPERAÇÃO DE ENERGIA MAGNÉTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
VISANDO ILUMINAÇÃO DE ESFERAS DE SINALIZAÇÃO"**

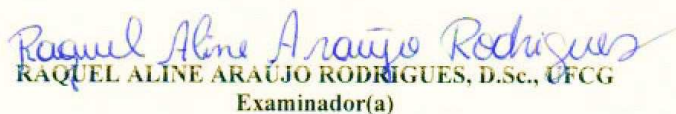
TAGLEORGE MARQUES SILVEIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/07/2018


GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador(a)


BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)


RAQUEL ALINE ARAÚJO RODRIGUES, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao Grande Arquiteto do Universo, por iluminar meus passos durante esse mestrado, em seguida ao apoio dado: pelo meu pai José Almir Silva Silveira, minha mãe Aleluia Maria Marques Silveira, as minhas irmãs: Tamila Marques Silveira e Tabla Marques Silveira e demais familiares, dos Iir.: das AA.: RR.: LL.: SS.: Liberdade – Mossoró/GLERN e Regeneração Campinense – Campina Grande/GLEPB e dos empresários Antonio Aécio da Silva através da Marujo Produções e de Onezio Oliveira Freire através da Objetiva Locações e Entretenimentos.

Nesta caminhada vários obstáculos surgiram e foram superados, com o auxílio dos meus orientadores e professores: PhD. Glauco Fontgalland e Dr. Benedito Antonio Luciano, não podendo deixar de citar: meus companheiros feis do Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicadas - LEMA:

- Eng. Luis Alves Correia Filho – Mestrando PPgEE UFCG;
- Eng. Raymundo de Amorim Junior – Mestrando PPgEE UFCG;
- Eng. Vinicius Uchoa Oliveira – Mestrando PPgEE UFCG;
- Eng. Joao Rubens Alves Zacarias – Mestrando PPgEE UFCG;
- Eng. Gustavo Gonçalves de Sousa Forte – Mestrando PPgEE UFCG;
- Eng. MSc. Alexandre H. S. De Oliveira – Doutorando PPgEE UFCG;
- MSc. Priscilla Kadja Pontes de Melo – Doutoranda PPgEE UFCG;
- Eng. MSc Galba Falcão Aragão Melo – Doutorando PPgEE UFCG;
- MSc. Nieremberg Jose P. de Lyra Ramos – Doutorando PPgEE UFCG;
- Yves Clemente Dantas Reis – Graduação EE UFCG;
- Samuel Vinicius Medeiros de Araujo – Graduação EE UFCG;
- Pedro Paulo Ferreira do Nascimento – Graduação EE UFCG;
- E tantos outros amigos e colegas.

Dos professores:

- Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA;
- Dr. Walter Martins Rodrigues – UFERSA;
- Dr. Augusto Carlos Pavão – UFERSA;
- Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire – UFCG;
- Dra. Raquel Aline Araújo Rodrigues – UFCG;
- Dr. Wamberto José Lira de Queiroz – UFCG;

- MSc. Rômulo Raimundo Maranhão do Valle – UFCG;
- Dr. Marcelo Sampaio de Alencar – IECOM.

Agradeço também a colaboração nos amigos, professores e colegas dos laboratórios:

- IECOM – Instituto de Estudo Avançados em Comunicações - UFCG;
- LIMC – Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas – UFCG;
- LabMet - Laboratório de Metrologia – UFCG.

"Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas."

Steve Jobs

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Densidade de fluxo magnético B proveniente de uma corrente elétrica I_1	20
Figura 2: Projeto 3D da bobina de recuperação de energia (a) e o circuito magnético equivalente (b). 21	21
Figura 3: Características geométricas do núcleo.....	22
Figura 4: Fluxograma do algoritmo.....	26
Figura 5: Curva de magnetização.....	27
Figura 6: Relação λ e I , energia com a coenergia.....	27
Figura 7: Bobina de recuperação de energia no formato semitoroidal.	29
Figura 8: Gráfico de comparação das correntes induzidas, através da recuperação de energia feita pela bobina, para uma carga de 500 ohms.....	30
Figura 9: Bobina de colheita de energia (1), em formato toroidal com dois entreferros (2), núcleo ferromagnético (3), que será acoplada a uma linha de transmissão (4).....	32
Figura 10: Bobina de colheita de energia ‘1’, em formato toroidal retangular com núcleo de liga nanocristalina ‘2’ sendo acoplada em linha de transmissão ‘3’.....	33
Figura 11: Bobina experimental de colheita de energia com núcleo nanocristalino.	34
Figura 12: Cenário experimental elaborado	34
Figura 13: Corrente obtida para uma tenção de 24 V no secundário, conforme valores de potência obtida na Tabela VI, exceto o ar.	36
Figura 14: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com duplo condutor nas fases, visualização interna e externa.....	37
Figura 15: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com condutor triplo nas fases, visualização interna e externa.....	38
Figura 16: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com condutor quádruplo nas fases, visualização interna e externa.....	39
Figura 17: Simulação da potência recuperada, para bobinas de mesmo perímetro e números de espiras, alterando o seu formato de seção transversal – circular e retangular.	39
Figura 18: Visualização de forma ampliada para a situação da bobina de recuperação de energia com espira de 20 voltas – corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto.....	41
Figura 19: Comparação da corrente de curto-circuito do secundário em relação a corrente que flui no primário, simulação X experimental.	42
Figura 20: Comparação da tensão de circuito aberto do secundário em relação a corrente que flui no primário, simulação X experimental.	43
Figura 21: Fluxograma do sistema de condicionamento de energia.	45
Figura 22: LED para a esfera de sinalização.	46
Figura 23: Corrente lida pelo amperímetro A_1 , conforme regulação de 24 V.	47

RESUMO

As linhas de transmissão são elementos fundamentais na interligação das redes básicas nos sistemas elétricos. Por questões normativas e de segurança, tais linhas devem possuir esferas de sinalização em alguns de seus trechos para ajudar os pilotos de aeronaves na visualização da presença desses obstáculos. As atuais esferas de sinalização utilizadas não aproveitam o potencial de captação da energia magnética cujas instalações em linhas de transmissão podem propiciar. Assim, esta dissertação tem como objetivo projetar e testar um sensor magnético com espiras em formato toroidal para recuperação da energia magnética no em torno dos condutores de fase da linha de transmissão. Inicialmente, foi realizado um levantamento de trabalhos científicos que aplicam as equações de Maxwell, e de estudos concernentes ao tema proposto e normas técnicas que estão em vigor. As normas técnicas NBR - 5422 e 7276 não proíbem a instalação das esferas de sinalização nos condutores de fase, apenas determinam que no mínimo o condutor de maior altitude deve ser sinalizado. Com o auxílio de um algoritmo escrito no ambiente do programa MATLAB, diferentes simulações de bobinas de recuperação de energia foram executadas. De forma a verificar a eficácia do algoritmo, foram realizados experimentos no Laboratório de Metrologia – LabMet/UFCG. Foram analisadas as repostas na região de linearidade da sua curva de magnetização para a recuperação de energia magnética utilizando um núcleo de liga nanocristalina. Realizou-se ainda simulações com bobinas de seções retangulares e circulares. Os resultados foram posteriormente comparados com as simulações.

Palavras-chave: Recuperação de energia magnética. Bobina indutiva. Esferas de sinalização para aeronaves. Linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Conversão eletromagnética.

ABSTRACT

The transmission lines are fundamental elements in the interconnection of the basic networks in the electrical systems. For safety and regulatory purposes, such lines should have signaling beads in some of their sections to assist aircraft pilots in visualizing the presence of such obstacles. The current signaling spheres used do not take advantage of the potential for capturing the magnetic energy whose installations on transmission lines can provide. Thus, this dissertation aims to design and test a magnetic sensor with turns in toroidal format to recover the magnetic energy in around the phase conductors of the transmission line. Initially, a survey was carried out of scientific papers that apply the Maxwell equations, and studies concerning the proposed theme and technical norms that are in force. Technical standards NBR - 5422 and 7276 do not prohibit the installation of signaling beacons on phase conductors, they only determine that at least the highest - level driver must be signaled. With the aid of an algorithm written in the environment of the MATLAB program, different simulations of energy recovery coils were executed. In order to verify the efficiency of the algorithm, experiments were carried out in the Laboratory of Metrology - LabMet / UFCG. The responses in the linearity region of its magnetization curve for the recovery of magnetic energy using a nanocrystalline alloy core were analyzed. Simulations were performed with coils of rectangular and circular sections. The results were later compared with the simulations.

Keywords: Energy harvesting. Inductive coil. Aircraft warning spheres. High voltage transmission line. Electromagnetic conversion.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	12
1.1. <i>Justificativa.....</i>	<i>14</i>
1.2. <i>Objetivos.....</i>	<i>14</i>
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1. <i>Equações de Maxwell</i>	<i>18</i>
3.2. <i>Aplicação das Equações de Maxwell no Contexto da Recuperação de Potência Eletromagnética.....</i>	<i>20</i>
3.3. <i>Energia e Coenergia</i>	<i>26</i>
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	29
4.1. <i>Projeto para o Caso Ideal</i>	<i>29</i>
4.2. <i>Projetos para o Caso Real – Validação do Algoritmo</i>	<i>32</i>
4.3. <i>Projeto de Bobina para Linha de Transmissão de 230 kV.....</i>	<i>34</i>
4.4. <i>Projeto de Bobina para Linha de Transmissão EAT e UAT.....</i>	<i>37</i>
CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
CAPÍTULO 6: CIRCUITO CONDICIONADOR DE ENERGIA.....	45
6.1. <i>LED – Diodo Emissor de Luz</i>	<i>46</i>
6.2. <i>Análise do Circuito Condicionador de Energia</i>	<i>47</i>
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXO I: ALGORITMO ELABORADO – ESTRUTURA BASE	55
ANEXO II: PRODUÇÕES CIENTÍFICAS	57

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O termo colheita de energia ou recuperação de energia é uma tradução da expressão inglesa “*energy harvesting*”. Assim a ideia de recuperar energia não é nova. Ela remonta ao ano de 1826, quando Thomas Johann Seebeck descobriu uma forma de converter energia térmica em energia elétrica, utilizando para tal um circuito constituído de dois fios metálicos de materiais distintos mantidos em temperaturas diferentes.

Além da conversão termoeletrica citada, dependendo da fonte primária, exemplos de colheita de energia podem ser encontrados em várias aplicações, tais como: sistemas de comunicação sem fio “*wireless*”, sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos, implantes biomédicos, transdutores eletromecânicos, sensores de presença e balanças baseadas no efeito piezoeletrico.

Fisicamente, a potência transferida para a carga é limitada pela energia disponível oriunda da fonte primária, da eficiência do transdutor e do sistema de conversão. Se a potência requerida pela carga no uso final for inferior à energia recuperada, o sistema eletrônico pode operar de forma contínua. Caso contrário, a operação deve ser descontínua e o tempo entre as operações dependerá da capacidade de armazenamento de energia no sistema.

Em termos práticos, o desenvolvimento de sistemas de recuperação de energia eficientes envolve conhecimentos multidisciplinares de físicos, biólogos, matemáticos, engenheiros eletrônicos, engenheiros de materiais, engenheiros mecânicos, engenheiros químicos, metalurgistas e engenheiros de computação, além de investimentos em bons laboratórios e formação de pesquisadores competentes.

No ambiente acadêmico, como também em áreas extra-acadêmica, trabalhos de pesquisas, teses, dissertações sobre recuperação de energia têm sido realizados e publicados, com destaque para os casos envolvendo de redes de sensores sem fio, dispositivos bioinspirados, energia proveniente da atividade humana e animal, energia de micro-ondas, ligas com memória de forma e aproveitamento das ondas eletromagnéticas em baixas, médias e altas frequências.

Efetivamente, os avanços nesse campo de pesquisa e o desenvolvimento de novos dispositivos recuperadores de energia se devem, em larga escala, aos progressos da microeletrônica e da nanotecnologia, resultando na fabricação de dispositivos que necessitam de pouca quantidade de energia para o seu funcionamento.

Assim, como as fontes primárias de energia disponíveis no meio ambiente são diversas e os dispositivos conversores desenvolvidos para a recuperação de energia também são, pesquisadores em todo o mundo continuam mobilizados no sentido de desenvolver método e formas mais eficientes.

Neste contexto, partindo do conceito geral da colheita de energia para uma aplicação específica, esta dissertação foi desenvolvida. Tal aplicação consiste no aproveitamento da energia magnética produzida pela corrente elétrica no entorno das fases de uma linha de transmissão de energia elétrica para converter a energia magnética originalmente dispersa pelo ar em energia elétrica capaz de alimentar um conjunto de LED a serem instalados em esferas de sinalização [1].

Em termos estruturais, esta dissertação está disposta da seguinte maneira: no capítulo 1 é apresentada a introdução; o capítulo 2 descreve uma revisão bibliográfica, procurando estabelecer o estado da arte sobre o tema enfocado; No capítulo 3 é mostrada a fundamentação teórica acerca dos temas abordados; No capítulo 4 é exposta a metodologia utilizada na realização do presente trabalho; No capítulo 5 são mostrados os resultados experimentais obtidos; No capítulo 6 é mostrado os parâmetros e projeto do circuito retificador; por fim são apresentadas as conclusões e as referências utilizadas.

1.1. Justificativa

A motivação no estudo da recuperação de energia de campos eletromagnéticos dispersos em linhas de transmissão tem se expandido entre diversos pesquisadores devido à necessidade de alimentação de sensores e equipamentos que auxiliam na segurança das linhas, pois em eventuais faltas de energia, os custos dessas interrupções além de gerar desconforto pelo não fornecimento de energia, também ocasionam muitas elevadas [2] e [3].

As interrupções de energia elétrica são eventualmente ocasionadas por: intempéries, colisões de aeronaves e aves migratórias, que por sua vez tornam instáveis as transmissões elétricas. A incapacidade do Sistema Interligado Nacional – SIN (constituído pelas linhas de transmissão em operação no Brasil) de fornecer mais cargas elétricas aos centros consumidores também prejudica este quadro, evidenciado por diversas falhas ocorridas, conforme [4], [5] e [6].

Em projeção futura, devido ao crescente número de aplicações de pequenos veículos aéreos controlados por radiofrequência - Drones e/ou Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs, o espaço aéreo será mais densamente preenchido. Logo, tais aeronaves poderão ser um fator preocupante para a segurança das linhas, uma vez que as mesmas poderão colidir, ocasionando grandes prejuízos, assim a esfera proposta através de um sistema de comunicação RF poderá orientar tais veículos aéreos [7].

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo projetar e testar um sensor magnético com espiras em formato toroidal em escalas de laboratório e projeção real, para recuperação de energia com aplicação em esferas de sinalização, utilizadas pelo menos em uma das fases, das linhas de transmissão.

Outro objetivo pretendido é conseguir a máxima eficiência na recuperação da energia para futuras aplicações, como, as das patentes registradas no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual – INPI, [1] e [7], projetando assim um sensor magnético capaz de suprir essas aplicações.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao observar a cadeia ecológica, percebe-se que a colheita de energia é a base para a vida terrestre. Em sua fonte primária, o Sol, ao iluminar a superfície terrestre, aquece e transfere energia para o planeta, nuvens se formam e chuvas remanesçam da mudança de estado, e raios solares propicia energia para os vegetais com o processo da fotossíntese [8].

No princípio da existência humana, suas necessidades eram basicamente para satisfazer a alimentação, porém com a evolução humana, outras fontes de energia são descobertas: fonte de iluminação noturna utilizando a queima de corpos sólidos, e, assim o fogo [9]; desenvolvimento da agricultura e da pecuária que otimizaram a colheita de energia armazenada em animais de criação e alimentos cultivados [10]; o uso do vento em barcos a vela amplamente utilizado no antigo império 3000 antes de Cristo - A.C., e, outros avanços referente a estudos de processos naturais ou produzidos pelo homem.

Pelos estudos de [11], o vento, fenômeno natural, é uma forma indireta da energia solar, sendo resultante da movimentação do ar quente que sobe nas regiões equatoriais e se desloca para as regiões polares, tendo uma dinâmica permanente. Na antiguidade, 644 A.C., sociedades como a Chinesa e a Persa empregavam o uso da energia dos ventos em moinhos, para moagem de grãos, sal e irrigação pelo bombeamento da água [12], porém o aumento notório da eficiência das máquinas foi graças a James Watt, o qual aprimorou o forjamento de cilindros retilíneos, sendo possível a utilização de vapor, a máquina em questão tinha 20 Cavalo Vapor – CV, tendo sua utilização em minas de carvão.

Assim, com a utilização das máquinas a vapor um olhar mais aguçado sobre o movimento alternado e linear do embolo da máquina em movimentos giratórios permitindo o estudo de outras produções maquinarias como navios locomotivas, serrarias, cerâmicas, drenagens, e, etc., conduzindo a Inglaterra a ser a primeira nação industrial do planeta [13]. Com a Revolução Industrial, iniciou a era dos combustíveis fósseis, a lenha foi substituída pelo carvão mineral, até 1961, e, com a descoberta do petróleo em 1859 por Edwin Drake em Tutsville, Estados Unidos da América – EUA, a uma profundidade de 21 metros. Assim, nasce a indústria petroquímica em 1930, possibilitou que vários subprodutos como gás liquefeito, gasolinas, naftas, óleo diesel, querosenes, óleos combustíveis, asfaltos, lubrificantes, solventes, parafinas, coque de petróleo e resíduos indiciam fontes de energia renováveis [13].

As crises do petróleo em 1973 e 1978 desencadearam a reconsideração política internacional em relação a investimento em fontes alternativas de energia, tendo os conflitos no

Oriente Médio intensificados, quais são os maiores detentores de reservas petrolíferas, e pelos impactos ambientais gerados na exploração e uso intenso deste recurso por várias nações [8].

Em paralelo à descoberta do petróleo e à primeira Revolução Industrial, começou-se a desenvolver as telecomunicações, sendo um dos pioneiros, o brasileiro, cientista e Padre católico Roberto Landell de Moura, o qual conseguiu a transmissão de som e sinais telegráficos sem fio por meio de ondas eletromagnéticas, assim o início do telefone e o rádio, além das contribuições de outros pesquisadores na área como Guglielmo Marconi, Nikola Tesla [15].

Por sua vez, na área de geração e transmissão de energia elétrica, conforme os estudos de Farias e Sellitto [8], em 1882, Thomas Edison construiu as primeiras usinas geradoras em Corrente Contínua – CC, para atendimento de sistemas de iluminação. Já em 1886, foi feita a primeira transmissão de energia elétrica em Corrente Alternada – CA, por George Westinghouse; utilizando a CA e os sistemas polifásicos desenvolvidos por Nikola Tesla, em conjunto com o transformador eficiente de Willian Stanley, proporcionaram a transmissão a grandes distâncias e o uso doméstico e industrial da energia elétrica.

A partir de então, com o desenvolvimento tecnológico e do estudo dos materiais, além de maiores preocupações e investimento em sustentabilidade, houve um notório crescimento de energias renováveis, tais como a energia das biomassas, solares e eólicas. Sendo a eólica, por exemplo, aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra, a qual é convertida para energia cinética dos ventos, dando origem a um potencial bruto mundial estimado em 500.000 TWh - Terawatts-hora - por ano, dos quais apenas 53.000 TWh são aproveitáveis, equivale a quatro vezes o consumo mundial de eletricidade em 2002 [11].

De forma a entender o panorama de trabalhos científicos, relacionados a recuperação de energia e a elaboração de sistemas eletrônicos eficientes, no âmbito local da UFCG, tem-se os seguintes exemplos: Transformador de Corrente Com Núcleo Toroidal para Recuperação de Energia Eletromagnética [16], Antenas Bioinspiradas Em Plantas Para Recuperação De Energia Eletromagnética Do Ambiente [17], entre outros trabalhos.

No âmbito internacional é possível destacar várias aplicações da recuperação de energia eletromagnética, dentre os mais recentes [18] a [36]; esses expressam uma vasta gama de aplicações, e, demonstram o direcionamento da pesquisa científica na qual a revolução tecnológica e a conscientização para o aproveitamento sustentável de energia no século XXI.

Para o uso sustentável da recuperação de energia em linhas de transmissão, pode-se destacar o uso para equipamentos de monitoramento de baixo consumo [37], aplicações de transformadores de corrente utilizando ligas nanocristalinas [38], e otimização de circuitos retificadores para transformadores de corrente [39].

Portanto, a busca incessante de recuperar a energia, é uma das necessidades das atividades humanas, e, com o aumento da eficiência dos processos, dos equipamentos e do consumo racional de energia, fomenta-se um cenário de uso sustentável, por meio da compreensão dos fenômenos relacionados a mecânica, química e energia eletromagnética.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao analisar a temática de recuperação de energia eletromagnética proveniente de linhas de transmissão tem-se a necessidade do estudo das Equações de Maxwell. Essas equações são provenientes dos estudos iniciais de Michael Faraday. Maxwell unificou todos os fenômenos elétricos e magnéticos observáveis em um trabalho que estabeleceu conexões entre as várias teorias da época, em 1864 [40].

Assim, esses fenômenos puderam ser descritos por meio de quatro equações, conhecidas atualmente como Equações de Maxwell. Para o eletromagnetismo constam da unificação das Leis de Gauss, para a eletricidade e para o magnetismo, a Lei de Ampère generalizada e a Lei de Faraday para a Indução eletromagnética [40].

3.1. Equações de Maxwell

As Equações de Maxwell são apresentadas nas Equações de 1 a 4, seguindo o formalismo da representação integral.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (1)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (3)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (4)$$

A Lei de Gauss, Equação (1), proposta originalmente pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777-1855) [40], é o equivalente a Lei de Coulomb que se aplica a situações estáticas, relacionando campo elétrico e carga elétrica. A Lei de Gauss é um caso particular da Lei de Coulomb, tendo em vista que só pode ser aplicada a distribuições contínuas de cargas. O campo elétrico \mathbf{E} , é gerado por uma fonte qualquer que esteja no interior de uma região, cuja área é denominada por \mathcal{A} , também chamada de superfície gaussiana. O coeficiente ϵ_0 é a permissividade no vácuo, e q é a quantidade de carga elétrica total que se encontra no interior da região observada.

A Lei de Gauss para o magnetismo, Equação (2), é aplicável aos campos magnéticos e à não comprovação da existência de monopolos magnéticos (polo sul ou polo norte isolados). As linhas de campo magnético são contínuas, ao contrário das linhas de força de um campo elétrico que se originam em cargas elétricas positivas e terminam em cargas elétricas negativas.

A descrição da relação entre um campo magnético e a corrente elétrica que o origina, é feita pela Lei de Ampère, Equação (3). A qual estabelece que a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} é sempre produzido por uma corrente elétrica i e/ou pelo campo elétrico variável \mathbf{E} , que foi prevista pelo próprio Maxwell, se um campo magnético variável induz uma corrente elétrica, e consequentemente um campo elétrico, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético [40].

E por fim, tem-se a Lei de Faraday, Equação (4), que descreve as características do campo elétrico \mathbf{E} , originando uma densidade de fluxo magnético variável \mathbf{B} . Esses campos magnéticos originados são variáveis no tempo, gerando assim campos elétricos rotacionais.

Da forma integral e utilizando operador diferencial, $\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}$, do cálculo vetorial, em que ρ é a densidade de carga e \mathbf{J} a densidade de corrente elétrica, obtêm-se a forma diferencial das Equações de Maxwell, conforme são mostradas nas Equações 5 à 8 [41]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho v}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (8)$$

Logo, tem-se as Equações de Maxwell, essas compõem o conteúdo final do que se chama de Física Clássica [41].

3.2. Aplicação das Equações de Maxwell no Contexto da Recuperação de Potência Eletromagnética

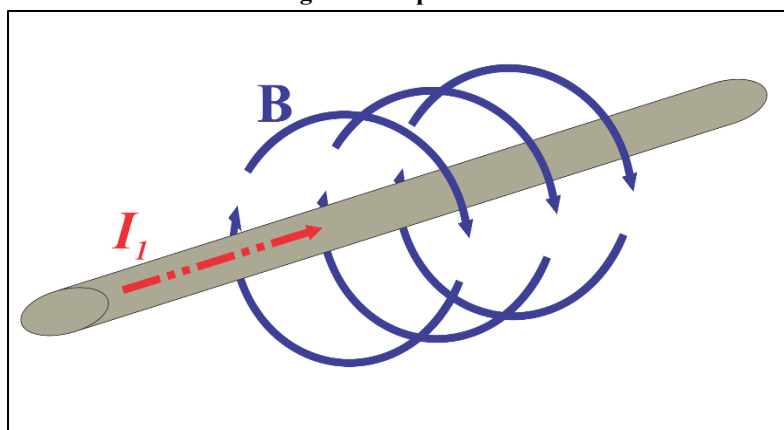
Há diversas maneiras de detectar e/ou determinar os efeitos dos campos magnéticos, e a maioria deles é baseada na conexão íntima entre fenômenos magnéticos e elétricos, conforme descrito por duas equações de Maxwell para problemas em regime quase magnetostático, expressas pelas Equações 9, Lei Circuital de Ampère, e 10, Lei de Faraday.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (10)$$

Em que \mathbf{B} é densidade de fluxo magnético, que é gerada pela passagem da corrente elétrica I_1 na linha de transmissão, representada na Figura 1, \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica, o coeficiente μ_0 é permeabilidade magnética no vácuo, \mathbf{E} é a intensidade de campo elétrico e t corresponde ao tempo.

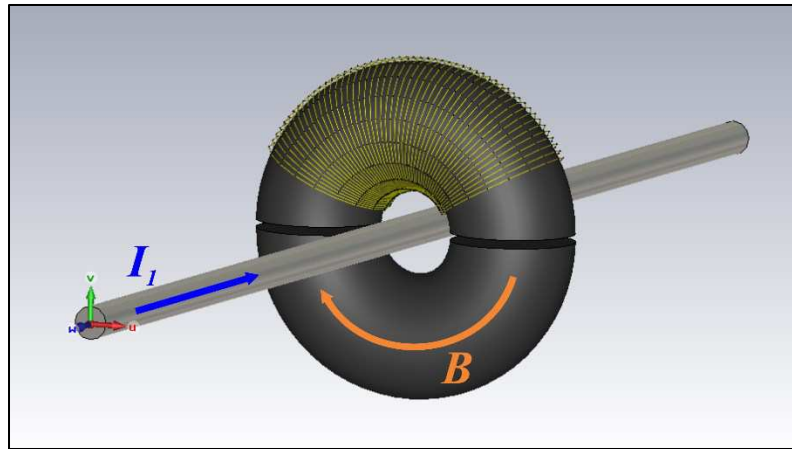
Figura 1: Densidade de fluxo magnético \mathbf{B} proveniente de uma corrente elétrica I_1 .



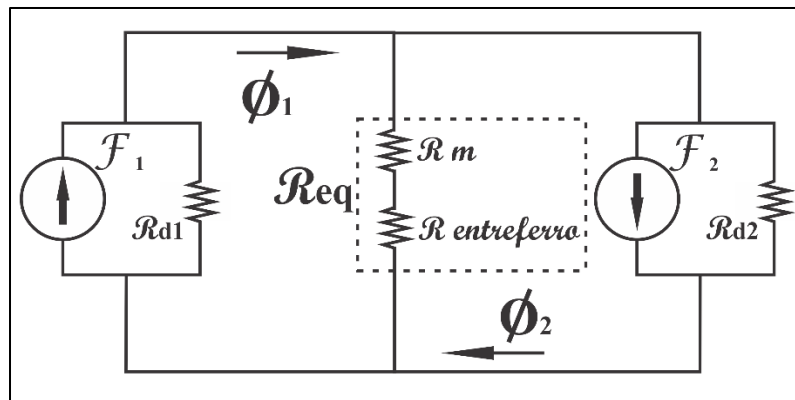
Fonte Própria

Pelo entendimento das Equações 9 e 10, visualiza-se o projeto 3D da bobina de recuperação de energia, assim consegue-se estabelecer o circuito magnético equivalente ao sistema pretendido para realizar a recuperação dos campos dispersos, conforme é mostrado na Figura 2.

Figura 2: Projeto 3D da bobina de recuperação de energia (a) e o circuito magnético equivalente (b).



(a)



(b)

Fonte Própria

Ou seja, o circuito magnético equivalente visto na Figura 2b, possui um núcleo toroidal, este tendo uma bobina em seu perímetro. No circuito em questão existem as forças magnetomotrices, \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 , são dadas pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\mathcal{F}_1 = N_1 I_1 \quad (11)$$

$$\mathcal{F}_2 = N_2 I_2 \quad (12)$$

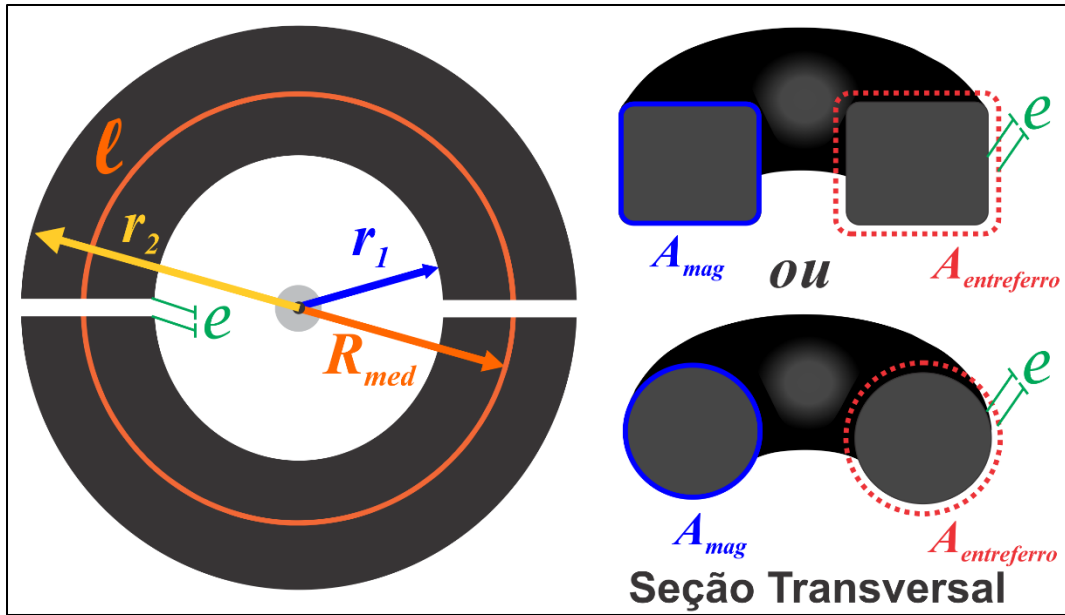
Na Figura 2b, a relutância equivalente \mathcal{R}_{eq} é expressa pela soma da relutância do núcleo e a do entreferro, respectivamente \mathcal{R}_m e $\mathcal{R}_{entreferro}$, conforme mostrado na Equação 13, também observa-se a presença das relutâncias de dispersão no primário \mathcal{R}_{d1} e no secundário \mathcal{R}_{d2} .

$$\mathfrak{R}_{eq} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_{mag}} + \frac{2e}{\mu_0 A_{entreferro}} = \mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_{entreferro} \quad (13)$$

Na Equação 14, o comprimento médio l é obtido em função do raio médio R_{med} , que é a média aritmética do raio interno r_1 com o raio externo r_2 , essas características também são consideradas para a bobina. O comprimento do entreferro é representado por e , e A_{mag} e $A_{entreferro}$ são as áreas das seções transversais do núcleo da bobina e do entreferro, respectivamente, conforme mostrado na Figura 3.

$$l = 2\pi R_{med} - 2e \quad (14)$$

Figura 3: Características geométricas do núcleo.



Fonte Própria

Assim conhecendo as Equações 11 a 14, e como demonstrado em [16], por meio da análise do circuito magnético equivalente da Figura 2, e sabendo que \mathfrak{R}_{d1} e \mathfrak{R}_{d2} são muito maiores que \mathfrak{R}_{eq} , logo todo o fluxo passará pela relutância equivalente, assim define-se o fluxo magnético Φ , expresso pela Equação 15.

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2}{\mathfrak{R}_{eq}} \quad (15)$$

Baseado na teoria do circuito acoplado, os dois enrolamentos podem ser representados por um circuito linear que consiste em dois ramos com mútua indutância entre eles. Neste caso, o fluxo mútuo Φ_m que liga todas as espiras de ambos os enrolamentos consiste em dois componentes, cada um produzido pela força magnetomotriz de um dos enrolamentos (N_1 primário e N_2 secundário) como mostrado na Equação 16.

$$\Phi_m = \frac{N_1 I_1}{\mathfrak{R}_m} - \frac{N_2 I_2}{\mathfrak{R}_m} = \Phi_{m1} - \Phi_{m2} \quad (16)$$

Onde \mathfrak{R}_m é a relutância do núcleo, para circuitos equivalentes sem espaços de ar, I_1 é a corrente primária e I_2 é a corrente secundária, Φ_{m1} é o fluxo magnetizante produzido pela corrente I_1 e Φ_{m2} é o efeito desmagnetizador da corrente I_2 , a lei de Lenz.

Assim, quando ambos os enrolamentos estão conduzindo corrente, o enrolamento de ligação de fluxo N_1 apresenta-se como mostrado na Equação 17.

$$\Phi_1 = \Phi_{l1} - \Phi_m. \quad (17)$$

Onde Φ_{l1} é o fluxo de vazamento produzido pela corrente primária, I_1 . Similarmente, o enrolamento de ligação de fluxo N_2 , é mostrado na Equação 18

$$\Phi_2 = \Phi_{l2} - \Phi_m. \quad (18)$$

Como as ligações de fluxo total dos enrolamentos N_1 e N_2 são,

$$\lambda_1 = N_1 \Phi_1 \quad \text{e} \quad \lambda_2 = N_2 \Phi_2 \quad (19)$$

$$\lambda_1 = N_1 (\Phi_{l1} - \Phi_m) - N_1 \Phi_{m2} \quad (20)$$

$$\lambda_2 = N_2 (\Phi_{l2} - \Phi_m) - N_2 \Phi_{m1}. \quad (21)$$

Nas Equações 20 e 21, o primeiro termo no lado direito representa a ligação de fluxo produzida em um enrolamento, enquanto o segundo termo representa a ligação de fluxo produzida em um enrolamento pela corrente no outro. As autoindutâncias L_{11} , L_{22} e as indutâncias mútuas M_{12} e M_{21} dos dois enrolamentos podem, portanto, ser definidas como mostrado nas Equações 22 e 23:

$$L_{11} = \frac{N_1(\phi_{l1} - \phi_m)}{I_1}, \quad L_{22} = \frac{N_2(\phi_{l2} - \phi_m)}{I_2} \quad (22)$$

$$M_{12} = \frac{N_1\phi_{m2}}{I_2} \quad \text{e} \quad M_{21} = \frac{N_2\phi_{m1}}{I_1} \quad (23)$$

Utilizando a Equação 15 tem-se,

$$\phi_{m1} = \frac{N_1 I_1}{\mathfrak{R}_m} \quad \text{and} \quad \phi_{m2} = \frac{N_2 I_2}{\mathfrak{R}_m} \quad (24)$$

Então substituição para ϕ_{m1} e ϕ_{m2} na Equação 23 obtém-se,

$$M_{12} = \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_m} \quad \text{and} \quad M_{21} = \frac{N_2 N_1}{\mathfrak{R}_m} \quad (25)$$

Assim, pelo princípio da reciprocidade, mostrado na Equação 26:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (26)$$

A indutância adequada do enrolamento secundário L_2 , é expressa na Equação 27.

$$L_2 = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_{eq}} \quad (27)$$

Quando as indutâncias são relacionadas às correntes que as atravessam, seja a primária I_1 ou a secundária I_2 , elas descrevem o fluxo de ligação λ_2 no secundário, obtido por meio da Equação 28.

$$\lambda_2 = MI_1 - L_2I_2 \quad (28)$$

Retomando a Equação 9, a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , e reescrevendo em função dos coeficientes μ_0 , μ_r , I_1 , r_1 e r_2 , tendo R_n o raio do núcleo ferromagnético, obtém-se a Equação 29.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0\mu_r I_1}{2\pi R_n} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (29)$$

Com as características definidas acima se pode expressar a potência recuperada p_2 pela Equação 30, e a energia pela Equação 31, tendo seu desenvolvimento completo em [16] e [42].

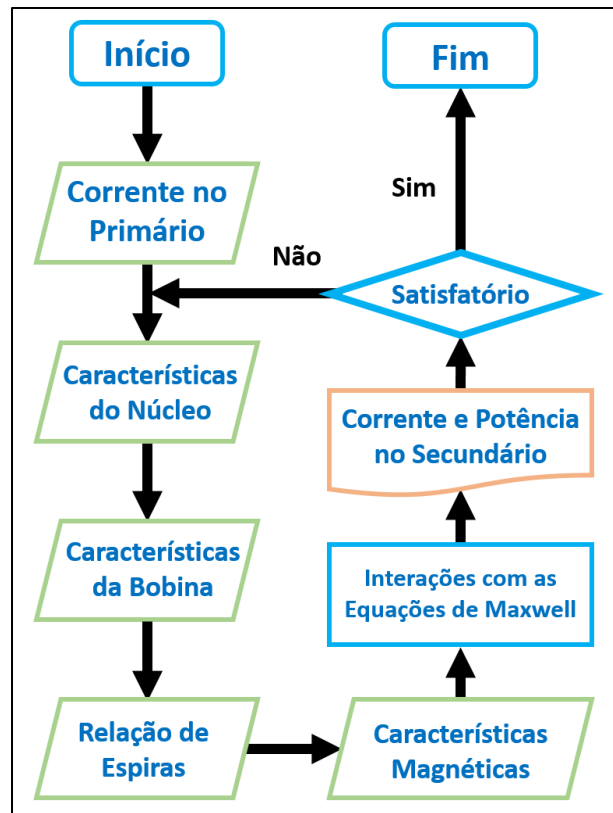
$$p_2 = MI_2 \frac{dI_1}{dt} - L_2I_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (30)$$

$$W_2 = MI_1I_2 - \frac{L_2I_2^2}{2} \quad (31)$$

Logo, as expressões utilizadas nos resultados desta dissertação, são representadas pelas Equações 28 a 31, para estimava da energia e corrente recuperada.

Finalmente, depois de compreender as equações, estabelece-se o fluxograma do algoritmo elaborado na Figura 4 e no Anexo I é mostrado o código fonte desenvolvido.

Figura 4: Fluxograma do algoritmo.



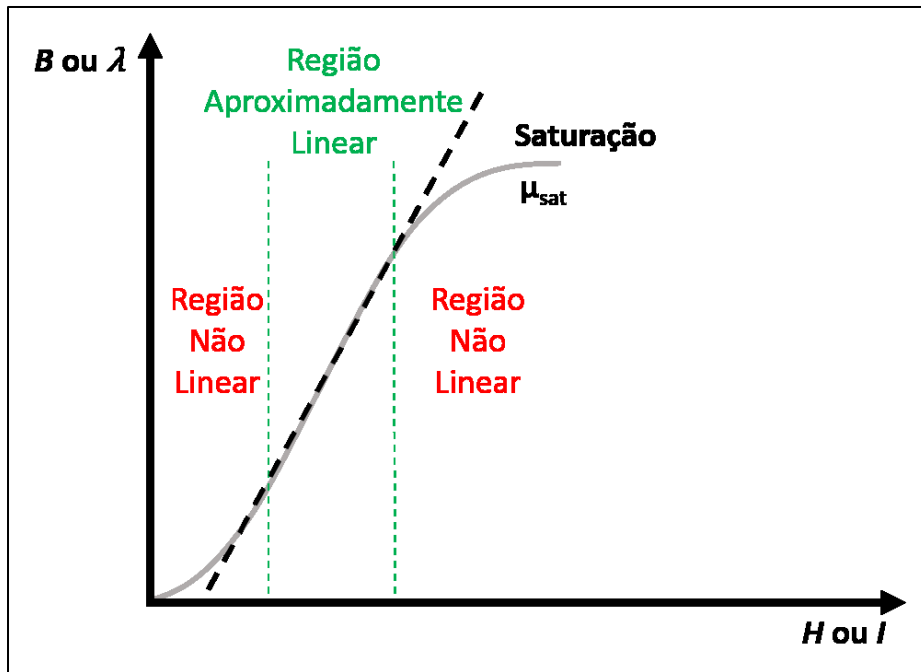
Fonte Própria

3.3. Energia e Coenergia

Para o entendimento da energia e da coenergia, deve-se observar a existência de duas regiões, uma não linear e outra aproximadamente linear, na curva de magnetização de um núcleo ferromagnético. Esta por sua vez, é obtida pela relação da densidade de fluxo magnético B com a intensidade do campo magnético H , conforme a Figura 5, que equivalentemente pode ser expressa pela relação do fluxo concatenado λ com a corrente de excitação I [43].

Ao analisar a Figura 5 e, sabendo que no acoplamento da bobina de recuperação de energia com a linha de transmissão, observando assim o efeito desmagnetizante da reação de armadura ocasionada pela presença de corrente elétrica no secundário, assim o sistema proposto crescerá sobre a curva de magnetização em direção a saturação, mas devido a esse efeito ficará na região de linearidade.

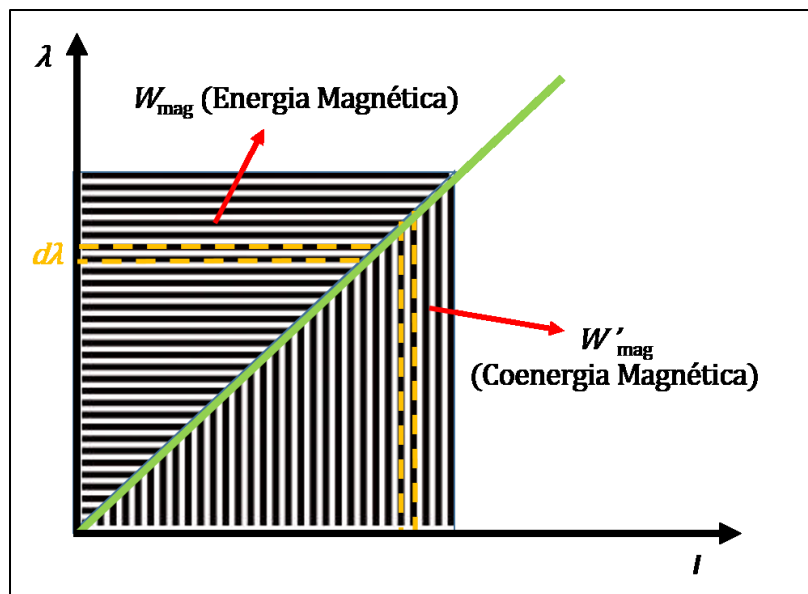
Figura 5: Curva de magnetização.



Fonte Própria

Logo, em um sistema eletromagnético conservativo, a energia e a coenergia são variáveis de estado, sendo λ e I essas variáveis e a tensão v , que é a variável de vínculo associada a I [43], conforme a mostrado na Figura 6.

Figura 6: Relação λ e I , energia com a coenergia.



Fonte Própria

Neste caso, a relação λ e I é linear, como mostrado na Equação (32),

$$\mathbf{W}_{mag} = \mathbf{W}'_{mag} = \frac{\lambda I}{2} = \frac{I\lambda}{2} \quad (32)$$

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

O trabalho dessa dissertação teve início com a continuação de um projeto de doutorado, o qual foi desenvolvido no Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicadas - LEMA, cujo propósito, foi recuperar a energia proveniente dos campos eletromagnéticos das linhas de transmissão. Assim, o entendimento das equações de Maxwell foi fundamental para alcançar os objetivos propostos.

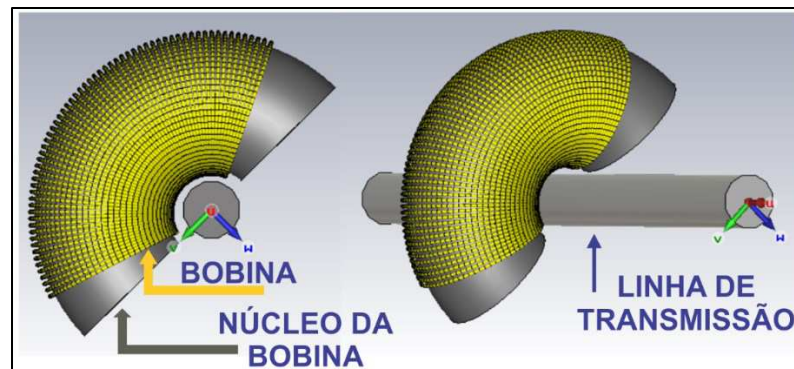
Nas pesquisas realizadas, as normas técnicas em vigor pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e tratante ao tema foram analisadas. Constatando, que tais normas não proíbem a instalação das esferas de sinalização nos condutores de fase, apenas determinam, que no mínimo o condutor de maior altitude deve ser sinalizado [44] a [46].

Em seguida, foi escrito um algoritmo no MATLAB com base nas equações de Maxwell, utilizado as leis de Ampère e Faraday, para o caso ideal e real. Com as diferentes simulações de bobinas de recuperação de energia feitas, foram analisadas suas viabilidades, para montagem de um modelo experimental, que verificou a funcionalidade do algoritmo.

4.1. Projeto para o Caso Ideal

Com a análise das Equações de Maxwell e a partir de seu entendimento foram estudados vários formatos para bobinas em aproximação transversal a linha de transmissão, porém sem muito êxito pois o fluxo magnético é circular ao entorno da linha. Assim, foi decidido utilizar o formato semitoroidal ou toroidal, como ilustrada na Figura 7 em torno da linha de transmissão. Assim, tem-se um melhor aproveitamento do campo eletromagnético disperso, existente em volta da linha de transmissão.

Figura 7: Bobina de recuperação de energia no formato semitoroidal.



Fonte Própria

Pela Lei de Ampère, Equação 9, e pela Lei de Faraday, Equação 10, elaborou-se uma rotina computacional para realizar os cálculos referentes aos valores da força eletromotriz induzida na bobina, como forma de obter a energia recuperada.

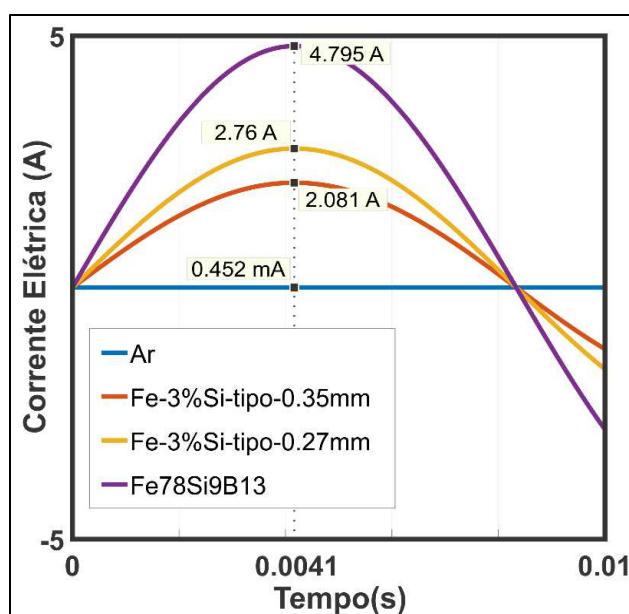
As simulações computacionais foram realizadas utilizando valores de permeabilidade magnética relativa de meios diferentes, expressa pelo coeficiente μ_r , conforme apresentados na Tabela I.

Tabela I: Permeabilidade Magnética Relativa [24]

Meios	μ_r
Ar	1
Liga de Fe-3%Si_tipo0.35	4600
Liga de Fe-3%Si_tipo0.27	6100
Liga Amorfa Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	10600

A escolha dos meios apresentados na Tabela I se deve à ampla utilização dos mesmos nos sistemas elétricos e em dispositivos eletroeletrônicos [47]. Para melhor compreensão da energia recuperada pela bobina, elaborou-se o gráfico da Figura 8, neste é apresentado a relação entre a variação do tempo da corrente do primário, que oscila na frequência de 60 Hz, pela corrente induzida nos terminais da bobina do secundário.

Figura 8: Gráfico de comparação das correntes induzidas, através da recuperação de energia feita pela bobina, para uma carga de 500 ohms.



Fonte Própria

Para obtenção da corrente induzida, foi utilizado um circuito elétrico equivalente, o qual constitui uma carga de 500Ω , esta impedância é obtida com a análise dos LED utilizados na aplicação do circuito, com o auxílio do software MATLAB®.

Na Tabela II são apresentadas as características elétricas da bobina semitoroidal apresentada na Figura 8, tendo a distância do centro da linha de transmissão para o Raio Médio R_{med} de 10 cm, esta distância é observada como a distância ótima em [16].

Tabela II: Característica da Bobina Semitoroidal

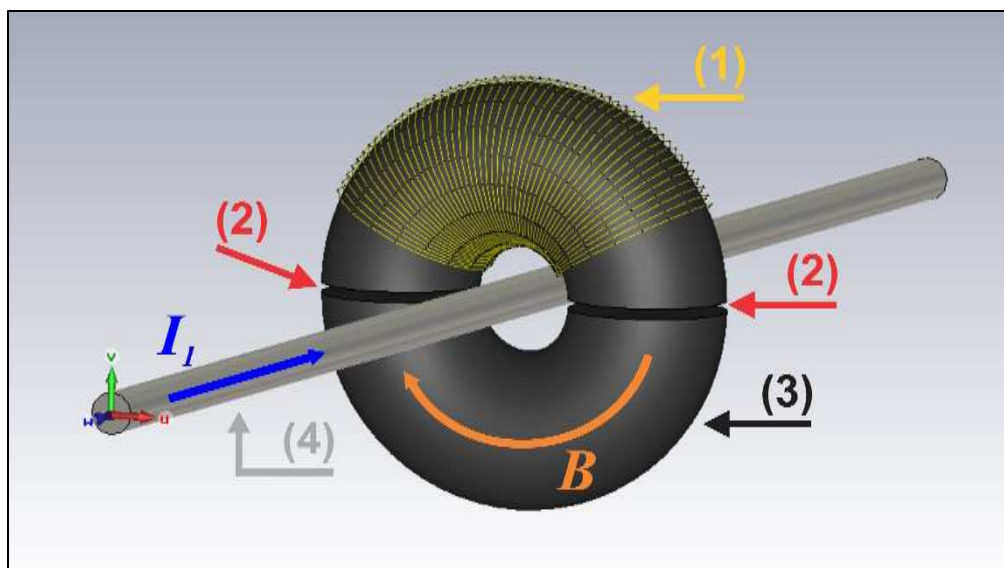
Componente	Valor- Unidade
Raio da bobina	2,5 cm
Número de espiras	400 voltas
Fio esmaltado	n° 23 [48]
Diâmetro do fio	0,569 mm ²
Frequência da linha	60 Hz

Dentre os meios magnéticos simulados, o melhor valor de corrente obtido foi utilizando a liga amorfa $Fe_{78}Si_9B_{13}$, tendo valor de 4,795 A, que apresentou o melhor desempenho na recuperação de energia, e conseqüentemente uma maior corrente no circuito equivalente, como mostrado anteriormente na Figura 8.

Os cálculos acima foram feitos para o caso ideal, tendo o objetivo principal a verificação da existência dos campos eletromagnéticos dispersos e a possibilidade de se obter uma corrente induzida, a qual servirá de fonte de alimentação para um sistema de iluminação de esferas de sinalização, cuja concepção está registrada no Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, sob n° BR202017007597-0 [1].

Portanto, pode-se concluir que para o caso real é necessário um formato toroidal circular completo, conforme a Figura 9, para uma melhor concatenação do fluxo magnético e para maximizar esta concatenação, os valores de permeabilidade magnéticas serão aumentadas, sendo satisfatório o uso das ligas nanocristalinas e a inserção de dois entreférris.

Figura 9: Bobina de colheita de energia (1), em formato toroidal com dois entreferros (2), núcleo ferromagnético (3), que será acoplada a uma linha de transmissão (4).



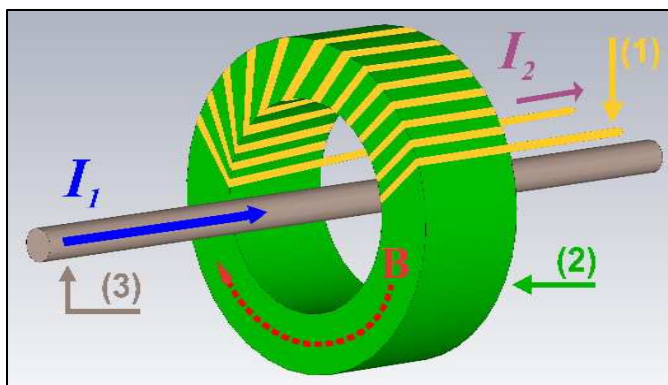
Fonte Própria

4.2. Projetos para o Caso Real – Validação do Algoritmo

Com as equações descritas no Capítulo 3, é possível entender a possibilidade de recuperar energia dos campos eletromagnéticos dispersos das linhas de transmissão utilizando bobinas, que atuavam na região de campos próximos.

Assim, com base nas equações de Maxwell e fazendo uma analogia com Transformador de Corrente - TC entre outros [49] a [52], uma bobina para coleta de energia foi projetada para o caso real, sem entreferro, para equalizar com o núcleo real existente no laboratório de ensaio, conforme a Figura 10. Bem como foi desenvolvido um algoritmo de simulação para modelagem do sistema de recuperação de energia, utilizando o software MATLAB®.

Figura 10: Bobina de colheita de energia '1', em formato toroidal retangular com núcleo de liga nanocristalina '2' sendo acoplada em linha de transmissão '3'.



Fonte Própria

As características da bobina, Figura 10, são expressas na Tabela III. O material do núcleo utilizado foi uma liga nanocristalina denominada NANOPHY® N3E3, sendo caracterizada e analisada em [52], devido à alta permeabilidade magnética relativa, importante propriedade magnética para a aplicação desejada.

A bobina usada para a colheita de energia é mostrada na Figura 11. Esta bobina foi construída sobre um núcleo toroidal nanocristalino e submetida a testes experimentais, a fim de verificar quão confiável é o algoritmo computacional.

Após a etapa de fabricação da bobina, foi elaborado um cenário experimental composto por um gerador de corrente alternada Fluke, modelo 6100A, *Electrical Power Standard* e dois multímetros Agilent, modelo 34401A, um usado como amperímetro e outro como volímetro, conforme Figura 12.

Tabela III: Características do Núcleo Toroidal

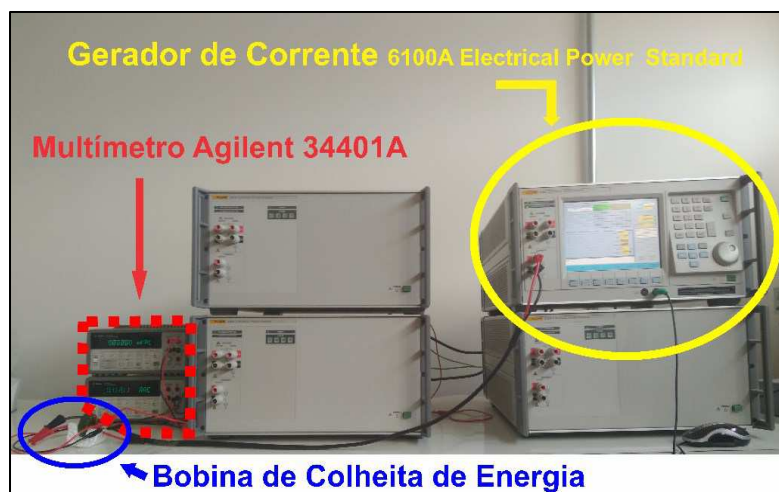
Característica	Valor (Unidade)
Raio Interno	$1.25 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Externo	$2.0 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Médio	$1.625 \cdot 10^{-2}$ (m)
Altura do Núcleo	$1.5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Número de Espiras (Primário)	1
Número de Espiras (Secundário)	20, 25, 30, 35
Corrente no Primário	0 a 15 (A)
Frequência do Primário	60 (Hz)
μ_R MAX	147.000 [29]
B SATURAÇÃO	1.04 (T) [29]

Figura 11: Bobina experimental de colheita de energia com núcleo nanocristalino.



Fonte Própria

Figura 12: Cenário experimental elaborado



Fonte Própria

Após a montagem do experimento, as medidas da colheita de energia foram realizadas, o gerador de corrente teve sua corrente elétrica variada de 0 a 15 A, assim obtive-se os dados experimentais para comparação com os simulados, logo utilizou-se tal algoritmo para projetar futuras bobinas de colheita de energia em escalas maiores.

4.3. Projeto de Bobina para Linha de Transmissão de 230 kV

Com o entendimento que é possível a recuperação de energia por intermédio de bobinas, que atuam na região de campos próximos e com o uso do algoritmo desenvolvido, foi realizado o projeto 01 de um sensor magnético para linhas de transmissão de 230 kV de um único fio por fase, tendo suas características expressas na Tabela IV.

A bobina mostrada na Figura 9, mostra duas fendas de ar ou entreferros, estas foram adicionadas para melhor instalação e acoplamento na linha de transmissão. A presença de

intervalos de ar também ajuda a aumentar a linearidade das curvas de magnetização e histerese [16].

A seção transversal do núcleo da bobina foi modificada para uma área circular, pois a bobina coletora é moldada de acordo com a área da seção transversal do núcleo, e se esta área permanecesse retangular, a bobina teria extremidades, que acarretam a concentração de corrente, portanto, haveria aquecimento, gerando perdas de rendimento na colheita de energia.

Tabela IV: Características da Bobina e Núcleo do Projeto 01

Característica	Valor (Unidade)
Raio Interno	$7,5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Externo	$12,5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Médio	$10 \cdot 10^{-2}$ (m)
Seção Transversal da Bobina	$2,5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Altura do Entreferro [54]	$1,2 \cdot 10^{-3}$ (m)
Número de Voltas do Primário	1
Número de Voltas do Secundário	30
Corrente do Primário	150 (A)
Frequência da Corrente do Primário	60 (Hz)
μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ (N/A ²)

A bobina projetada foi submetida à análise de diferentes materiais, a fim de verificar seu comportamento de recuperação de energia para diferentes composições do núcleo da bobina.

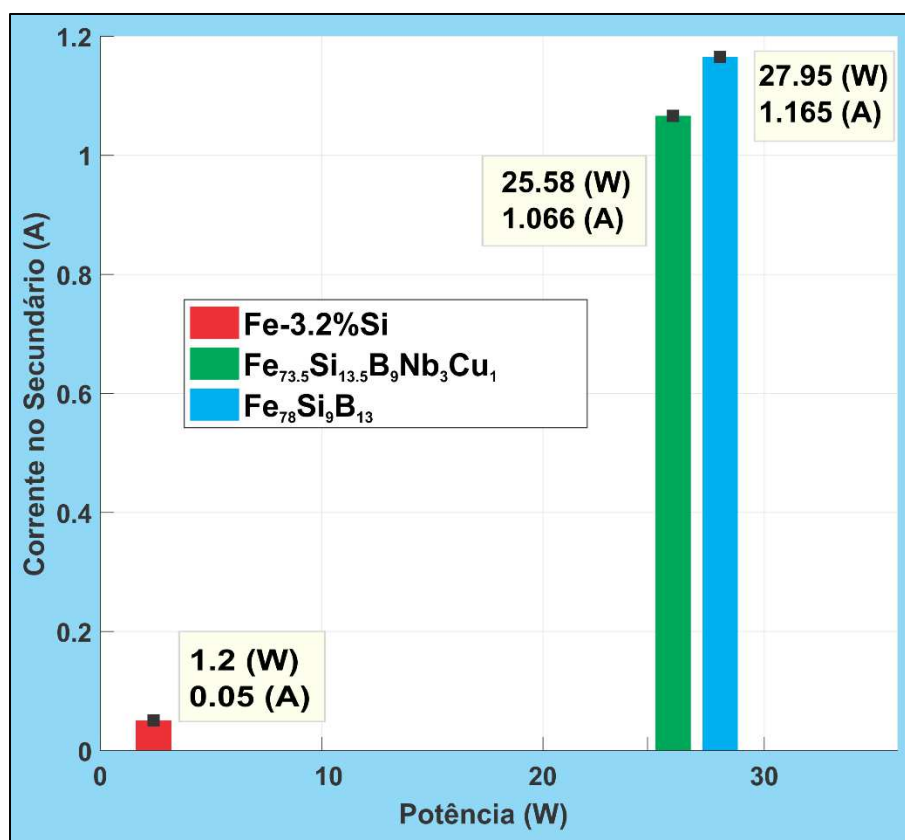
Na Tabela V, verifica-se que o Ar se mostrou insatisfatório como meio de uso no núcleo, pois a energia recuperada era muito baixa. No entanto, o aumento da permeabilidade relativa do material do núcleo da bobina aumenta a energia recuperada.

Tabela V: Variação da Permeabilidade Relativa e Potências Recuperadas

Material	Composição	Permeabilidade Relativa (μ_r)	Potência Recuperada (W)
Ar	Ar	1	$43,9 \cdot 10^{-6}$
Ferro Silício E-004	Fe-3,2%Si	40.154	1,2
Liga Nanocristalina	Fe _{73,5} Si _{13,5} B ₉ Nb ₃ Cu ₁	185.000	25,58
Liga Amorfa	Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	193.397	27,95

Ainda com base nos resultados obtidos na Tabela V, o cálculo foi realizado para estimar a corrente elétrica circulante no secundário, tomando como parâmetro uma tensão de operação para o circuito comutado que dará a funcionalidade esperada para a esfera de sinalização para aeronaves, uma vez que os LED utilizados operam satisfatoriamente a 24 V, Figura 13.

Figura 13: Corrente obtida para uma tensão de 24 V no secundário, conforme valores de potência obtida na Tabela VI, exceto o ar.



Fonte Própria

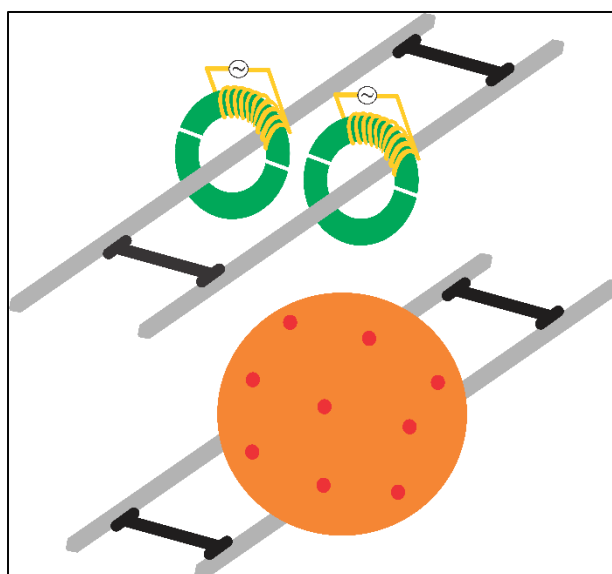
Portanto, observa-se que esse sensor se mostrou útil para as aplicações pretendidas possibilitando assim em futuro próximo sua construção.

4.4. Projeto de Bobina para Linha de Transmissão EAT e UAT

As linhas Extra Alta Tensão – EAT (440 kV e 500 kV) e as linhas Ultra Alta Tensão – UAT (750 kV) transportam grandes quantidades de energia elétrica. Nessas linhas de transmissão, as correntes variam de 100 a 227 ampères [42], e suas topologias nas Figuras 14 a 16.

É interessante observar que as bobinas coletoras de energia são colocadas individualmente em cada condutor, pois a corrente total da fase da linha, é dividida igualmente nos fios condutores, já em relação à tensão aplicada, esta detecta a geometria equivalente da topologia da linha, de forma a considerar um único condutor, seja ela dupla, tripla ou quádrupla.

Figura 14: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com duplo condutor nas fases, visualização interna e externa.



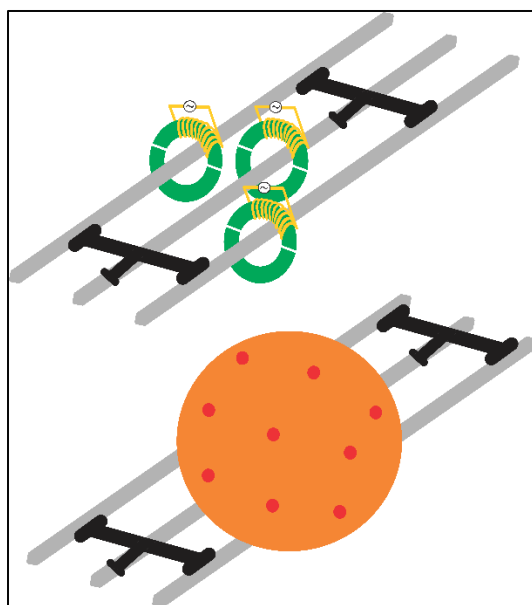
Fonte Própria

As dimensões das bobinas de captação de energia são apresentadas na Tabela VI, na análise do tamanho idealizado, o tamanho padrão dos separadores, que são equidistantes de 0,457 m um do outro [43].

Tabela VI: Características das Bobinas das Figuras 14 a 16.

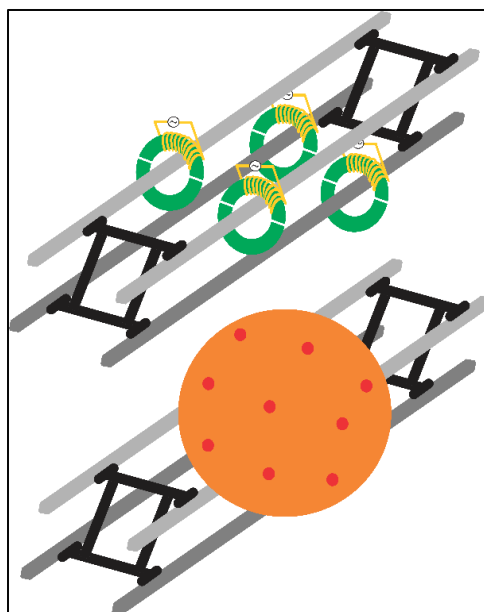
Característica	Valor (Unidade)
Raio Interno	$7,5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Externo	$15 \cdot 10^{-2}$ (m)
Raio Médio	$11,25 \cdot 10^{-2}$ (m)
Seção Transversal da Bobina	$7,5 \cdot 10^{-2}$ (m)
Altura do Entreferro [52]	$1,2 \cdot 10^{-3}$ (m)
Número de Voltas do Primário	1
Número de Espiras do Secundário	30
Corrente do Primário [44]	100 a 227 (A)
Frequência da Corrente do Primário	60 (Hz)
μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ (N/A ²)

Figura 15: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com condutor triplo nas fases, visualização interna e externa.



Fonte Própria

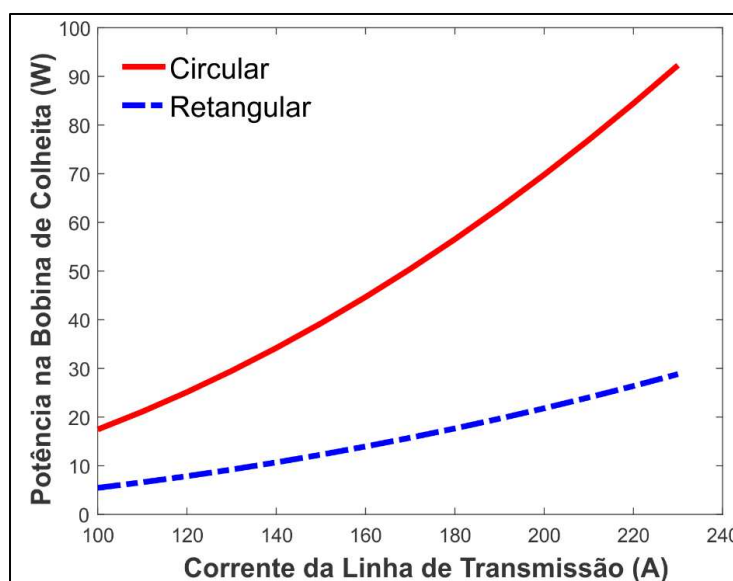
Figura 16: Topologia para esfera de sinalização em linha de transmissão com condutor quádruplo nas fases, visualização interna e externa.



Fonte Própria

Na Figura 17 observa-se a curva da energia recuperada mostra um sistema com considerável recuperação de potência, principalmente para quando se tem uma seção transversal circular no núcleo.

Figura 17: Simulação da potência recuperada, para bobinas de mesmo perímetro e números de espiras, alterando o seu formato de seção transversal – circular e retangular.



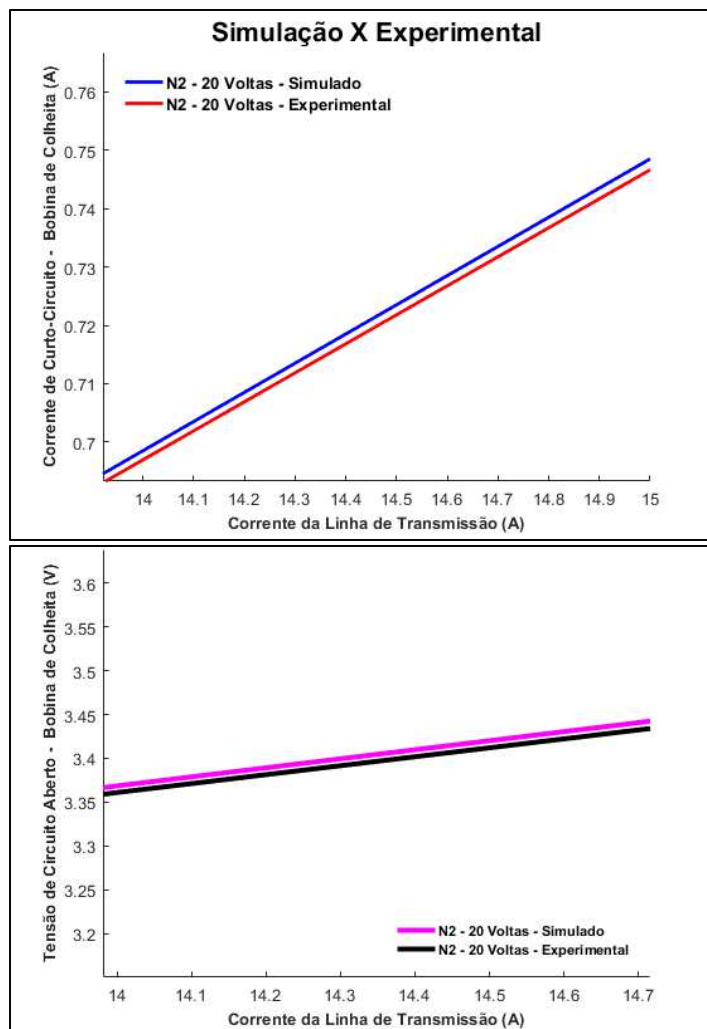
Fonte Própria

Por fim, em paralelo a esta dissertação, trabalhos científicos foram elaborados, alguns diretamente ligados ao tema, e outros que possibilitaram inúmeras reflexões, sobre a literatura estudada e as aplicações das equações de Maxwell, sendo os mesmos relacionados no Anexo II.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos com o experimento são apresentados em dois tipos de curvas, a primeira representa a corrente de curto-circuito na Figura 19, e a tensão de circuito aberto na Figura 20. Esses resultados, simulados e experimentais, tiveram um desvio padrão de 0,1317; de forma a otimizar a visualização deste desvio padrão, é expresso em escala de ampliação na Figura 18, e de forma numérica na Tabela VII.

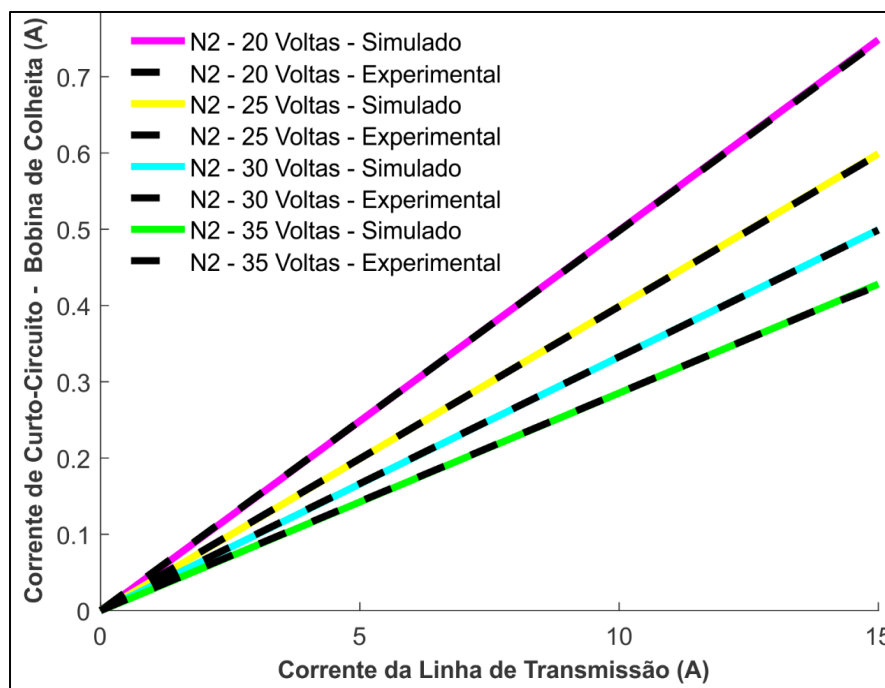
Figura 18: Visualização de forma ampliada para a situação da bobina de recuperação de energia com espira de 20 voltas – corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto.



Fonte Própria

Este desvio próximo de zero mostra a concordância e similaridade entre os valores obtidos experimentalmente em comparação ao simulado, mostrando a fidelidade do algoritmo elaborado à realidade.

Figura 19: Comparação da corrente de curto-circuito do secundário em relação a corrente que flui no primário, simulação X experimental.



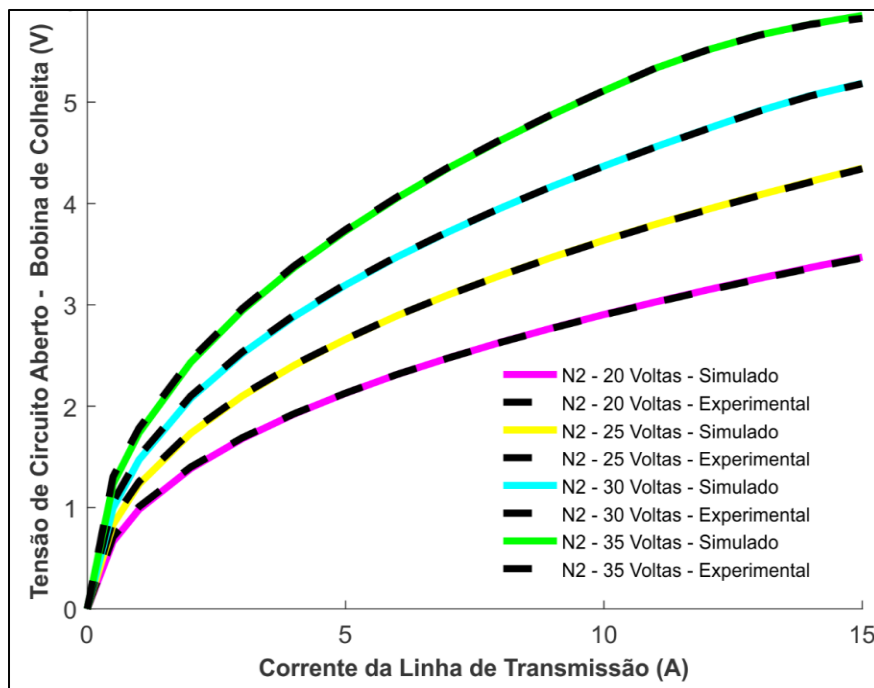
Fonte Própria

É mostrado nos gráficos das Figuras 19 e 20 que ligas nanocristalinas concentram fortemente o campo eletromagnético, devido à alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coercitiva e baixas perdas por histerese [52], permitindo uma maior indução de corrente na bobina de captação de energia e conseqüentemente uma melhor recuperação do campo eletromagnético.

Ao utilizar o núcleo de liga nanocristalina, seu alto custo é sempre abordado, mas nas aplicações previstas em [1] e [7], esse custo será justificado pela aplicabilidade e pela redução de acidentes nas linhas de transmissão.

Os resultados experimentais foram estabelecidos até o limite simulado da bobina secundária, que é composta pelo fio esmaltado número 23, cuja corrente limite é de 0,765A, para garantir a segurança no momento experimental foi fixado que a corrente limitante do primário em 15 A, no máximo.

Figura 20: Comparação da tensão de circuito aberto do secundário em relação a corrente que flui no primário, simulação X experimental.



Fonte Própria

A corrente de curto-circuito obtida no secundário tende a aumentar à medida que diminui o número de voltas, devido às Leis de Ohm, que descrevem analogamente: a corrente elétrica é inversamente proporcional ao comprimento do condutor, assim observando as Figuras 19 e 20, observa-se que corrente e tensão tem comportamentos inversos, porém a energia recuperada se mantém praticamente estável, conforme Tabela VII.

Os resultados medidos da energia recuperada mostram que o circuito com 20 voltas pode extrair em média 1,44 W, Tabela VII, da linha de energia com corrente do primário em 10 A, conforme [53] utiliza-se essa corrente e assim consegue-se uma melhora, pois pode-se utilizar um circuito retificador mais simples, em trabalhos futuros, o que reduzirá a manutenção do sensor magnético.

Tabela VII Análise Numérica da Figuras 13 a 15.

Corrente no Primário		(10A)			(15A)		
Descrição	Voltas	Secundário					
		CCC (A)	TCA (V)	Potência (W)	CCC (A)	TCA (V)	Potência (W)
Simulação	20	0,398	2,630	1,047	0,748	3,471	2,596
Experimental	20	0,497	2,901	1,442	0,746	3,463	2,583
Simulação	25	0,319	3,290	1,050	0,599	4,349	2,605
Experimental	25	0,398	3,634	1,446	0,598	4,343	2,597
Simulação	30	0,266	3,954	1,052	0,499	5,186	2,588
Experimental	30	0,332	4,369	1,451	0,499	5,183	2,586
Simulação	35	0,228	4,623	1,054	0,428	5,855	2,506
Experimental	35	0,285	5,114	1,457	0,425	5,826	2,476

CCC – Corrente de Curto-Circuito, TCA – Tensão de Circuito Aberto

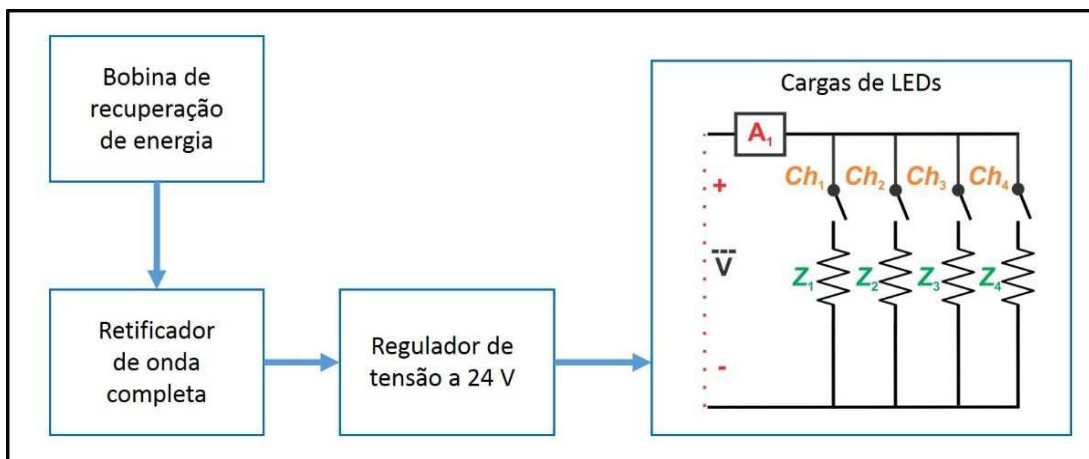
Observa-se, que os valores experimentais de energia recuperada a 10 A de corrente no primário são superiores à do secundário, isso é devido a estabilização previa que as ligas nanocristalinas dão ao sistema de recuperação de energia, portanto quando chega-se em 15 A de corrente no primário, o núcleo se encontra na sua região de linearidade se tornando mais estável e próximo ao simulado, mostrando que mesmo com uma redução na corrente circulante no primário, o núcleo de liga nanocristalina promove uma estabilidade na energia recuperada para o secundário, facilitando assim o trabalho do circuito retificador.

CAPÍTULO 6: CIRCUITO CONDICIONADOR DE ENERGIA

Em perspectiva de trabalhos futuros e com o intuito de suprir a alimentação de cargas de LED [1], e posteriormente um sistema com comunicação RF para aeronaves de diferentes portes e tamanhos [7], é necessário um circuito que condicione a energia recuperada.

Objetivando tais aplicações, tendo a estimativa que as cargas de LED são de aproximadamente 40 W, tem-se a necessidade de uma ponte retificadora de onda completa e um regulador de tensão de 24 V, conforme desenvolvido em [53] e mostrado na Figura 21.

Figura 21: Fluxograma do sistema de condicionamento de energia.



Fonte Própria

O retificador de onda completa é necessário pois os LED trabalham em corrente contínua, sendo que para seu funcionamento à necessidade de um regulador de tensão que limitará a tensão em 24 V.

As cargas de LED utilizadas são caracterizados conforme suas impedâncias Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4 , sendo cada grupo de impedância é composta por 10 LED. Logo, pode-se calcular a quantidade de carga suportada em função da potência de entrada.

6.1. LED – Diodo Emissor de Luz

Para a aplicação da esfera de sinalização, serão utilizados os LED tipo Ez-Light 50LXRX PQ, Figura 22, na cor vermelha (*red*), com sistema de encapsulamento e resistentes a intemperes. Este possui base de policarbonato com rosca de 30 mm, cúpula de policarbonato translúcido atendendo ao padrão de encapsulamento completo, IP67 e IP69K [54].

Figura 22: LED para a esfera de sinalização.



Retirado de [55]

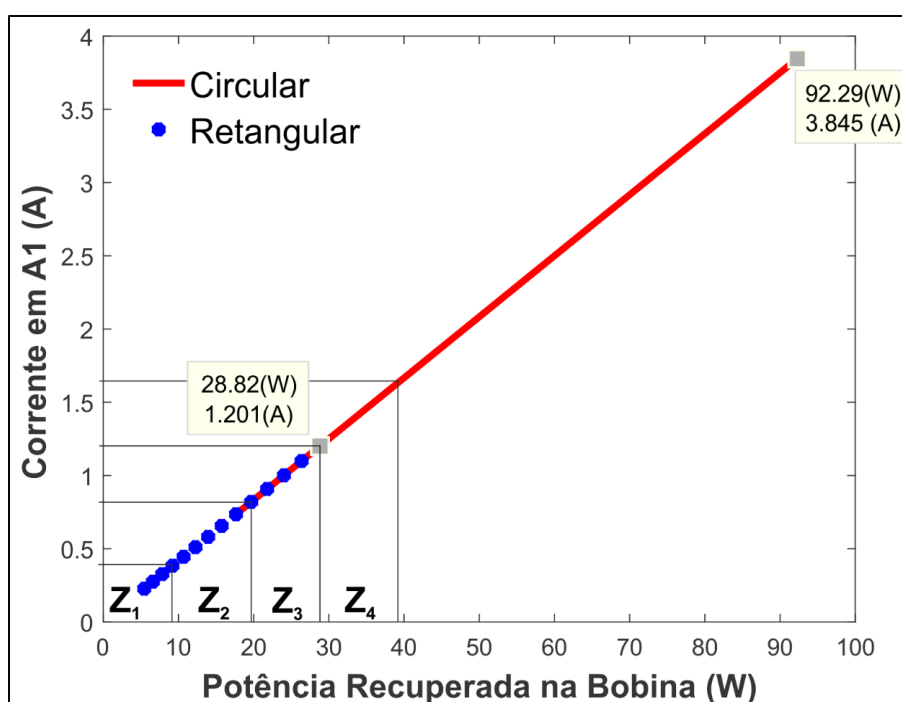
O LED mostrado na Figura 22, segundo informações do fabricante [55], opera na faixa de 18 V a 30 V em corrente contínua e consumindo no máximo 40 mA de corrente elétrica, atendendo ao grau de proteção IP69k, sendo este o grau mais alto de proteção contra a entrada de poeira e água em um equipamento. Essa é uma classificação da norma alemã DIN 40050-9. Tendo em sua faixa de operação, em relação a temperatura, entre -40 °C a +50°C.

6.2. Análise do Circuito Condicionador de Energia

No circuito, estabelece-se que todo esse sistema trabalhará admitindo a máxima transferência de potência, isso quer dizer que a impedância total da parte CA e a da parte CC, estará em perfeito casamento de impedância.

Logo observando o comportamento do amperímetro A_1 , em função das potências de entrada são expressas na Figura 17, e regulada a uma tensão de 24 V na parte CC, as correntes no secundário foram obtidas utilizando o software MATLAB, como mostrado na Figura 23.

Figura 23: Corrente lida pelo amperímetro A_1 , conforme regulação de 24 V.



Fonte Própria

Ao analisar a Figura 23, percebe-se que como se utiliza conjuntos compostos de 10 LED cada, sendo que cada conjunto esteja utilizando o máximo de corrente elétrica estabelecido pelo fabricante, teremos 400 mA a 24 V, uma potência consumida de 9,6 W máximo por conjunto – Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 . Logo, observa-se que para o núcleo de seção transversal retangular, quando o mesmo está em uma linha de transmissão em sua carga mínima e tendo corrente de 100 A, a corrente que alimentará o retificador em sua parte CC, será insuficiente para alimentar um conjunto, Z_1 de LED.

Para a situação de carga máxima em núcleo de seção transversal retangular o mesmo poderá alimentar até 3 cargas de LED (Z_1 , Z_2 e Z_3), as quais tem um consumo total de 1,2 A. Porém quando observada, a mesma situação, para a potência recuperada em núcleo com

seção transversal circular tem-se para o valor de menor carga da linha de transmissão, há alimentação suficiente para um conjunto de LED (Z_1), e para quando a linha está em máxima carga a potência recuperada é consideravelmente superior à exigida para acionar os quatro conjuntos de LED pretendidos (Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4), que juntos consomem uma corrente máxima de 1,6 A, sendo que a corrente máxima colhida chega a 3,845 A em simulação.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentada a ideia de iluminar as esferas de sinalização com LED, além de interessante é viável, utilizando a recuperação do campo magnético dos condutores de fase das linhas de transmissão.

Assim, em comparação com alguns trabalhos citados, uma das contribuições dessa dissertação foi à aplicação da utilização dos LED nas esferas de sinalização, com um algoritmo capaz de simular bobinas e núcleos com diferentes dimensões.

Os valores obtidos por simulação são mais próximos aos experimentais quando o núcleo está na região de linearidade da sua curva de magnetização. Este fato deve-se ao efeito desmagnetizante da reação de armadura, ocasionada pela presença de corrente elétrica no secundário.

Ao analisar os resultados, identifica-se a viabilidade do sistema proposto de recuperação de energia, principalmente em relação a bobinas de seção transversal circular, quando comparada a seção transversal retangular de mesmo perímetro e número de espiras. Tal fato poderá ser compensado aumentando a área da seção transversal do núcleo e da bobina, se for utilizar o formato retangular.

Por fim, com os resultados obtidos, há a possibilidade de continuação dos estudos já desenvolvidos, a fim de oferecer em um futuro próximo, uma solução comercial para a segurança e prevenção de acidentes nas linhas de transmissão com esferas de sinalização iluminadas por LED.

REFERÊNCIAS

- [1] T. M. Silveira, P. K. P. de Melo, L. A. Correia Filho, G. Fontgalland e R. C. S. Freire, “BR202017007597-0, ” Instituto Nacional de Propriedade Industrial - INPI, Patente de Modelo de Utilidade, Brasil, abril de 2017.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Indicadores de Desempenho do SIN (Sistema Interligado Nacional). July, 2017.
- [3] Secretaria de Energia Elétrica do Brasil “Informativo Tarifário Energia Elétrica, ” 22. ed. Agosto 2016.
- [4] Proteção de Sistemas Elétricos – Aneel, “Classificação de Desligamentos Forçados no Sistema SIPER”, disponível em <http://www.aneel.gov.br/documents/10184/15926296/5+-+ONS+-+Apresenta%C3%A7%C3%A3o_Classif+Deslig+For%C3%A7ados+SIPER.pdf/4ce83280-5f32-4829-153d-851d4d5eec93> acessado em janeiro de 2018.
- [5] Agência Brasil, “Falha no sistema interligado provoca falta de energia em várias regiões, ” disponível em <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-02/falha-no-sistema-interligado-provoca-falta-de-energia-em-varias-regioes>, publicado em 4 de fevereiro de 2014, por Nielmar de Oliveira Rio de Janeiro, acessado em outubro de 2017.
- [6] Elektro – Distribuidora de Energia, “Falha no sistema nacional afeta 42 cidades da Elektro”, disponível em <<https://www.elektro.com.br/noticias/01/28/2018/falha-no-sistema-nacional-afeta-42-cidades-da-elektro>>, acessado em janeiro de 2018.
- [7] T. M. Silveira, P. K. P. de Melo, L. A. Correia Filho, G. Fontgalland, R. C. S. Freire, B. A. Luciano, R. de Amorim Junior e G. F. Aragão, “BR202017018440-0, ” Instituto Nacional de Propriedade Industrial - INPI, Patente de Modelo de Utilidade, Brasil, agosto de 2017.
- [8] Farias, Leonel; Sellitto, Miguel. Uso da Energia ao Longo da História: evolução e perspectivas futuras
- [9] Fonseca, Rômulo Soares. Iluminação Elétrica. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1972.
- [10] Hémerly, Daniel; Bebie, Jean Claude; Deléage, Jean-Paul. Uma História da Energia. Brasília: Editora Universidade de Brasília. 1993.
- [11] Terciote, Ricardo. Eficiência energética de um sistema eólico isolado. UNICAMP, Campinas: 2002. Disponível em:< <https://www.feagri.unicamp.br/energia/agrener2002/jdownloads/pdf/0100.pdf> >. Acesso em: jan. 2018.

- [12] Dutra, Ricardo Marques. Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. Tese de Mestrado, Rio de Janeiro: 2001. Disponível em: < <http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rmdutra.pdf>>. Acesso em jan. 2018.
- [13] Tillmann, Carlos. Motores de Combustão Interna e seus Sistemas. UFRM, 2013. Disponível em: < http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf >. Acesso em: jan. 2018.
- [14] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas - Energia Nuclear. Brasília, 2009. Disponível em:<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap8.pdf>. Acesso em: jan. 2018.
- [15] Alencar, Marcelo S. Telefonia Celular Digital, Editora Érica, 3ª Ed – 2013.
- [16] T. L. V. de N. da Silva, “Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal para Recuperação de Energia Eletromagnética, ” Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, outubro de 2016.
- [17] T. C. de Albuquerque, “Antenas Bioinspiradas Em Plantas Para Recuperação De Energia Eletromagnética Do Ambiente, ” Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, outubro de 2016.
- [18] S. Pattanaik, S. Mishra, S. Haider and S. Bhuyan, "Energy harvesting through acoustic field for powering low power electronic devices," *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IPACT.2017.8245155.
- [19] N. Ramsaroop, O. O. Olugbara and E. Joubert, "Exploring energy harvesting technology for wireless charging of mobile device batteries," *2017 Conference on Information Communication Technology and Society (ICTAS)*, Umhlanga, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICTAS.2017.7920652.
- [20] S. Y. Prawiro and M. A. Murti, "Wireless power transfer solution for smart charger with RF energy harvesting in public area," *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Singapore, 2018, pp. 103-106. doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355160.
- [21] X. Chen, L. Huang, J. Xing, Z. Shi and Z. Xie, "Energy harvesting system and circuits for ambient WiFi energy harvesting," *2017 12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*, Houston, TX, 2017, pp. 769-772. doi: 10.1109/ICCSE.2017.8085597.
- [22] L. Li, "MEMS/NEMS and Their Applications in Internet of Things, Energy Harvesting, Sensors and Actuators," *2017 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)*, Wuhan, 2017, pp. xxii-xxii. doi: 10.1109/ICIICII.2017.8352606.

- [23] P. Pereira, R. C. M. Pimenta, R. Adriano, G. L. F. Brandão and Ú. C. Resende, "Antenna impedance correction for low power energy harvesting devices," 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Aguas de Lindoia, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/IMOC.2017.8121124.
- [24] D. Vinko, "Minimizing switching time of energy harvesting management circuit," 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2018, pp. 0099-0102. doi: 10.23919/MIPRO.2018.8400019.
- [25] J. Jianan, B. Liang, L. Yuren, G. Yingsong and H. Pengju, "Design and analysis of the energy conversion device in the electromagnetic aeroelastic energy harvesting system," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017, pp. 4130-4136. doi: 10.1109/IECON.2017.8216708.
- [26] S. N. Deepa and B. S. S. Rani, "RF energy harvesting using 900MHz of mobile signal frequency to charging the mobile battery," 2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT), Coimbatore, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/IGEHT.2017.8094066.
- [27] J. Núñez and M. J. Avedillo, "Reducing the Impact of Reverse Currents in Tunnel FET Rectifiers for Energy Harvesting Applications," in IEEE Journal of the Electron Devices Society, vol. 5, no. 6, pp. 530-534, Nov. 2017. doi: 10.1109/JEDS.2017.2737598.
- [28] S. Nguyen and R. Amirtharajah, "A hybrid RF and vibration energy harvester for wearable devices," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018, pp. 1060-1064. doi: 10.1109/APEC.2018.8341146.
- [29] D. Dalabeih, B. Haws and S. Muhtaseb, "Harvesting kinetic energy of footsteps on specially designed floor tiles," 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/IREC.2018.8362566.
- [30] Z. E. Kaya, S. B. Tekin and S. Kalem, "Energy harvesting power management circuit design in 22nm FDSOI technology," 2018 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSOI-ULIS), Granada, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/ULIS.2018.8354748.
- [31] M. Aldrigo et al., "Harvesting Electromagnetic Energy in the V-Band Using a Rectenna Formed by a Bow Tie Integrated With a 6-nm-Thick Au/HfO₂/Pt Metal-Insulator-Metal Diode," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 65, no. 7, pp. 2973-2980, July 2018. doi: 10.1109/TED.2018.2835138.
- [32] N. Garg and R. Garg, "Energy harvesting in IoT devices: A survey," 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, 2017, pp. 127-131. doi: 10.1109/ISS1.2017.8389371.

- [33] T. Shahjabi and K. V. Babu, "Cooperative scheme for wireless energy harvesting and spectrum sharing in cognitive 5G networks," 2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore, 2017, pp. 57-61. doi: 10.1109/ICEEIMT.2017.8116805.
- [34] Y. Mao, G. Yu and C. Zhong, "Energy Consumption Analysis of Energy Harvesting Systems with Power Grid," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 2, no. 6, pp. 611-614, December 2013. doi: 10.1109/WCL.2013.081913.130391.
- [35] X. Zeng, B. Li, H. Li, S. Chen and Y. Chen, "Non-invasive energy harvesting for wireless sensors from electromagnetic fields around 10kV three-core power cables," 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Xi'an, 2017, pp. 536-539. doi: 10.1109/ICEMPE.2017.7982197.
- [36] G. C. Martins and W. A. Serdijn, "Adaptive buck-boost converter for RF energy harvesting and transfer in biomedical applications," 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Shanghai, 2016, pp. 332-335. doi: 10.1109/BioCAS.2016.7833799.
- [37] N. M. Roscoe and M. D. Judd, "Harvesting Energy From Magnetic Fields to Power Condition Monitoring Sensors," in IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 6, pp. 2263-2270, June 2013. doi: 10.1109/JSEN.2013.2251625.
- [38] Batista, T. C.; Luciano, B. A.; Freire, R. C. S.; Castro, W. B.; Araújo, E. M. "Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores". Journal of Alloys and Compounds, p. S228-S230, 2014.
- [39] Y. Zhuang et al., "An improved energy harvesting system on power transmission lines," 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, 2017, pp. 1-3. doi: 10.1109/WPT.2017.7953847.
- [40] Collin, Robert E. Foundations for Microwave Engineering, Editora John Wiley & Sons, 2ª Ed – 2001.
- [41] Halliday, Resnick e Krane, Livro de Física 3, Editora LTC, 5ª Ed – 2004.
- [42] Farias, Wendell. Modelagem de Nucleos Magneticos não Lineares baseado em Dados Experimentais, Dissertação de Mestrado, UFPB, 2016.
- [43] Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr, Charles; Umans, Stephen D. "Máquinas Elétricas, com Introdução à Eletrônica de Potência", 6ª ed, 2006.
- [44] ABNT, "NBR-5440," pp. 1-28, 1999.
- [45] ABNT, "NBR-5422," pp. 1-58, 1985.

- [46] ABNT, “NBR-7276” pp. 1-16, 1993, atualizada em 2005.
- [47] Akihiro, Makino; Takeshi, Kubota; Kunio, Yubuta; Akihisa, Inoue; Akiri, Urata; Hiroyuki, Matsumoto; Shigeyoshi, Yoshida. Low core losses and magnetic properties of Fe85-86Si1-2B8P4Cu1 nanocrystalline alloys with high B for power applications (invited), *Journal of Applied Physics* 109, 07 a 302, 2011, doi: 10.1063/1.3535169.
- [48] Edufer, “Tabela de fios esmaltados, ” disponível em <<http://www.edufer.com.br/tabela-fios-magneticos/>>, acessado em setembro de 2017.
- [49] Song Xianjin, Liu Guoqiang, Li Yanhong, Zhang Chao and Xu Xiaoyu, "Analyses and experiments of field-circuit coupling equations for wireless power transfer using solenoidal coils," 2015 IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015), Shenzhen, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEEE-IWS.2015.7164593.
- [50] M. Berlec, D. Makuc, M. Zagirnyak and D. Miljavec, "Magnetic field in aerial toroidal and poloidal coil system arrangement," 13th Mechatronika 2010, Trencianske Teplice, 2010, pp. 34-38.
- [51] WeiWang, Xueliang Huang, Linlin Tan, Jinpeng Guo and Han Liu, “Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines” *Energies Journal*, 2016, 9, 242. doi:10.3390/en9040242.
- [52] J. W. McLean. “Inductor design using amorphous metal C-cores”. *IEEE Circuits and Design Magazine*, Vol. 12, 26-30, 1996.
- [53] Santos, Maraiza Prescila dos, “Sistema eletrônico energeticamente autônomo com colheita de energia por indução magnética” Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federa da Paraíba – UFPB, João Pessoa - PB, 2015.
- [54] Technical data, Additional Information & Downloads, Disponível em <<https://www.dcmsistemas.com/en/technical-data/additional-information/57/ip65-ip67-and-ip69k-devices/>>, acessado em julho de 2018.
- [55] Ez-Light, “Catalogo de LED”, disponível em <<http://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/130865.pdf>> acessado em junho de 2018.

ANEXO I: ALGORITMO ELABORADO – ESTRUTURA BASE

```
% Algoritmo

% Cálculo Bobinas e Núcleos

%Correte da Linha de Transmissão

I1= input ('Digite o valor da corrente da linha de transmissão:
')

% u0 -> Permeabilidade magnética do vácuo

u0=4*pi*10^-7;

% umat -> Permeabilidade relativa do material

umat=input('Digite a Permeabilidade relativa do material, para
o "ar" digite 1: ');

%u -> permeabilidade total

u=umat*u0;

%Caracteristica da Bobina

%Raio médio da Bobina
  %Raio Interno

  r1= input ('digite o valor do Raio Interno: ')

  %Raio Externo

  r2= input ('digite o valor do Raio Externo: ')

  %Raio Médio

  Rmed = (r2+r1)/2;

  % Tamanho do Entreferro

  e = 0.12*10^-2;

  % Comprimento Medio da Bobina com Núcleo

  lo = 2*pi*Rmed;

  l  = ((lo) - (2*e));

% Áreas das seção transversal
```

```

    %Raio interno do Núcleo

    Rn = r2 - r1;
    Amag = pi*Rn^2;
    Aar = pi*(Rn+e/2)^2;

    %Numero de Espiras do Primário (N1) e Secundário (N2)

    N1=1;
    N2= input ('digite o número de espiras: ')

    %Frequência da Linha de Transmissão;

    freq=60;

    %Relutâncias equivalentes

    Req = (((1)/(u*Amag))+(2*e/(u0*Aar)));

    % Indutância Mutua entre os Enrolamentos

    M = ((N1*N2)/Req);

    %Indutância no Enrolamento do Secundário

    L2 = ((N2^2)/Req);

    % %Intensidade de Campo Magnético
    H =(I1/(l));

    %Densidade de Fluxo magnético no Núcleo da Bobina
    B = ((u.*I1)./(2*pi*Rn)).*log(r2/r1);

    %Fluxo Magnético Concatenado

    fluxo=B.*Amag;

    %Corrente no Secundário

    I2 = ((M.*I1-fluxo)/L2)

    %Energia Recuperada
    W2=abs(M.*I1.*I2-(L2.*((I2).^2)./2))

    plot( W2, I1, 'r', 'LineWidth', 3)

```


ANEXO II: PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

Artigos Publicados

1. Melo, P. K. P. ; Fontgalland, G. ; Silveira, T. M. ; Aragao, G. F. ; Correia Filho, L. A. ; Batista, A. A. ; Freire, R. C. S., “**Proposta de uma Bobina para Recuperação de Energia em Linhas de Transmissão**”, ENCOM-2017, São Luis. Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia, 2017.

Disponível em <https://www.iecom.org.br/encom2017/ENCOM_files/anaisencom.pdf>

2. Silveira, T. M.; Fontgalland, G. ; Correia Filho, L. A. ; Melo, P. K. P. ; Amorim Junior, R. ; Freire, R. C. S. ; Luciano, B. A., “**Recuperação de Campos Eletromagnéticos Dispersos em Linha de Transmissão Utilizando Bobina de Colheita de Energia**”, ENCOM-2017, São Luis. Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia, 2017.

Disponível em <https://www.iecom.org.br/encom2017/ENCOM_files/anaisencom.pdf>

3. Raymundo de Amorim; Glauco Fontgalland; Joao R. Zacarias; Tagleorge M. Silveira; Isabel Fontgalland; Humberto Dionisio, “Matching Improvement of an Asymmetric Biomimetic Antenna Array for Source Locating”, 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS).

DOI: 10.1109/RWS.2018.8304993.

4. Vinicius Oliveira; Glauco Fontgalland; Raquel Rodrigues; Tagleorge Silveira; Clesio Melo; Isabel Fontgalland, “Design, simulation and fabrication of low cost UHF RFID reader antenna for hospital applications”, 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC).

DOI: 10.23919/GEMIC.2018.8335022.

Artigos Aceitos

1. Correia Filho, L. A. ; Fontgalland, G. ; Amorim Junior, R.; Silveira, T. M.; Andrade, H. D.; Ferreira, P. I., “Direction of Arrival Estimation Algorithm for Smart Antennas Based on Independent Component Analysis” for publication the 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity in Long Beach, USA.

Data da Conferencia: July 30 - August 3, 2018

2. Tagleorge M. Silveira, Glauco Fontgalland, Benedito A. Luciano, Luis A. Correia Filho¹, Raymundo de Amorim Junior and Vinicius M. U. L. Oliveira, “**Magnetic Sensor Design Using Energy Harvesting Coil**”, MOMAG 2018, Santa Rita do Sapucaí – MG.

Data da Conferencia: 12 a 15 de Agosto de 2018.

3. Amorim Junior, R.; Fontgalland, G. ; Silveira, T. M.; Correia Filho, L. A. ; Andrade, H. D., “Application of Hard-Surface Technique for Reduction of Mutual Coupling in High Coupled Antennas”, MOMAG 2018, Santa Rita do Sapucaí – MG.

Data da Conferencia: 12 a 15 de Agosto de 2018.

5. Nunes, L.S.; Fontgalland, G.; Abrantes, C.; Silveira, T. M.; “Analysis of the Response of a Compound Based on Magnetic Nanoparticles to a Magnetic Field” MOMAG 2018, Santa Rita do Sapucaí – MG.

Data da Conferencia: 12 a 15 de Agosto de 2018.

6. Pedro P. F. do Nascimento, Glauco Fontgalland, Raymundo de Amorim Júnior, Tagleorge M. Silveira and Rodrigo C. F. da Silva. “Bandwidth Enhancement of an Ultra Wide Band Planar Inverted F-Antenna” SBrT 2018, Campina Grande – PB.

Data da Conferencia: 16 a 19 de Setembro de 2018.

Patentes Desenvolvidas

1. Silveira, T. M.; Melo, P. K. P. ; Correia Filho, L. A. ; Fontgalland, G. ; Freire, R. C. S. . Esfera De Sinalização De Linha De Transmissão Iluminada Com Circuito De Colheita De Energia. 2017, Brasil. Patente: Modelo De Utilidade. Número Do Registro: Br2020170075970, Título: "**Esfera De Sinalização De Linha De Transmissão Iluminada Com Circuito De Colheita De Energia**", Instituição De Registro: INPI - Instituto Nacional Da Propriedade Industrial, Depositante (S): Universidade Federal De Campina Grande, Depósito em 12/04/2017, com Aceite Preliminar.

2. Silveira, T. M.; Melo, P. K. P. ; Correia Filho, L. A. ; Fontgalland, G. ; Freire, R. C. S. ; Luciano, B. A. ; Amorim Junior, R. ; Arago, G. F. . Circuito De Monitoramento De Grandezas Elétricas Acoplado A Uma Esfera De Sinalização De Linha De Transmissão Georreferenciada Com Circuito De Colheita De Energia. 2017, Brasil. Patente: Modelo De Utilidade. Número Do Registro: Br2020170184400, Título: "**Circuito De Monitoramento De Grandezas Elétricas Acoplado A Uma Esfera De Sinalização De Linha De Transmissão Georreferenciada Com Circuito De Colheita De Energia**", Instituição De Registro: INPI - Instituto Nacional Da Propriedade Industrial, Depositante (S): Universidade Federal De Campina Grande, Depósito em 28/08/2017, com Aceite Preliminar.

