

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

MARAIZA PRESCILA DOS SANTOS

**SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO
COM COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA**

JOÃO PESSOA – PB
2015

MARAIZA PRESCILA DOS SANTOS

**SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO
COM COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientadores: Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza
Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez**

JOÃO PESSOA – PB

2015

S237s Santos, Maraiza Prescila dos.
Sistema eletrônico energeticamente autônomo com colheita de energia por indução magnética / Maraiza Prescila dos Santos.- João Pessoa, 2015.
92f. : il.
Orientadores: Cleonilson Protásio de Souza, Yuri Percy Molina Rodriguez
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR
1. Engenharia elétrica. 2. Colheita de energia. 3. Indução magnética. 4. Transdutor eletromagnético. 5. Circuito - condicionamento de energia.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

**SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO
COM COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA**

Elaborada por

MARAIZA PRESCILA DOS SANTOS

como requisito final para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA – UFPB/CEAR/DEE
(Orientador - Presidente da Banca)

PROF. DR. YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ – UFPB/CEAR/DEE
(Orientador)

PROF. DR. ALEXANDRE CEZAR DE CASTRO – UFPB/CEAR/DEE
(Membro Interno)

PROF. DR. RICARDO MOREIRA DA SILVA – UFPB/CT/DEP
(Membro Externo)

João Pessoa - PB, 24 de Fevereiro de 2015.

Dedico

À minha família!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dá discernimento, sabedoria, força e coragem para vencer os obstáculos impostos ao longo desta jornada e chegar à conclusão desta etapa da minha vida acadêmica. Obrigada por tudo senhor Jesus!

Agradeço, especialmente, a minha família, pelo amor, incentivo, apoio e compreensão de sempre, por ser meu porto seguro, minha fortaleza em todos os momentos da minha vida. A minha mãe, Joaneide, meu exemplo de heroína sempre perseverante, corajosa, honesta e lutadora. A meu pai, João, meu exemplo de honestidade, caráter e humildade, a minha irmã Vitória pelo “simples” fato de existir e de me apoiar nos momentos mais difíceis e inesperados. A minha irmã Maria de Fátima (*in memória*) por fazer parte da minha vida, apesar da ausência física.

Ao meu noivo José Kleber, por está sempre ao meu lado, pela compreensão nos momentos de minha ausência, por me aconselhar nas decisões difíceis.

Aos meus orientadores, professores Dr. Cleonilson Protásio de Souza, exemplo de pesquisador que sempre busca extrair o melhor dos seus alunos, e Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez, exemplo de profissional e pesquisador. Quero agradecê-los por me confiarem à pesquisa e pelas orientações imprescindíveis para a conclusão da mesma.

Aos meus colegas da Pós-graduação, em especial aqueles que fazem parte do Laboratório de Microengenharia, pelo companheirismo.

Ao INCT NAMITEC e CNPQ pelo apoio e suporte financeiro dado a esta pesquisa.

A coordenação do PPGE e a UFPB por disponibilizarem o ambiente adequado para realização dos nossos estudos.

A todos os professores que até hoje fizeram parte da minha vida acadêmica, a todos dedico uma profunda gratidão. Quero aproveitar este momento para agradecer por todo conhecimento acadêmico e de vida que vocês me passaram.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“Em todo o espaço há energia... é (só) uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia.”

(Nikola Tesla)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE GRÁFICOS	XI
LISTA DE TABELAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO.....	22
2.2 REDES DE SENSORES SEM FIOS	24
2.3 COLHEITA DE ENERGIA	25
2.4 COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA – CEIM	26
2.5 TRANSDUTOR ELETROMAGNÉTICO.....	28
2.5.1 Transformador de Corrente – TC	29
2.6 MATERIAIS MAGNÉTICOS	30
2.6.1 Domínios Magnéticos	32
2.7 MAGNETIZAÇÃO E HISTERESE MAGNÉTICA.....	33
2.8 TRABALHOS RELACIONADOS	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 BANCADA DE TESTES	38
3.1.1 Plataforma Experimental	39
3.1.2 Instrumentos para Medições	41
3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O TRANSDUTOR.....	41
3.2.1 Densidade de potência X Carga resistiva, transdutores com características diferentes.....	42
3.2.2 Densidade de potência X Carga resistiva, para transdutores com números de espiras iguais	47
3.2.3 Corrente no primário de 15 Ampères.	50
3.2.4 Corrente no primário x Tensão induzida	53
3.2.5 Caracterização da Liga Nanocristalina	55
3.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO	56
3.3.1 Compensador Capacitivo	57
3.3.2 Circuito Retificador, Filtro e Regulador de tensão.	59

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	ANÁLISE DO TRANSDUTOR NANOCRISTALINO	64
4.2	BOBINAS SECUNDÁRIAS LIGADAS EM PARALELO	67
4.3	CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO	70
4.4	APLICAÇÃO - NÓ SENSOR NRF24LE1	72
4.5	COMPENSADOR CAPACITIVO	75
5	CONCLUSÕES	78
6	TRABALHOS PUBLICADOS	80
7	TEMA PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE 1 - DADOS OBTIDOS PARA TRANSDUTORES COM CARACTERÍSTICAS DIFERENTES	87
	APÊNDICE 2 - DADOS OBTIDOS PARA TRANSDUTORES COM NÚMEROS DE ESPIRAS IGUAIS	89
	APÊNDICE 3 - DADOS OBTIDOS PARA CORRENTE IP=15A E TRANSDUTORES COM NÚMEROS DE ESPIRAS IGUAIS	90
	APÊNDICE 4 - DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM O COMPENSADOR CAPACITIVO	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ESTRUTURA DO SISTEMA PROPOSTO.....	19
FIGURA 2.1 – ESTRUTURA DE UM SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO.....	22
FIGURA 2.2 – COMPONENTES DE UM TÍPICO NÓ SENSOR SEM FIO.....	24
FIGURA 2.3 – SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA.....	25
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LEI DE BIOT-SAVART.....	27
FIGURA 2.5 – TRANSFORMADOR ELÉTRICO COM DUAS BOBINAS.....	29
FIGURA 2.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TRANSDUTOR ELETROMAGNÉTICO.....	30
FIGURA 2.7 – ALINHAMENTO DOS DOMÍNIOS PARA UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	32
FIGURA 2.8 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E CICLO DE HISTERESE.....	34
FIGURA 3.1 – BANCADA DE TESTES.....	39
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA DE TESTES.....	40
FIGURA 3.3 – TRANSDUTORES COM PARÂMETROS DIFERENTES.....	43
FIGURA 3.4 – ESTRUTURA EXPERIMENTAL UTILIZADA.....	44
FIGURA 3.5 – TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS.....	47
FIGURA 3.6 – CONDUTOR PRIMÁRIO COM 3 VOLTAS.....	50
FIGURA 3.7 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE ENERGIA.....	56
FIGURA 3.8 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSDUTOR.....	57
FIGURA 3.9 – APARATO DE INSTRUMENTOS PARA DEFINIR O COMPENSADOR CAPACITIVO.....	59
FIGURA 3.10 – CONFIGURAÇÃO COM DERIVAÇÃO CENTRAL.....	61
FIGURA 3.11 – SIMULAÇÃO (A) ENTRADA (B) RETIFICADOR (C) FILTRO E (D) REGULADOR.....	61
FIGURA 4.1 – TRANSDUTOR COM DUAS BOBINAS.....	67
FIGURA 4.2 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DUAS BOBINAS EM PARALELO.....	68
FIGURA 4.3 – RESPOSTA INDIVIDUAL DAS BOBINAS B1 E B2.....	68
FIGURA 4.4 – BOBINAS B1 E B2 LIGADAS EM PARALELO.....	69
FIGURA 4.5 – TENSÃO NA SAÍDA DO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA.....	70
FIGURA 4.6 – TENSÃO NA SAÍDA DO FILTRO A CAPACITOR.....	71
FIGURA 4.7 – TENSÃO NA SAÍDA DO REGULADOR.....	71
FIGURA 4.8 – FONTE DE CEIM DESENVOLVIDA.....	73
FIGURA 4.9 – FLUXOGRAMA EXPLICATIVO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DOIS NÓS.....	73
FIGURA 4.10 – APLICAÇÃO COM DOIS NÓS ALIMENTADOS PELAS FONTES DE CEIM.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA (A) LIGA NANOCRISTALINO (B) FERRITA.....	45
GRÁFICO 3.2 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA PARA OS TRANSDUTORES.	45
GRÁFICO 3.3 – CARGA X DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA OS DOIS TRANSDUTORES	46
GRÁFICO 3.4 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA, TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS.	48
GRÁFICO 3.5 – CARGA RESISTIVA X DENSIDADE DE POTÊNCIA, BOBINAS IGUAIS.....	49
GRÁFICO 3.6 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA PARA $I_P=15$ A.	51
GRÁFICO 3.7 – CARGA RESISTIVA X DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA $I_P=15$ A.	52
GRÁFICO 3.8 – TENSÃO INDUZIDA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE NO PRIMÁRIO.	53
GRÁFICO 3.9 – TENSÃO INDUZIDA EFICAZ E DE PICO VERSUS CORRENTE NO PRIMÁRIO. ...	54
GRÁFICO 4.1 – TENSÃO INDUZIDA EFICAZ X CORRENTE I_P PARA O TRANSDUTOR DA LIGA NANOCRISTALINA.	65
GRÁFICO 4.2 – TENSÃO INDUZIDA PARA DIFERENTES AMPLITUDES DE I_P	66
GRÁFICO 4.3 – POTÊNCIA X CAPACITÂNCIA.	75
GRÁFICO 4.4 – CORRENTE NO PRIMÁRIO I_P X CAPACITÂNCIA.....	75
GRÁFICO 4.5 – CAPACITÂNCIA X DENSIDADE DE POTÊNCIA.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – RESUMO DO DESEMPENHO DE ALGUMAS FONTES DE COLHEITA DE ENERGIA.....	26
TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	32
TABELA 2.3 – PESQUISAS REFERENTES À COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO.....	36
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES COM ESPIRAS DIFERENTES.....	43
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS.....	48
TABELA 3.3 – RESUMO DOS MELHORES RESULTADOS PARA OS TRANSDUTORES.....	52
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DO TRANSDUTOR COM DUAS BOBINAS.....	67

RESUMO

SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO COM COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA.

Nas últimas décadas, a crescente demanda por circuitos eletrônicos miniaturizados, portáteis e autônomos, vem intensificando a busca por novas e adequadas fontes energéticas. Seguindo este contexto, o propósito desta dissertação é desenvolver um sistema eletrônico energeticamente autônomo, alimentado por colheita de energia magnética. Sendo o sistema de colheita composto por um transdutor eletromagnético, para captar e converter o campo magnético disperso em torno de linhas de potência, e um circuito eletrônico para condicionar a energia gerada pelo transdutor e fornecer a potência adequada para uma carga resistiva de baixo consumo. Uma metodologia experimental foi empregada para selecionar o material adequado para o núcleo do transdutor, por isso, foram realizados diversos testes em laboratório para analisar e comparar o desempenho dos transdutores em relação à potência e a densidade de potência, fornecidas pelos transdutores de dois materiais ferromagnéticos distintos, a Ferrita e a liga Nanocristalina (FeSiB). Após a análise dos dados, concluiu-se que para esta aplicação a liga Nanocristalina apresentou os melhores resultados quanto à densidade de potência, e por isso, foi selecionada como o material do núcleo toroidal do transdutor. Porém, na saída da bobina secundária se observou altos picos de tensão, de modo que poderia ocasionar danos aos dispositivos eletrônicos do circuito conectado a bobina. Portanto, optou-se por fazer a divisão da bobina secundária em dois enrolamentos, ambos ligados em paralelo, para reduzir a indutância, ao final constatou-se a eficácia da solução, pois, reduziu os picos de tensão e manteve a magnitude da tensão eficaz. Contudo, o transdutor apresentou alta reatância indutiva, devido os seus parâmetros físicos, em particular, a alta permeabilidade, para compensá-la foram utilizadas capacitâncias ligadas em série com a bobina, a fim de definir a situação ideal para o sistema fornecer a máxima potência à carga. O circuito de condicionamento de energia foi projetado para alimentar o nó sensor sem fio nRF24LE1 da *Nordic semiconductors*, para tanto, foram projetados um retificador de onda completa, um filtro à capacitor e um regulador de tensão. Por fim, pode-se concluir que um sistema eletrônico com autonomia energética pode ser implementado, utilizando-se como fonte de alimentação a colheita de energia por indução magnética, e o mesmo pode ser instalado em ambientes nos quais existam um campo magnético disponível para ser “aproveitado”.

Palavras-chave: Colheita de energia, indução magnética, transdutor eletromagnético, circuito de condicionamento de energia.

ABSTRACT

ELECTRONIC SYSTEM ENERGETICALLY AUTONOMOUS WITH ENERGY HARVESTING BY MAGNETIC INDUCTION.

In recent decades, the growing demand for miniaturized, portable and autonomous electronics has intensified the search for new and appropriate energy sources. Following this context, the purpose of this work is to develop an energy-autonomous electronic system, powered by magnetic energy harvesting. Being the energy harvesting system composed of an electromagnetic transducer, to capture and convert stray magnetic field around power lines, and an electronic circuit to condition the energy generated by the transducer and provide adequate power for a resistive load of low consumption. An experimental methodology was employed to select the appropriate material for the core of the transducer therefore been conducted many laboratory tests to analyze and compare the performance of the transducers with respect to power and power density provided by the transducers two ferromagnetic materials distinct, the Ferrite and Nanocrystalline Alloy (FeSiB). After analyzing the data, it is concluded that for this application the Nanocrystalline Alloy showed the best results in terms of power density, and therefore, was selected as the material of the toroidal core of the transducer. However, in the output of the secondary coil was observed high voltage peaks, so that could cause damage to electronic devices connected to the coil circuit. Therefore, it chose to divide the secondary coil into two coils, both connected in parallel to reduce the inductance, at end It is found the effectiveness of the solution, because, reduced voltage spikes and kept the magnitude of the effective tension. However, the showed transducer high inductive reactance, due to its physical parameters, in particular, the high permeability, to compensate were used capacitances connected in series with the coil, in order to define the ideal situation for the system provide maximum power for the load. The power conditioning circuit has been designed to power the wireless sensor node nRF24LE1 the Nordic semiconductors, therefore, have been designed a full-wave rectifier, a filter to the capacitor and a voltage regulator. Finally, it can be concluded that an electronic system with energetic autonomy could be implemented, using as power supply the energy harvesting by magnetic induction, and it can be installed in environments in which there is a magnetic field available for "exploited".

Keywords: Energy harvesting, magnetic induction, electromagnetic transducer, power conditioning circuit.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os dispositivos eletrônicos vêm passando por uma constante evolução, a qual proporcionou o desenvolvimento de sistemas eletrônicos cada vez menores, mais robustos e com baixo consumo energético. Devido a esta evolução, muitas aplicações inovadoras e importantes tornaram-se possíveis, como no caso dos circuitos integrados, imprescindíveis para a miniaturização da eletrônica. Além disto, a redução do consumo energético por estes dispositivos eletrônicos miniaturizados possibilitou a portabilidade e a operação energeticamente autônoma dos sistemas eletrônicos. Um exemplo prático da eletrônica autônoma e portátil são os sistemas eletrônicos energeticamente autônomos ou SEEs, os quais são projetados para captar dados de sensores instalados remotamente em ambientes diversos sem estar fisicamente ligado a uma rede de energia elétrica (TARTAGNI, 2009).

Embora os sistemas energeticamente autônomos possam ser considerados uma evolução importante para as aplicações remotas, os mesmos oferecem algumas limitações impostas pelas fontes de energia que são utilizadas atualmente. Pois estas fontes têm a vida útil com duração finita, como no caso das baterias e pilhas alcalinas, e por isso, apresentam a necessidade de manutenção periódica para trocá-las ou recarregá-las, acrescentando custos financeiros e ambientais aos SEEs, o qual dependendo da aplicação pode se tornar inviável (DEWAN, AY, *et al.*, 2014).

De acordo com Tartagni (2009), mesmo com a evolução dos dispositivos eletrônicos, não é simples desenvolver um sistema totalmente independente do ponto de vista energético, por isso o que se tem atualmente são sistemas com capacidade de operar com ultra baixo consumo, entre μW (microwatts) e mW (miliwatts) de potência, os quais podem ser alimentados por fontes de energia com duração finita. Para Kansal *et al* (2007), isto ocorre devido a evolução destas fontes não ter acontecido em equivalência com a evolução dos dispositivos eletrônicos.

Desta forma, para aplicações em que o sistema precisa funcionar com autonomia energética por longos períodos, a energia se torna um gargalo grave, por isso, esforços tem sido gasto no gerenciamento da energia destas fontes para aumentar a sua vida útil.

Como exemplo de sistemas eletrônicos energeticamente autônomos que dependem destas fontes, destacam-se os nós sensores inteligentes, os quais podem ser utilizados para formar uma rede de sensores sem fio para monitoramento remoto. Estes nós sensores inteligentes são equipados basicamente com a unidade de sensoriamento, um processador de memória, um rádio, um atuador e uma fonte de potência, todos estes componentes são dispositivos projetados para operar, preferencialmente, com baixo consumo energético (YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008). Neste contexto, Walteneagus *et al* (2010) destaca que a fonte de energia utilizada atualmente, é o fator mais limitante para a expansão da tecnologia dos SEEs, pois, restringe a autonomia, o peso e a capacidade computacional dos mesmos.

Na última década uma alternativa de fonte energética tem sido estudada e proposta para complementar ou até mesmo substituir as fontes energética de duração finita, a técnica conhecida por colheita de energia, a qual aproveita energia do ambiente, no qual o sistema está instalado, para alimentá-los.

A colheita de energia é uma alternativa viável, pois, a mesma se utiliza de pequenas quantidades de energia dispersa no ambiente, a fim de captá-la e convertê-la em energia elétrica utilizável. Para a conversão energética são utilizados transdutores adequados a cada tipo de fonte de energia (BEEBY e WHITE, 2010).

As fontes de energia para colheita podem ser encontradas no ambiente em diversas formas, tais como energia vibracional mecânica, luminosa, térmica, eletromecânica e eletromagnética (DEWAN, AY, *et al.*, 2014). Diante da grande diversidade de opções de energias disponíveis é importante destacar que a aplicação e o ambiente a ser instalado, geralmente, definem a fonte a ser utilizada.

A colheita de energia por indução magnética (CEIM), é a técnica pela qual o campo magnético disperso ao redor de linhas de potência é captado e convertido em energia elétrica, a mesma surgiu para aplicações em redes de sensores sem fio que são utilizadas no monitoramento remoto de parâmetros, como temperatura, umidade, entre outras, em redes de transmissão ou distribuição de energia elétrica (ROSCOE e JUDD, 2013).

Segundo Dewan *et al* (2014), o monitoramento remoto é realizado, praticamente, através da implementação de sensores e como um dos desafios do funcionamento dos sensores em locais remotos é a vida útil dos mesmos devido a

mesma ser limitada pela duração da fonte de alimentação, a CEIM surge como uma alternativa para alimentar os nós sensores, proporcionando autonomia, redução de custos, compromissos ambientais, etc., ao prolongar o tempo de operação dos mesmos.

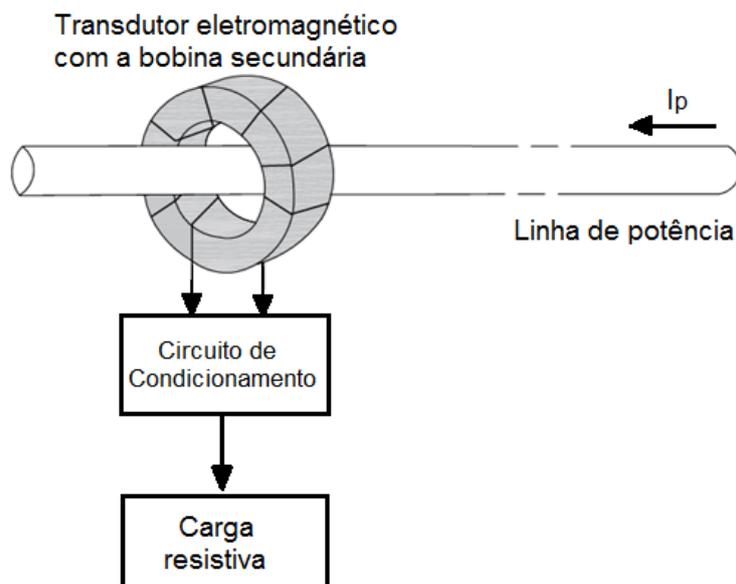
A colheita de energia por indução magnética é realizada através da captação da energia magnética presente no campo magnético induzido, naturalmente, em torno das próprias linhas de potência a serem monitoradas (ROSCOE, JUDD e FITCH, 2009).

A técnica utilizada por Bhuyan *et al* (2010), Wang *et al* (2013), entre outros, para colher o campo magnético e aproveitá-lo, pode ser visto na Figura 1.1, na qual um transdutor eletromagnético com estrutura física semelhante à de um transformador de corrente, é acoplado em uma linha de potência e a bobina secundária com N -espiras induz uma tensão, por vezes, chamada de força eletromotriz, nos seus terminais, e quando ligados a uma carga flui uma corrente elétrica no circuito.

Esta potência fornecida pelo transdutor, em geral, precisa ser condicionada antes de ser fornecida a uma carga. Nesse sentido, trabalhos como Wu *et al* (2013) e Moon *et al* (2013), apresentam propostas de circuitos eletrônicos para o condicionamento da energia colhida, tendo como metas de projeto, o consumo mínimo de potência pelos componentes do sistema, além de projetar circuitos compactos e ao mesmo tempo robustos, entre outras exigências inerentes a cada aplicação.

De acordo como o que foi exposto anteriormente, percebe-se que a colheita de energia se encontra na vanguarda em relação às pesquisas que buscam fontes portáteis, autônomas e alternativas de energia para aplicação em SEEA, especificamente, em rede de sensores sem fio. Portanto, neste trabalho propõem-se o desenvolvimento de um sistema de colheita de energia por indução magnética, o qual deve aproveitar o campo magnético induzido ao redor das linhas de distribuição de energia elétrica para alimentar nós sensores, a fim de torná-los sistemas eletrônicos energeticamente autônomos. Na Figura 1.1, pode ser visto a estrutura do sistema eletrônico energeticamente autônomo proposto.

FIGURA 1.1 – ESTRUTURA DO SISTEMA PROPOSTO.



FONTE: DA AUTORA.

O sistema é composto por um transdutor eletromagnético com núcleo toroidal de material magnético e uma bobina secundária acoplada ao mesmo. Porém, como há diversas opções de materiais magnéticos, serão tomados como referência aqueles caracterizados no trabalho de Moraes Jr. (2013). O sistema também contará com um circuito de condicionamento de energia, para que a potência adequada seja entregue a uma carga.

Assim como os demais sistemas de colheita de energia os quais, de acordo com Beeby *et al* (2010), geralmente, são projetados para atender as necessidades específicas impostas pela aplicação e/ou de acordo com as exigências da carga a ser alimentada, o sistema proposto neste trabalho será projetado para uma carga específica, o nó sensor sem fio nRF24LE1 da NORDIC *Semiconductors*.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico energeticamente autônomo, o qual utiliza como fonte de alimentação a colheita de energia por indução magnética, aproveitando a energia magnética dispersa em torno de linhas de distribuição de energia, para alimentar cargas resistivas de baixo consumo.

Os principais componentes deste sistema a serem desenvolvidos são:

1. Transdutor eletromagnético;
2. Circuito de condicionamento de energia.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Selecionar o material apropriado para o núcleo do transdutor;
- Submeter o material selecionado a testes e analisar a resposta do mesmo;
- Projetar um retificador de baixo consumo;
- Projetar um filtro e um regulador de tensão;
- Projetar um compensador Capacitivo;
- Aplicação prática do sistema de colheita desenvolvido;
- Aplicar técnicas de otimização ao sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO

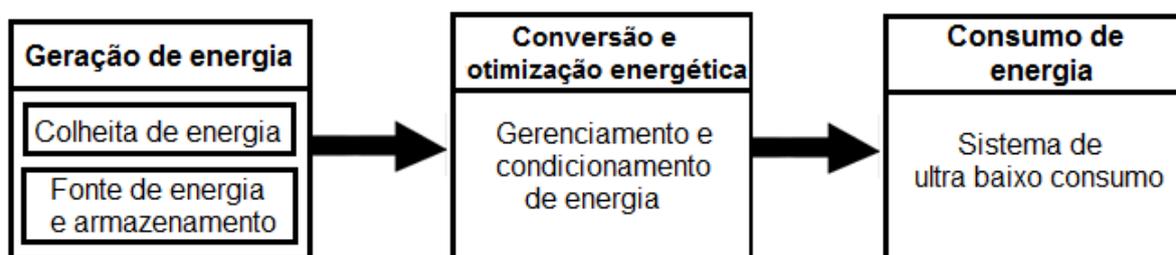
Um sistema eletrônico energeticamente autônomo (SEEA) é definido, de acordo com Tartagni (2009), como um sistema projetado para operar remotamente em ambientes diversos, realizando o monitoramento e o armazenamento de dados o máximo de tempo possível, sem estar fisicamente conectado a uma rede de energia. Dois exemplos clássicos de SEEAs são: as Redes de Sensores Sem-Fio (RSSF) e os biosensores.

Apesar da grande demanda para aplicação de SEEA, atualmente, o que se tem são sistemas com capacidade de operar com ultrabaixo consumo entre microwatts e miliwatts de potência, exigindo menos energia da fonte, e portanto, podem ser alimentados por fontes que não precisam estar ligadas a rede elétrica (TARTAGNI, 2009). No entanto, uma restrição a aplicação de SEEA em lugares remotos, ainda é a duração da vida útil destas fontes.

Atualmente, as fontes portáteis de energia (baterias, pilhas, etc.), é a principal forma de alimentação para suprir os SEEAs, no entanto, estas impõem um fator limitante para a vida útil desses sistemas, pois, devido a energia de duração finita das mesmas, estas precisam ser trocadas ou recarregadas com certa periodicidade, o que dependendo da aplicação de tais sistemas pode acrescentar alto custo financeiro a aplicação, podendo torná-la até impraticável (DEWAN, AY, *et al.*, 2014).

A estrutura física de um sistema eletrônico energeticamente autônomo está representada em blocos na Figura 2.1.

FIGURA 2.1 – ESTRUTURA DE UM SISTEMA ELETRÔNICO ENERGETICAMENTE AUTÔNOMO.



FONTE: ADAPTADO DE TARTAGNI (2009).

A geração de energia pode ser dividida em: colheita de energia, referente ao sistema que possa colher a energia a partir de fontes do ambiente, tais como, diferenças de temperatura, radiação de luz, campos eletromagnéticos, energia cinética, etc.; ou outras fontes de energia, e armazenamento como é o caso das baterias, pilhas, etc.

A conversão de energia e otimização é uma etapa que deve ser desenvolvida objetivando a adequada conversão, mas consumindo o mínimo possível da potência fornecida pela etapa de geração de energia. Para isso, além de conhecer a fonte de colheita é importante saber a aplicação ou a carga a ser alimentada. Por isso, a etapa de consumo de energia, referente à aquisição, armazenamento e transmissão de dados é de fundamental importância já que a maioria das fontes da geração de energia está relacionada com o máximo consumo desta etapa.

Os sistemas eletrônicos energeticamente autônomos contribuem para muitas aplicações, nos mais diversos setores, como:

- Sistemas de segurança sem fio (por exemplo, redes *Ad-hoc* em ambientes agressivos);
- Monitoramento *in-situ* em aplicações móveis (por exemplo, sistemas de monitoramento de pressão dos pneus, controle de processo industrial);
- Dispositivos biomédicos (por exemplo, marca-passos, sistemas de monitoramento de parâmetros biológicos contínuos);
- Geração de fonte energética portátil para a eletrônica móvel.

No entanto, uma das aplicações que recebe um maior destaque em termos de sistema eletrônico energeticamente autônomo alimentado por colheita de energia é as Redes de Sensores Sem Fio, pois, em geral, estas são instaladas onde é têm diversas opções de fontes de colheita provenientes do ambiente, tornando a técnica possível. Por exemplo, monitoramento ambiental em floresta, oceanos e no subsolo, grandes áreas agrícolas, entre outras.

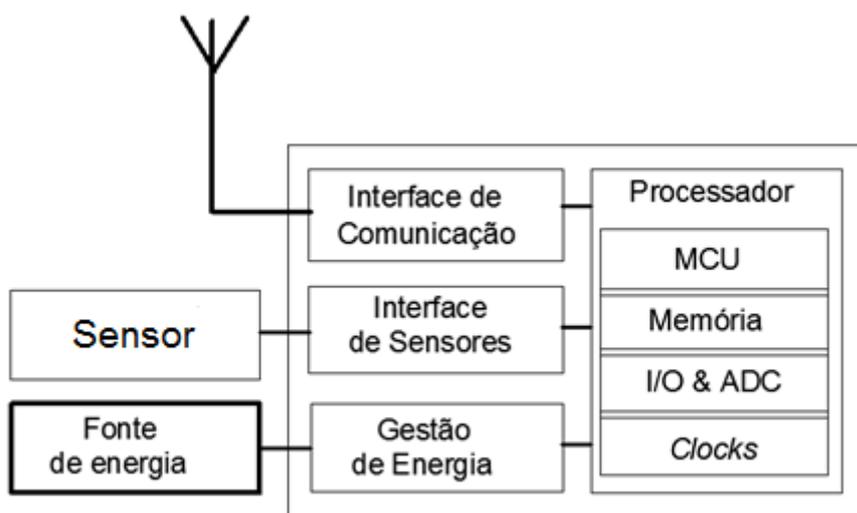
2.2 REDES DE SENSORES SEM FIOS

As redes de sensores sem fios (RSSFs) são um conjunto de nós sensores individuais operantes, que geralmente, se unem para formar uma rede com o objetivo de concentrar as informações individuais dos sensores para monitorar eventos diversos (PEREIRA e AMORIM, 2007).

De acordo com Walteneus e Poellabauer (2010), é uma característica peculiar das RSSFs, operarem em áreas remotas e ambientes adversos, sem o apoio estrutural ou a possibilidade de manutenção e reparação. Portanto, o ideal é que os nós sensores sejam projetados para se autoconfigurar, operar e colaborar nos estímulos do ambiente, sem a intervenção humana.

Os nós sensores são compostos por dispositivos microeletrônicos interconectados que realizam a aquisição de dados, o processamento e a comunicação via Radiofrequência (TARTAGNI, 2009). Na Figura 2.2, são apresentados os componentes de um nó sensor sem fio.

FIGURA 2.2 – COMPONENTES DE UM TÍPICO NÓ SENSOR SEM FIO.



FONTE: ADAPTADO DE BEEBY E WHITE (2010).

Os nós sensores são implantados em diferentes locais para monitoramento remoto como ambiental, em aplicações agrícolas, para investigação nas pescas e vigilância militar, entre outras (YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008).

Segundo Dewan *et al* (2014), o monitoramento remoto é realizado, praticamente, implantando nós sensores. No entanto, um dos desafios para o

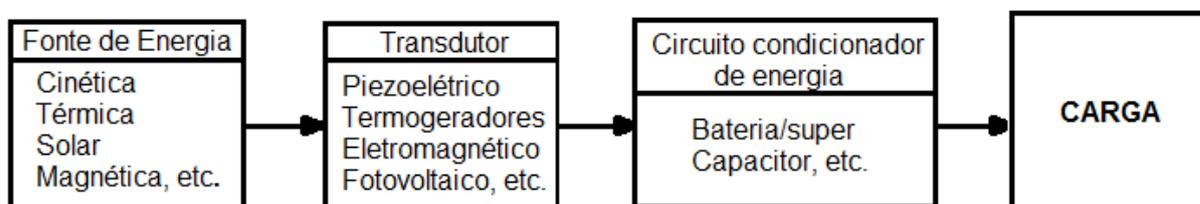
funcionamento desses sistemas eletrônicos é a vida útil dos nós sensores, pois esta é limitada pela duração da fonte de alimentação ao qual estão ligados. Portanto, fontes alternativas de energia, como a colheita de energia, são necessárias para otimizar ou até mesmo substituir o uso daquelas fontes com duração finita, como as baterias. Estas fontes alternativas de energia devem produzir energia onde os sensores são implantados, além disso, precisam ser confiáveis, e, praticamente, independentes da intervenção humana, após a instalação.

2.3 COLHEITA DE ENERGIA

A colheita de energia corresponde ao processo pelo qual pequenas quantidades de energia são captadas a partir de fontes do ambiente e convertidas em energia elétrica utilizável para alimentar dispositivos eletrônicos de ultrabaixo consumo (BEEBY e WHITE, 2010). Se for necessário, a energia também pode ser armazenada na forma colhida do ambiente ou elétrica (EHJ, 2014).

Os sistemas de colheita de energia são formados por quatro componentes principais: a fonte de energia, geralmente, dispersa no ambiente; um transdutor projetado de acordo com a fonte a ser captada e convertida; um circuito condicionador de energia, por fim, estas etapas atendem as especificações impostas pela carga a ser alimentada. Os componentes de um sistema típico de colheita de energia estão representados na Figura 2.3.

FIGURA 2.3 – SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA.



FONTE: ADAPTADO DE SORDIASHE (2012).

De acordo com Sudevalayam *et al* (2011), a energia proveniente de fontes externas do ambiente podem ser colhidas para suprir parcial ou na totalidade, os sistemas de colheita de energia. Ainda de acordo com o mesmo, a técnica mais difundida e popular para a colheita de energia do ambiente é converter a energia solar em energia elétrica.

No entanto, existem muitas outras fontes de colheita, tais como: energia mecânica e energia térmica (HOOF, 2008); energia magnética (ROSCOE e JUDD, 2013); entre outras (DEWAN, AY, *et al.*, 2014). Algumas fontes e seu desempenho em função da densidade de potência, podem ser conferidas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – RESUMO DO DESEMPENHO DE ALGUMAS FONTES DE COLHEITA DE ENERGIA.

Fontes	Densidade de potência	Referências
Solar	Interno -10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; 6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(HOOF, 2008); (TASHIRO <i>et al</i> , 2011)
	Externo -10 mW/cm^2 ; 15 mW/cm^2	(HOOF, 2008); (TASHIRO <i>et al</i> , 2011)
Magnética	A \rightarrow 2,6 mW/cm^3 ; B \rightarrow 700 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	(MOON, <i>et al</i> 2013); (ROSCOE <i>et al</i> , 2013)
Vibração	Humano - 4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(HOOF, 2008)
	Indústria - 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(HOOF, 2008)
	Conversão piezoelétrica - 250 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(TASHIRO <i>et al</i> , 2011)
Térmica	Humano - 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(HOOF, 2008); (VULLERS <i>et al</i> , 2009)

A \rightarrow Linha de potência; B \rightarrow subestação elétrica.

Como pode ser observado na Tabela 2.1, a fonte de colheita de energia que apresenta a maior densidade de potência é a energia solar em ambientes externos, seguido pela energia magnética, que neste caso, foi tomada como referência trabalhos que utilizaram o campo magnético disperso ao redor de linhas de potência e subestações elétricas.

Porém, este não deve ser o principal critério a ser seguido ao projetar um sistema de colheita de energia. De acordo com Beeby e White (2010), o ambiente no qual o nó sensor está inserido e a regularidade em que a fonte fornece energia, além da confiabilidade e robustez são critérios de grande relevância que, devem ser considerados ao projetar estes sistemas.

2.4 COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA – CEIM

Em 1820, durante os seus experimentos, o físico Dinamarquês Hans Crithian Oersted descobriu que ao colocar um ímã próximo a um condutor, por onde circulava uma corrente elétrica, o mesmo tende a se alinhar perpendicularmente ao plano que passa pelo ímã e a corrente (MAXWELL, 1873).

Esta descoberta foi um grande avanço que relacionou o magnetismo e a eletricidade. Surgiu, portanto, o eletromagnetismo.

Com base neste conceito de eletromagnetismo é que se baseia a colheita de energia por indução magnética, em que, o fluxo de cargas ao se movimentar ao longo de um condutor, induz um campo magnético no seu entorno, e este campo magnético é captado e convertido através de transdutores eletromagnéticos com núcleos de materiais magnéticos (ROSCOE, JUDD e FITCH, 2009).

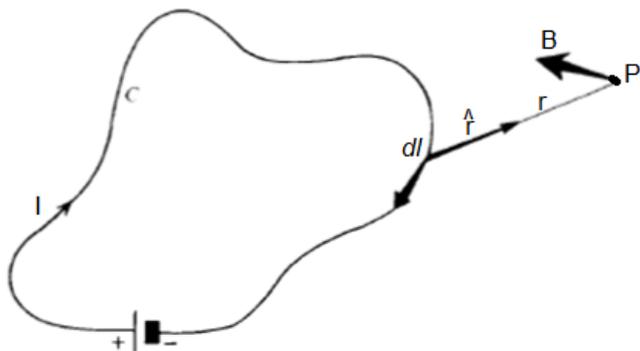
A lei de Ampère declara que a integral de linha do campo magnético, B , em torno de um caminho fechado é igual a corrente I que circula internamente na superfície delimitada pelo contorno C (SPALDIN, 2010). Para aplicar a lei de Ampère, a corrente deve fluir através de um caminho fechado. Portanto,

$$\oint_C B \cdot dl = I \quad (2.1)$$

A Lei de Ampère muitas vezes é usada para calcular o campo magnético em torno de determinadas simetrias. No entanto, pela Lei de Biot-Savart, o campo magnético, B , gerado por uma corrente, I , que flui em um comprimento elementar l , de um condutor, pode ser calculado para um ponto, P , independente da simetria (SPALDIN, 2010).

Para estimar o campo magnético disponível em torno de um condutor, Jean-Baptiste Biot e Félix Savart desenvolveram uma equação que fornece o campo magnético B em um ponto P no espaço em função da corrente I que gera o campo, como pode ser visto na Figura 2.4 (LORRAIN, CORSON e LORRAIN, 1988).

FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LEI DE BIOT-SAVART.



FONTE: (LORRAIN, CORSON e LORRAIN, 1988).

A Lei de Biot-Savart é dada por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.2)$$

em que, μ_0 corresponde à permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Tm/A), r é a distância entre o condutor e o ponto P , e \hat{r} é o vetor unitário. Quanto à unidade SI, a densidade do fluxo magnético é o Tesla [T].

A lei de Biot-Savart elucida que a densidade de fluxo magnético em um determinado ponto P , próximo a um condutor, no qual circula uma corrente alternada, diminui com o quadrado da distância radial do centro do mesmo até o ponto P . Em suma, a densidade do fluxo magnético é diretamente proporcional à corrente que flui através do condutor e inversamente proporcional ao quadrado da distância do centro do condutor até o referido ponto.

Nesse contexto, conclui-se que, quanto mais próximo do condutor o transdutor estiver, maior será a influência do campo magnético sobre o mesmo, que por consequência, pode aumentar a tensão induzida na bobina do transdutor, contribuindo para aumentar o nível da colheita de energia.

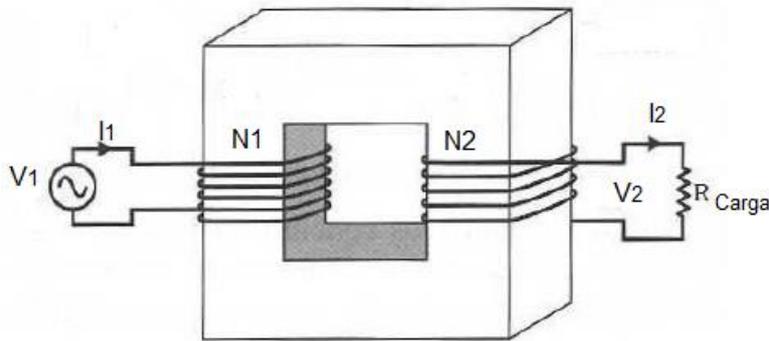
2.5 TRANSDUTOR ELETROMAGNÉTICO

A estrutura de um transdutor eletromagnético é baseada no princípio do transformador elétrico, especificamente, o transformador de corrente (TC).

O transformador elétrico é um dispositivo que, através de um campo magnético, converte um nível de tensão ou corrente elétrica alternada, na mesma frequência, em outro. Geralmente, é constituído de duas ou mais bobinas de fio condutor, enroladas em torno de um núcleo ferromagnético. Essas bobinas não são diretamente conectadas e a única ligação entre as bobinas é o fluxo magnético mútuo que passa através do núcleo ferromagnético (CARVALHO, 2011).

No caso do transformador com duas bobinas, como visto na Figura 2.5, uma está ligada a fonte de energia elétrica alternada, v_1 , e a segunda, v_2 , é ligada à carga. A bobina do transformador ligada a fonte de energia é chamada de primária ou de entrada e a bobina ligada a carga é chamada de secundária ou de saída.

FIGURA 2.5 – TRANSFORMADOR ELÉTRICO COM DUAS BOBINAS.



FONTE: (CARVALHO, 2011).

A corrente, i_1 , que circula na bobina primária induz um fluxo magnético ϕ , que pode ser relacionado pela Lei de Faraday para indução magnética: em que a intensidade da força eletromotriz induzida, ε , é igual à variação do fluxo magnético em função do tempo, no interior de N -espiras. A Lei de Faraday é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.3)$$

A lei da indução de Faraday é uma das quatro equações de Maxwell para o Eletromagnetismo (SADIKU, 2004).

2.5.1 Transformador de Corrente – TC

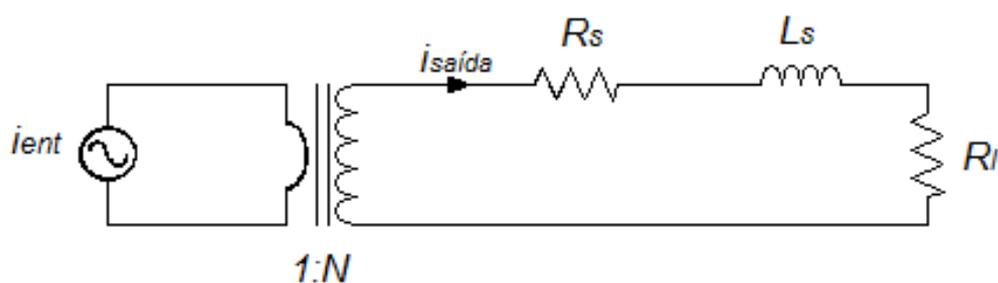
Os Transformadores de Corrente (TCs) são equipamentos projetados e construídos para serem empregados em sistemas elétricos para medição e proteção. Em termos de circuito elétrico, a bobina primária do TC é constituída de poucas espiras, em alguns casos o próprio condutor do sistema elétrico é considerado como a bobina primária, com seção transversal compatível com a corrente que se deseja avaliar, enquanto sua bobina secundária tem o número de espiras elevado e seção transversal pequena. Isto ocorre por que estes equipamentos transformam correntes elevadas, que circulam no primário, em correntes de menor intensidade no secundário (BATISTA, 2010).

No tocante ao circuito magnético, a configuração toroidal é particularmente favorável, pois, com essa geometria as linhas de fluxos percorrerão o material

magnético numa direção de permeabilidade elevada, sem a presença de entreferros transversais. A característica magnética do material do núcleo é de grande relevância, uma vez que para elevada permeabilidade e baixa força coercitiva, menor será a corrente de excitação necessária para estabelecer a densidade de fluxo magnético adequada para o funcionamento do TC (LUCIANO, FREIRE, *et al.*, 2006).

Na Figura 2.6 é mostrado um circuito equivalente para um transdutor eletromagnético utilizado na colheita de energia por indução, que é semelhante a um transformador de corrente, com carga operacional R_L . Porém, para o transdutor, o primário é composto apenas por uma espira, por onde circula uma corrente alternada.

FIGURA 2.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TRANSDUTOR ELETROMAGNÉTICO.



FONTE: (WU, WEN e LI, 2013).

De acordo com o circuito equivalente do transdutor eletromagnético, proposto por Wu *et al* (2013), R_s e L_s correspondem, respectivamente, a resistência e a indutância inerentes à bobina secundária. As correntes de entrada e de saída são representadas, respectivamente, por: i_{ent} e $i_{saída}$.

2.6 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Na colheita de energia por indução magnética, em geral, são utilizados transdutores com núcleo de material magnético. Para classificar os materiais em termos de suas propriedades ou de seu comportamento magnético, normalmente, usa-se a susceptibilidade, χ_m , ou a permeabilidade magnética μ_r (SPALDIN, 2010).

A permeabilidade relativa é dada pela razão entre a permeabilidade do material, μ , pela permeabilidade do vácuo, μ_0 , ou seja, $\mu_r = (\mu/\mu_0)$. A

susceptibilidade magnética é a medida de quão susceptível a matéria é ao campo magnético e está relacionada com a permeabilidade como se segue: $\chi_m = \mu_r - 1$, sendo que ambas são grandezas adimensionais (SADIKU, 2004).

De acordo com Sadiku (2004), um material é considerado não magnético se a sua susceptibilidade magnética for nula ($\chi_m = 0$ ou $\mu_r = 1$). No entanto, existem outras classes para materiais magnéticos, das quais são definidas as três principais categorias como:

- **Diamagnéticos:** os quais não apresentam um momento de dipolo magnético permanente e na presença de um campo magnético são fracamente magnetizados na direção oposta do campo magnético aplicado (SADIKU, 2004). De acordo com Batista (2010), a causa desta reação está associada com a Lei de Lenz, em que, pequenas correntes localizadas são induzidas no interior do material, que cria suas próprias forças magnéticas em oposição ao campo variável aplicado.
- **Paramagnéticos:** possuem momento de dipolo magnético permanente. Na ausência do campo magnético os dipolos estão orientados aleatoriamente não havendo neste caso magnetização. Na presença de um campo magnético externo magnetizam-se na mesma direção do campo magnético aplicado, com módulo da magnetização induzida proporcional ao campo (SADIKU, 2004).
- **Ferromagnéticos:** possuem campos magnéticos atômicos que se alinham paralelamente ao campo magnético aplicado, criando um campo magnético no interior do material muito superior ao aplicado (SADIKU, 2004). De forma distinta dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos, os materiais ferromagnéticos têm as seguintes propriedades:
 - são fortemente magnetizados por um campo magnético externo;
 - retêm uma magnetização residual considerável, quando retirado o campo;
 - acima de uma temperatura crítica, denominada temperatura de Curie, o material torna-se paramagnético;
 - são não lineares, isto é, a relação constitutiva, $B = \mu_r \mu_0 H$, não se verifica, porque μ_r depende de B e não pode ser representado por um único valor (SADIKU, 2004).

Na Tabela 2.2 estão descritas, em termos de permeabilidade e susceptibilidade magnética, a classificação das três principais classes de materiais magnéticos.

TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS.

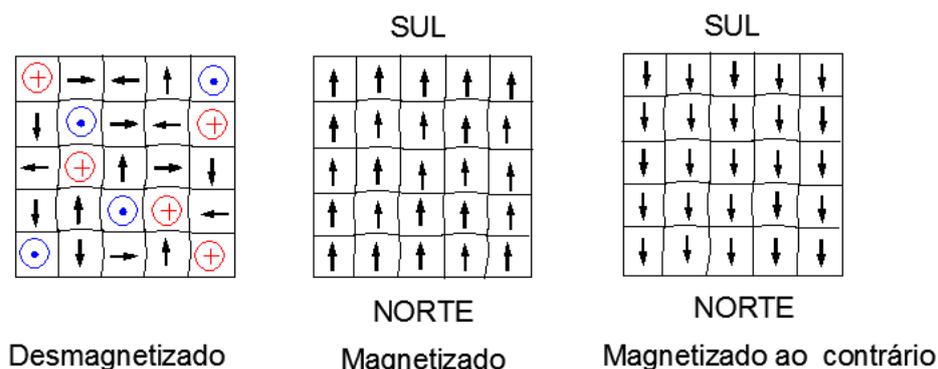
Material Magnético	Permeabilidade, μ_r	Susceptibilidade, χ_m
Diamagnético	$\mu_r \leq 1$	Negativo e $\chi_m < 1$
Paramagnético	$\mu_r \geq 1$	Positivo e $\chi_m < 1$
Ferromagnético	$\mu_r \gg 1$	Positivo e $\chi_m \gg 1$

FONTE: (SADIKU, 2004).

2.6.1 Domínios Magnéticos

A região de um cristal na qual os vetores momento de dipolo magnético de seus átomos são alinhados segundo uma direção predefinida, formando um vetor de magnetização nesta direção é chamado de domínio magnético. As paredes dos domínios são interfaces entre as regiões, as quais são espontaneamente magnetizadas, resultando em diferentes direções de magnetização (FARIA e LIMA, 2005).

FIGURA 2.7 – ALINHAMENTO DOS DOMÍNIOS PARA UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.



FONTE: (CALLIESTER JR., 1991).

Ao ser aplicado um campo externo ao material, ocorre o processo de magnetização do material, realizado pela movimentação desses domínios e pela rotação dos mesmos, conforme pode ser visto na Figura 2.7. Idealmente, a saturação do material é atingida quando os “*spins*” do material estão todos alinhados

na mesma direção do campo magnético, tendo um só sentido para os vetores de magnetização de cada domínio (FARIA e LIMA, 2005).

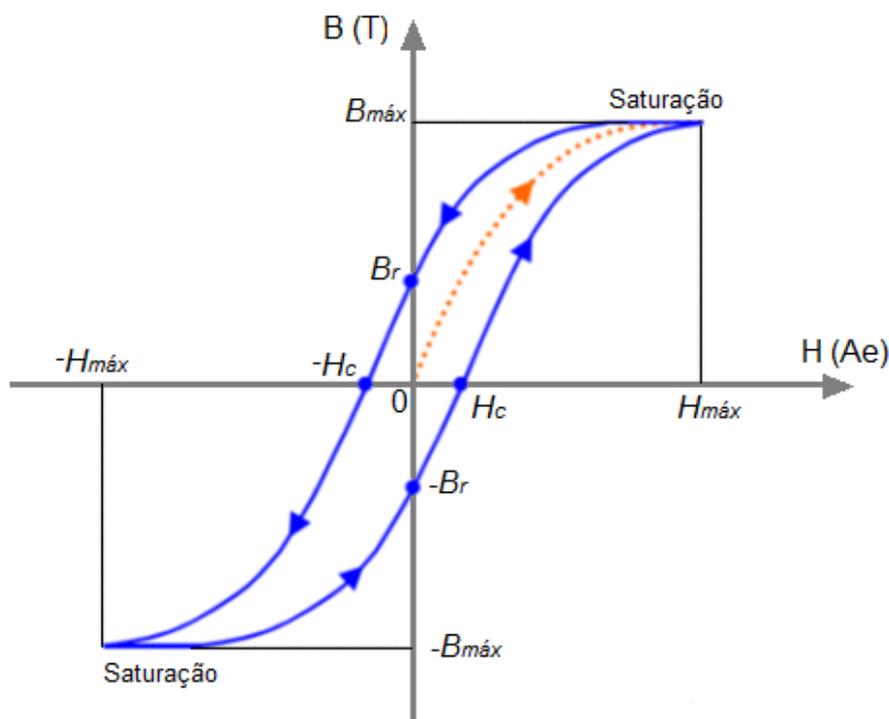
2.7 MAGNETIZAÇÃO E HISTERESE MAGNÉTICA

Quando um material ferromagnético está desmagnetizado, todos os domínios magnéticos que o compõem estão desalinhados com magnetização nula. Portanto, para que ocorra a magnetização aplica-se um campo magnético externo que tende a rotacionar e alinhar os domínios magnéticos conforme a sua direção. Para que isto ocorra, é dissipada uma quantidade de energia no material (BOZORTH, 1993). O comportamento da magnetização de um material ferromagnético é descrito em termos de sua curva de magnetização $B-H$, onde H é amplitude de campo magnético (\mathbf{H}) aplicado externamente e B é a amplitude da densidade de fluxo magnético (\mathbf{B}) dentro do material.

Assim como a curva de magnetização, o ciclo de histerese visto na Figura 2.8, também é fundamental para descrever as propriedades dos materiais magnéticos (MORAES JR., 2013). Portanto, para se obter o ciclo de histerese, pode ser realizado o seguinte procedimento: em um material, inicialmente desmagnetizado, aplica-se uma intensidade de fluxo magnético de 0 a H_{max} , obtém-se a curva de magnetização para os valores de B , em que se observa a saturação do material em B_{max} . Ao reduzir a intensidade do campo magnético de H_{max} , para 0, a densidade do campo também reduz, porém, existem valores de B para $H = 0$ em B_r , chamado de densidade de fluxo residual. Portanto, para que haja uma desmagnetização total do material, ou seja, $B = 0$, é necessário aplicar uma intensidade reversa de 0 a $-H_c$, denominada força coercitiva. Ao aplicar uma intensidade H de $-H_c$ a H_{max} o material tende a saturação no sentido inverso. Tornando a intensidade do fluxo a 0, é visualizado um $-B_r$ no sentido contrário, para $B = 0$, é necessário uma aplicação de H dos pontos 0 a H_c .

Como pode ser observado na Figura 2.8, a partir da segunda curva de magnetização do ciclo, a rotação dos domínios magnéticos não segue a curva de magnetização pontilhada, e sim de H_c a B_{max} , fechando o ciclo de histerese.

FIGURA 2.8 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E CICLO DE HISTERESE.



FONTE: (BATISTELA, 2001).

A área interna do ciclo de histerese corresponde às perdas por unidade de volume durante a magnetização periódica do material (FARIA e LIMA, 2005).

2.8 TRABALHOS RELACIONADOS

O monitoramento remoto das condições físicas em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica desempenha um papel cada vez mais importante, ajudando a reduzir os custos de manutenção e a melhorar a confiabilidade do fornecimento, oferecendo dados precisos e frequentes para prevenir maiores danos ao sistema (ROSCOE e JUDD, 2013).

Neste contexto, a colheita de energia por indução magnética surge para adicionar benefícios a esta aplicação, à medida que oferece a possibilidade de sensores de comunicação sem fio energeticamente autônomos, tendo em vista que, nas proximidades dessas linhas elétricas e equipamento de distribuição, são induzidos campos magnéticos alternados que podem oferecer uma potencial fonte de energia que não requerer ligações físicas ou baterias.

Além desta aplicação, a técnica de colheita descrita também pode ser empregada em outros casos, restringindo-se apenas a presença de campo magnético suficiente a ser captado. Um exemplo prático é a colheita de energia a partir de condutores de um motor elétrico trifásico utilizando transdutores, baseados na estrutura do transformador de corrente, submetidos a uma corrente máxima no condutor primário de 100 A e frequência de 50 Hz (AHOLA, AHONEN, *et al.*, 2008).

Propõe-se em Amaro *et al* (2012) um captador do campo magnético gerado a partir das linhas de aparelhos domésticos e equipamentos elétricos industriais, além de um circuito para tratar o sinal colhido. O sistema desenvolvido foi capaz de sustentar um protocolo de comunicação como o *Zigbee*.

Ainda nesse contexto, destaca-se o trabalho de Roscoe e Judd (2013), no qual foi estudada a colheita através do campo magnético disperso em uma subestação elétrica abrigada. No entanto, a maioria das pesquisas ainda apresenta como principal fonte a colheita do campo magnético ao redor das linhas de transmissão ou distribuição, como é o caso de Taithonghai *et al* (2009), Roscoe *et al* (2009), entre outros.

Em Tashiro *et al.*, (2011), foi estudada uma técnica de CEIM em linha de potência, utilizando transdutores com diferentes materiais e um modelo simples de circuito de condicionamento. Como resultado, o nível de potência atingido foi de 1 mW para o transdutor de ar e 6,32 mW para o núcleo de ferro a partir de um campo magnético de 21,2 μ T a 60 Hz.

O trabalho realizado por Moraes Jr. (2013), caracterizou o desempenho de vários núcleos com diferentes dimensões e três materiais ferromagnéticos (Pó de ferro, Ferrita, liga Nanocristalina), aplicados à colheita de energia por indução magnética. Para isso, foi desenvolvida uma planta experimental que emular uma linha de potência, e os núcleos foram submetidos a testes com relação à potência e carga resistiva, além de um circuito na saída do terminal secundário da bobina para retificar o sinal.

O trabalho de Wang *et al.* (2014), apresenta um método de colheita de energia com base no transformador de corrente com circuito de ressonância para um sistema de monitoramento de linhas de alta tensão. O método utilizado com capacitor de ressonância aumenta a tensão induzida, assim como a potência de saída do transdutor.

Bhuiyan *et al* (2010), na perspectiva de melhorar o rendimento do transdutor, apresenta um núcleo cilíndrico construído por camadas de materiais magnéticos flexíveis de alta permeabilidade (Mu-metal) com enrolamento de N espiras.

Na Tabela 2.3 são apresentados alguns trabalhos realizados para colheita de energia por indução magnética.

TABELA 2.3 – PESQUISAS REFERENTES À COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO.

Referências	Fontes	Material	Resultados
Ahola, <i>et al.</i> , 2008	Motor 100 A, 50 Hz	Aço Silício	30 Volts
Taithonghai, <i>et al</i> , 2009	Transmissão(65 A)	Ferro	58 mW
Bhuiyan, <i>et al</i> , 2010	13,5 A	Mu-metal	10 mW
Tashiro, <i>et al.</i> , 2011	200 μ T	Ar	130 μ W/cm ³
Moraes Jr.; <i>et al</i> , 2013	15 A	Ferrita, Nanocristalino	315 mW, 54 mW;

A busca por sistemas de colheita de energia por indução magnética com maior rendimento é a principal motivação para a realização destas pesquisas. Por isso, novos materiais são testados para o núcleo do transdutor, a fim de obter maior densidade de potência e um maior desempenho para aplicações diversas. Assim, como circuitos de condicionamento e gerenciamento da energia gerada, também são propostos nestas pesquisas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar e descrever os instrumentos e os procedimentos utilizados para a coleta e a análise dos dados, justificando o uso de tais instrumentos e procedimentos com base na revisão do capítulo 2 e nos objetivos específicos que norteiam este trabalho.

Abordar-se-á a bancada de testes usada para os experimentos, sendo esta composta por uma plataforma experimental que emula a linha de potência e os instrumentos de medição usados para auferir os dados. Além disso, descreve-se a metodologia empregada na seleção do transdutor eletromagnético, a fim de definir, entre os dois materiais ferromagnéticos, qual teria o melhor desempenho para a aplicação proposta neste trabalho.

A referente aplicação fora emulada por uma década resistiva, que foi utilizada também para outros experimentos que se fizeram necessários no desenvolvimento deste trabalho. Quanto ao ambiente de desenvolvimento, todos os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Microengenharia da UFPB.

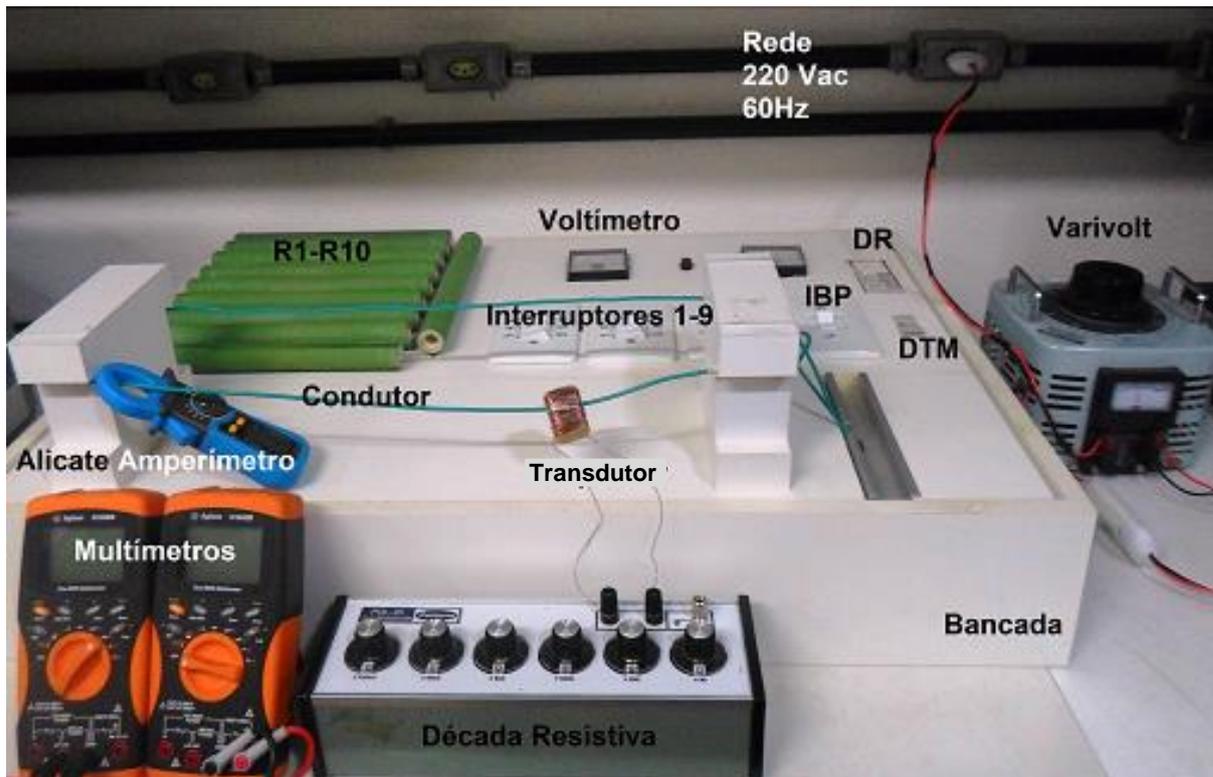
3.1 BANCADA DE TESTES

Para o desenvolvimento deste projeto foi necessária a construção de uma bancada de testes com uma estrutura capaz de emular as condições elétricas de uma linha de potência, como por exemplo, as linhas de distribuição de energia elétrica. Embora, seja em menor nível da escala de potência, para que os testes pudessem ser realizados no laboratório disponível para esta pesquisa.

Durante a pesquisa foram realizados diferentes e repetitivos testes experimentais com diferentes transdutores, aproveitando o campo magnético em torno da linha de potência, por isso, a bancada de testes foi fundamental devido à praticidade e, principalmente, a segurança dos envolvidos nos experimentos.

Na Figura 3.1, podemos observar a estrutura física da bancada de testes, assim como, alguns instrumentos de medição utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

FIGURA 3.1 – BANCADA DE TESTES.



FONTE: FOTO DA AUTORA.

A bancada de testes é composta por vários elementos, portanto, nas subseções seguintes serão descritos estes elementos e suas funções nesta bancada e, por conseguinte, nos testes.

3.1.1 Plataforma Experimental

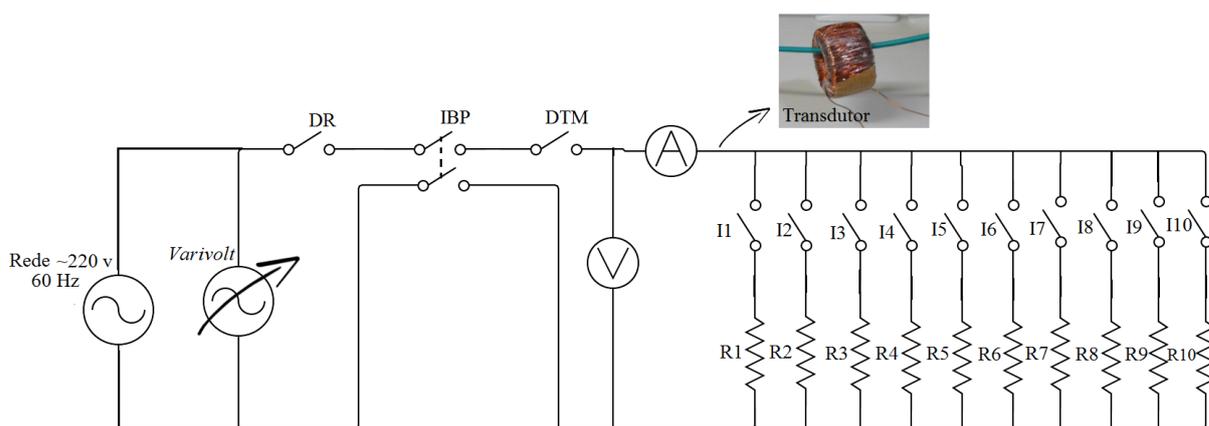
Este trabalho tem cunho experimental, de modo que os resultados serão obtidos por testes experimentais, portanto, há necessidade de se realizar diferentes e repetitivos testes em laboratório.

Tendo em vista que a energia magnética presente no campo magnético é a fonte a ser colhida, se deu a necessidade de desenvolver uma plataforma experimental acessível para emular uma linha de potência com um campo magnético induzido em seu entorno, sendo o mesmo acessível para ser colhido. Para isto, tomou-se como referência a plataforma desenvolvida no trabalho de Moraes Jr. (2013).

A plataforma desenvolvida é composta por dez pares de resistores de potência 220 Ω (R1-R10) ligados em série com interruptores de uma seção (I1-I10), e estes dez pares (interruptor/resistor) são ligados em paralelo para formar um circuito divisor de corrente, no qual cada interruptor no modo ligado acrescenta 0,5 A, ou o inverso. Assim, é possível variar a corrente que circula no condutor de 0 a 5 A, com um passo mínimo de 0,5 A. Esta variação na corrente elétrica é necessária para analisar o desempenho dos núcleos e materiais ferromagnéticos quando submetidos a diferentes níveis de corrente e, por conseguinte, a diferentes intensidades do campo magnético.

Na Figura 3.2, podemos observar o diagrama elétrico da plataforma experimental desenvolvida.

FIGURA 3.2 – DIAGRAMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA DE TESTES.



FONTE: DA AUTORA.

Um variador de tensão (*varivolt*) foi utilizado para manter a tensão de entrada da plataforma menor que 200 volts e, assim, garantir o funcionamento regular do circuito e sem danos aos resistores de potência, pois, a potência máxima dos mesmos é de 200 W, logo ($P = (< 200)^2/220$).

Para seccionar o circuito foi utilizado um interruptor bifásico (IBP). Como dispositivos de proteção foram utilizados, um disjuntor residual (DR) contra correntes de fuga e um disjuntor termomagnético (DTM) para proteção contra uma eventual sobrecarga e curto-circuito. Também foram instalados um voltímetro e um amperímetro, ambos analógicos, para medir a tensão e a corrente na plataforma.

3.1.2 Instrumentos para Medições

Para realizar as medições foram utilizados os seguintes instrumentos de medidas:

- Dois multímetros digitais Agilent U1242B *True rms* (utilizados simultaneamente). Sendo, um para medir a tensão e o outro para medir a corrente na carga resistiva a ser alimentada. Com essas medições, calcula-se a potência eficaz que o transdutor é capaz de disponibilizar para a carga;
- Um minialicate amperímetro Minipa ET3320, para medir a corrente no fio condutor da plataforma de testes;
- Um osciloscópio, esse equipamento foi essencial para a visualização da forma de onda na saída do núcleo transdutor. Além de outras medições como tensão de pico, tensão eficaz, frequência, etc.;
- Década de resistores POL 25 ($1 \Omega \sim 1111,11 \text{ k}\Omega$), utilizada para simular diferentes cargas conectadas nos terminais de saída do transdutor eletromagnético, e assim analisar o desempenho dos transdutores;
- Década capacitiva Instrutemp ITCBOX406 com a faixa de capacitâncias de 100 pF a 11,111 μF , a fim de definir uma capacitância ideal para compensar os efeitos da reatância indutiva.

3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O TRANSDUTOR

Nesta seção aborda-se a metodologia empregada e os principais resultados dos testes realizados para selecionar um material ferromagnético adequado para o núcleo do transdutor eletromagnético. Portanto, a primeira ação foi definir os materiais ferromagnéticos a serem testados.

Neste contexto, foram tomados como referência os resultados apresentados no trabalho de Moraes Jr. (2013), no qual foram caracterizados três materiais ferromagnéticos (Ferrita, Pó de ferro e Liga Nanocristalina), com o objetivo de aplicá-los à colheita de energia por indução magnética, aproveitando o campo magnético disperso em torno de linhas de potência. Além disso, as propriedades magnéticas dos materiais foram observadas, tais como: a permeabilidade, a força coercitiva, a relutância, entre outras.

Portanto, foram escolhidos dois materiais que apresentaram os melhores resultados, a Ferrita e a liga Nanocristalina, para submetê-los a testes comparativos a fim de definir o melhor material para a colheita de energia por indução magnética em linhas de potência e, assim, suprir o sistema energeticamente autônomo proposto neste trabalho.

Durante os experimentos foram realizados diversos testes com transdutores de diferentes dimensões e características, para comparar o desempenho dos dois materiais ferromagnéticos em relação a uma carga instalada na saída da bobina secundária, e em relação a corrente no condutor primário ao qual o transdutor é acoplado.

A estrutura do núcleo transdutor toroidal de seção retangular fechado acoplado no condutor foi escolhida devido a sua estrutura física facilitar a concentração do campo magnético induzido ao redor do condutor, o qual é circular e perpendicular ao fio, no seu interior. Além disso, o núcleo foi enrolado com uma bobina secundária de N espiras para gerar uma força eletromotriz em seus terminais. A seguir, apresentam-se os principais resultados obtidos, os quais foram decisivos para selecionar o material para o núcleo do transdutor eletromagnético.

3.2.1 Densidade de potência X Carga resistiva, transdutores com características diferentes

Nesta subseção apresenta-se o teste que tem como objetivo principal comparar o desempenho dos dois materiais ferromagnéticos para os transdutores de Ferrita e da liga Nanocristalina, quando conectados a diferentes valores de cargas resistivas, com uma faixa de 0 a 30 Ω .

Para realizar os testes, foram utilizados os transdutores toroidais da Figura 3.3, os quais possuem seção transversal retangular e uma bobina secundária de fio de cobre esmaltado. Na Tabela 3.1, estão descritas as dimensões físicas dos transdutores, ambos utilizados neste teste. Como podemos observar, os parâmetros são diferentes para os dois transdutores, pois, neste primeiro momento, o objetivo é conhecer apenas a resposta dos mesmos quando conectados a cargas resistivas.

FIGURA 3.3 – TRANSDUTORES COM PARÂMETROS DIFERENTES.



FONTE: FOTO DA AUTORA.

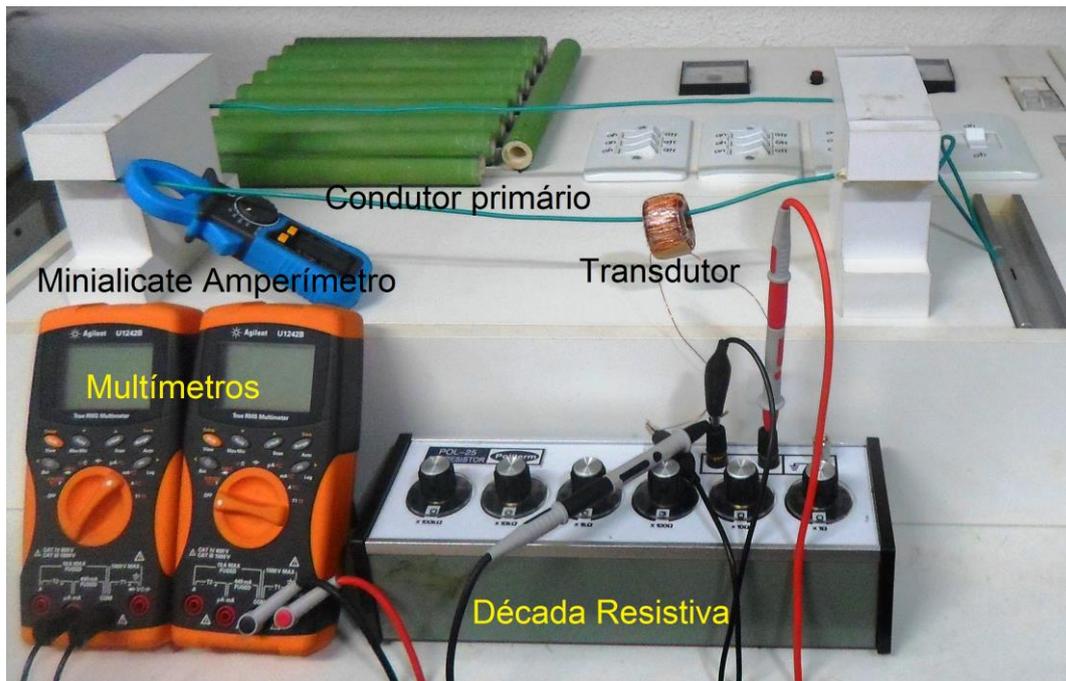
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES COM ESPIRAS DIFERENTES.

Descrição	Transdutores	
	Liga Nanocristalina	Ferrita
Diâmetro externo (mm)	33,5	36,0
Diâmetro interno (mm)	27,5	23,0
Altura (mm)	4,0	15,0
Largura (mm)	3,5	6,5
Volume (cm ³)	1,15	8,5
Número de espiras N	156	96
Permeabilidade relativa	100.000	2.100
Densidade inicial de saturação B_{sat}	1,2 T	390 (mT)
Massa (g)	6,9	43
Valor do núcleo (R\$)	2,80	2,43
Bitola do fio de cobre (AWG)	26	26

FONTE: (<http://www.magmattec.com/produtos.html>).

Na Figura 3.4, apresenta-se a estrutura para realizar este experimento, em que o transdutor está acoplado ao condutor primário, no qual circula uma corrente primária de $I_p = 5 A$, e os terminais da bobina secundária ligados a uma década resistiva, a qual emula possíveis cargas resistivas a serem supridas energeticamente por estes transdutores. São utilizados dois multímetros para medir, simultaneamente, a tensão e a corrente na carga.

FIGURA 3.4 – ESTRUTURA EXPERIMENTAL UTILIZADA.

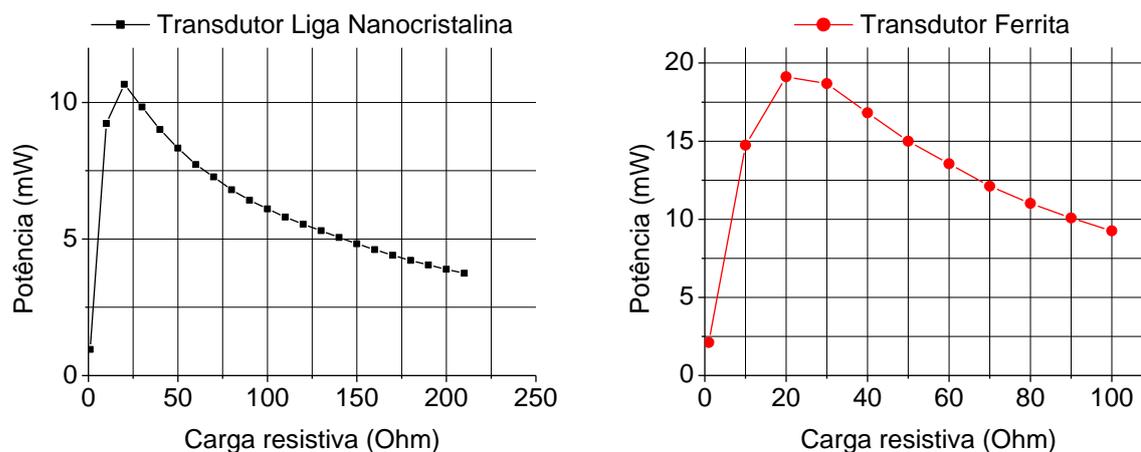


FONTE: FOTO DA AUTORA.

Para a análise comparativa foram medidas, a tensão e a corrente eficazes para cada valor de resistência. Esse procedimento foi repetido, no mínimo, três vezes para cada resistência, a fim de minimizar a incerteza dos testes. Após colher os dados, foram calculadas as médias aritméticas das tensões e das correntes para cada transdutor conectado as cargas resistivas, estes dados podem ser conferidos no Apêndice 1. Com as referidas médias aritméticas foram calculadas a potência e a densidade de potência, disponibilizadas pelos transdutores para cada resistência.

As análises comparativas foram realizadas por experimentos empíricos, em que os transdutores foram expostos ao campo magnético induzido pela corrente alternada de 5 A que circulava no condutor primário, e os terminais da bobina ligados às cargas resistivas, as quais foram variadas com intervalos diferentes para cada caso. Observou que as melhores respostas, ou seja, a potência máxima para cada transdutor ocorreu no intervalo de 10 a 30 Ohms, como pode ser visto no Gráfico 3.1. No entanto, neste trabalho não foi possível comprovar teoricamente a causa desses resultados, o que pode ser explicado em trabalhos futuros que abordem a modelagem matemática deste procedimento.

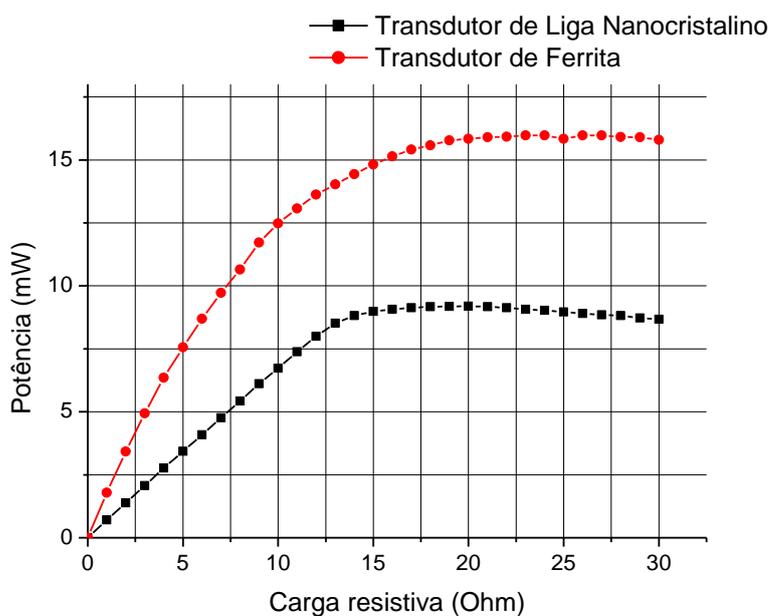
GRÁFICO 3.1 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA (A) LIGA NANOCRISTALINO (B) FERRITA.



FONTE: DA AUTORA.

De acordo, com os resultados obtidos e apresentados no Gráfico 3.1 em termos de potência, foi possível conhecer a faixa de resistência na qual os transdutores apresentam maior desempenho. Por isso, para os experimentos seguintes foram considerados resistências até 30 Ohms para os dois transdutores, Gráfico 3.2.

GRÁFICO 3.2 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA PARA OS TRANSDUTORES.

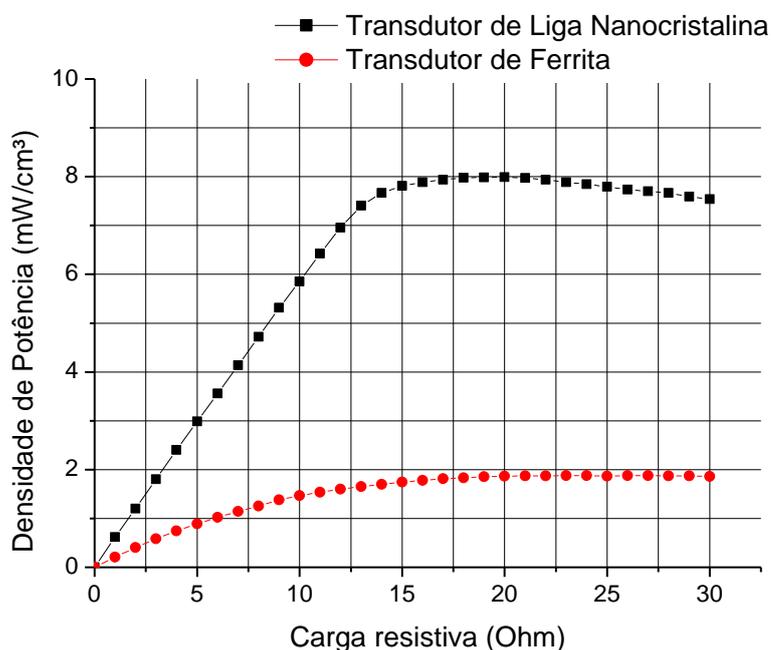


FONTE: DA AUTORA.

Ao analisar os resultados da potência elétrica em relação à carga resistiva para os transdutores de Ferrita e da liga Nanocristalina, pode-se observar que existe uma diferença notável entre as respostas, pois a Ferrita apresentou uma potência máxima de 15,9 mW para resistência de 20 a 25 Ω , enquanto a Liga Nanocristalina apresentou uma potência de 7,9 mW para cargas de 15 a 22 Ω .

No entanto, quando a análise comparativa é em relação à densidade de potência para os dois transdutores, Gráfico 3.3, o núcleo com a liga Nanocristalina apresenta a maior eficiência, pois disponibiliza uma densidade de potência quatro vezes maior do que a Ferrita, para um volume de, aproximadamente, 1/8 do transdutor de Ferrita. Este é, portanto, um resultado a se destacar neste experimento, pois em sistemas de colheita de energia a eficiência dos componentes é fundamental, tendo em vista que a fonte de colheita é oriunda de pequenas quantidades de energia que outrora seriam desperdiçadas no ambiente.

GRÁFICO 3.3 – CARGA X DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA OS DOIS TRANSDUTORES



FONTE: DA AUTORA.

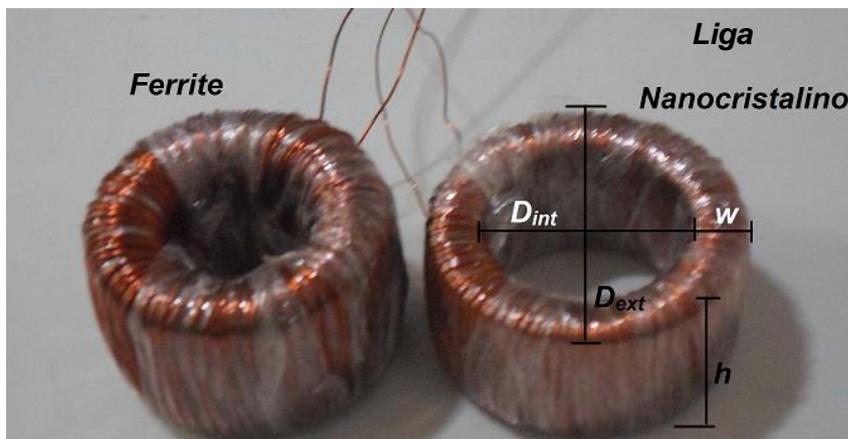
A principal vantagem da liga Nanocristalina é a sua permeabilidade magnética relativa alta, que facilita a concentração das linhas de fluxo magnético no interior do transdutor, aumentando assim, o campo magnético interno no transdutor.

3.2.2 Densidade de potência X Carga resistiva, para transdutores com números de espiras iguais

No teste apresentado nessa subseção, foram realizadas análises considerando transdutores com diferentes características, assim como na subseção 3.2.1, porém, no primeiro teste não foi definido semelhanças entre os parâmetros dos transdutores. Neste caso, o número de espiras foi mantido o mesmo para os dois transdutores, tendo em vista que este é um parâmetro que interfere diretamente na tensão induzida, como enunciada pela Lei de Faraday para indução, e, por conseguinte, na potência e densidade de potência do transdutor.

Os transdutores utilizados para este segundo teste são mostrados na Figura 3.5. Seguindo o contexto, o principal objetivo deste teste é analisar a resposta dos transdutores, com número de espiras iguais, em termos da densidade de potência pela carga resistiva.

FIGURA 3.5 – TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS. .



FONTE: FOTO DA AUTORA.

As características dos transdutores utilizados para realizar este teste estão descritas na Tabela 3.2, e o diferencial é o número de espiras e a bitola do fio da bobina que foram mantidos iguais para os dois transdutores. Estes parâmetros são relevantes para o nível de tensão induzida, por isso, foram mantidos iguais a fim de comparar os materiais ferromagnéticos dos núcleos dos transdutores em termos da densidade de potência pela carga resistiva.

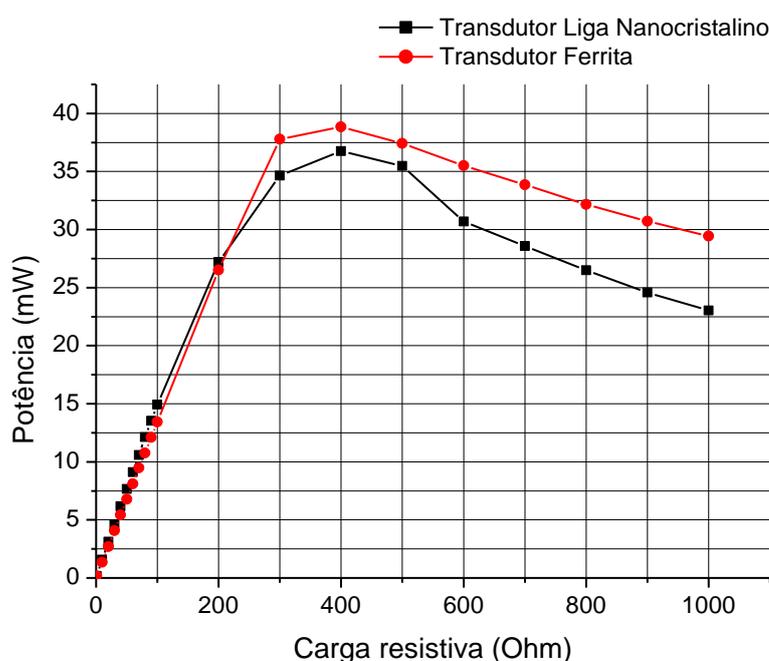
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS.

Símbolo	Descrição	Transdutores	
		Nanocristalino	Ferrita
D_{ext}	Diâmetro externo (mm)	33,5	34,5
D_{int}	Diâmetro interno (mm)	27,5	21,8
h	Altura (mm)	12,0	21,0
w	Largura (mm)	3,5	6,35
v	Volume (cm ³)	3,45	10,9
N	Número de espiras	430	430
μ_r	Permeabilidade relativa	100.000	7.000
m	Massa (g)	20,7	55
R\$	Valor por unidade	8,40	3,6
	Bitola do fio de cobre (AWG)	26	26

FONTE: (<http://www.magmattec.com/produtos.html>).

A metodologia de teste foi a mesma usada para o primeiro teste, Figura 3.4, inclusive a corrente no condutor primário foi mantida em 5 A, assim como a repetição das medições da corrente e da tensão para cada carga resistiva, esses dados podem ser conferidos no Apêndice 2. Com as médias aritméticas da tensão e da corrente, foram calculadas a potência e a densidade de potência apresentadas, respectivamente, nos Gráfico 3.4 e no Gráfico 3.5.

GRÁFICO 3.4 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA, TRANSDUTORES COM BOBINAS IGUAIS.

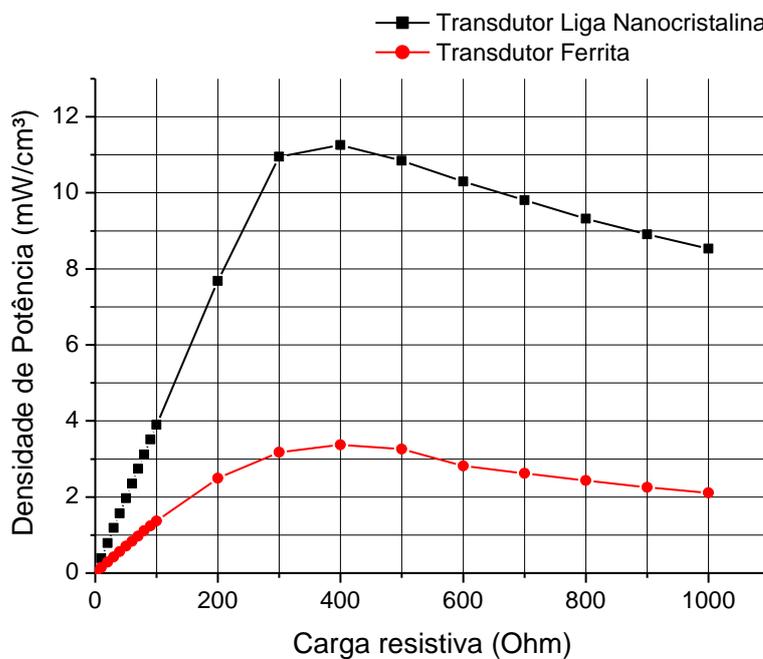


FONTE: DA AUTORA.

Ao analisar o Gráfico 3.4, conclui-se que os dois transdutores obtiveram respostas aproximadas em relação à potência elétrica pela carga resistiva. Além disso, observa-se que os dois transdutores apresentaram maior desempenho para uma faixa de resistência entre 300 Ω e 500 Ω .

No entanto, as diferenças entre as respostas são consideráveis em relação à densidade de potência, como se observa no Gráfico 3.5. A densidade de potência máxima por ambos os transdutores foi para uma carga de 400 Ω , como 3,4 mW/cm³ para o núcleo de Ferrita, enquanto o transdutor de liga Nanocristalina gerou cerca de 11,2 mW/cm³.

GRÁFICO 3.5 – CARGA RESISTIVA X DENSIDADE DE POTÊNCIA, BOBINAS IGUAIS.



FONTE: DA AUTORA.

A Liga Nanocristalina apresentou a maior densidade de potência para todos os valores de resistência, com apenas duas alterações, a saber, no caso do segundo teste, o número de espiras iguais e o volume do núcleo maior do que aqueles utilizados no primeiro teste. Conforme foram incrementados enrolamentos nas espiras e o volume dos transdutores, a densidade de potência aumentou consideravelmente, para os dois transdutores, além disso, a faixa de resistências

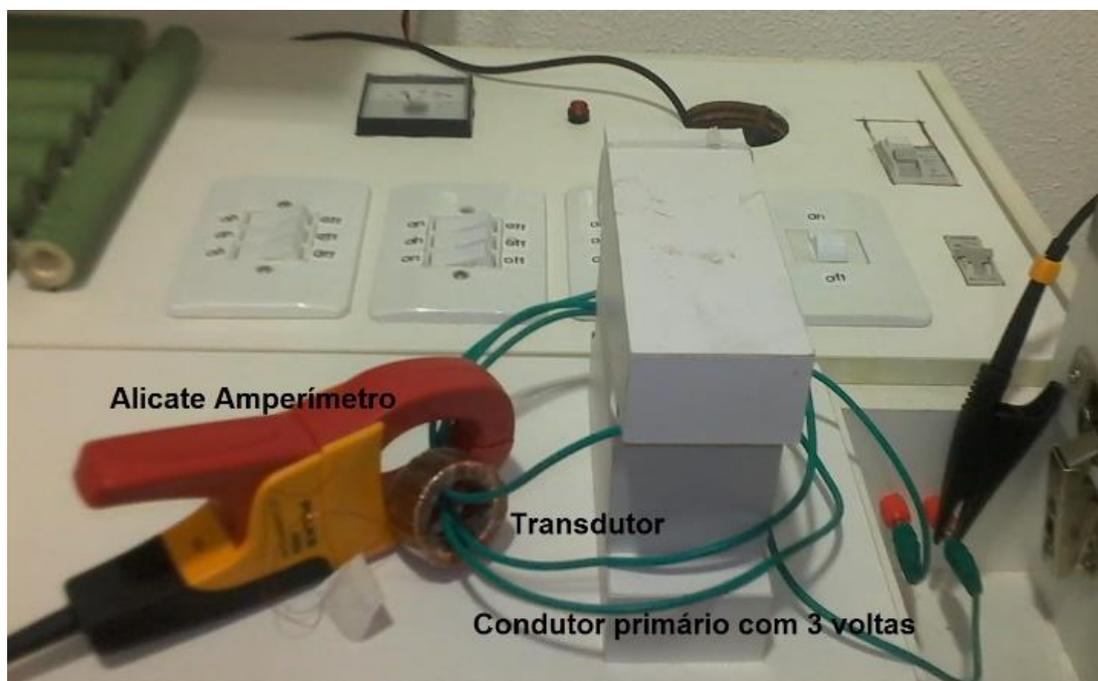
aumentou, de 10 a 30 Ohms, no primeiro teste para 300 a 500 Ohms no segundo teste.

3.2.3 Corrente no primário de 15 Ampères.

Ainda utilizando os transdutores da Figura 3.5, com as dimensões apresentadas na Tabela 3.2, foram realizados outros testes com o objetivo de verificar o desempenho da liga Nanocristalina comparando-se com a Ferrita, para uma corrente do condutor primário de 15 A.

Conforme foi explicado anteriormente, a corrente máxima que se obtém no condutor primário da bancada é de 5 A. Portanto, para realizar os testes com correntes maiores a estratégia foi dar voltas no condutor passando pelo interior do transdutor, conservando o mesmo sentido da corrente para que o campo magnético induzido por cada volta fosse somado no interior do núcleo. Então, para calcular a amplitude da corrente, a qual o núcleo estava exposto, multiplica-se o número de voltas por 5 A e, para medir a corrente total foi acoplado no condutor com N voltas, um alicate amperímetro, como visto na Figura 3.6.

FIGURA 3.6 – CONDUTOR PRIMÁRIO COM 3 VOLTAS.



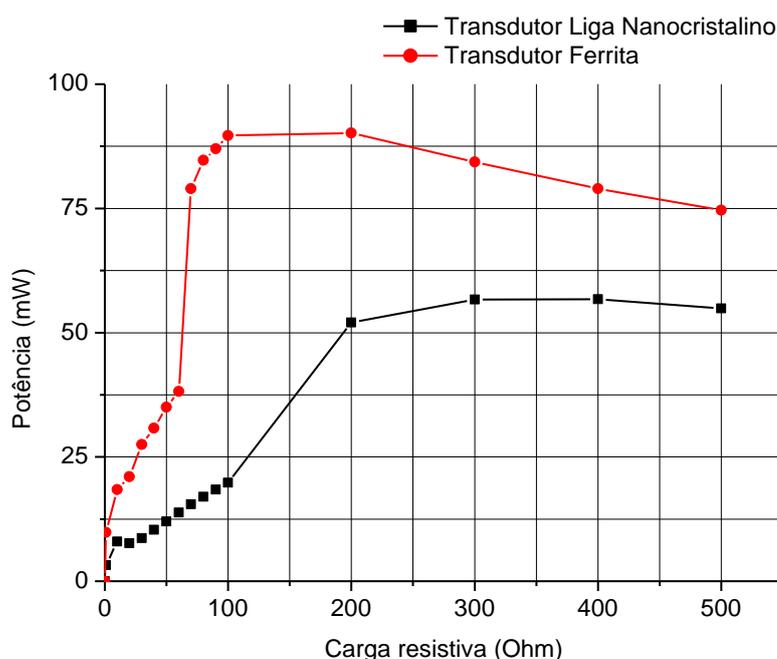
FONTE: FOTO DA AUTORA.

Para este caso, a corrente alternada circulando no condutor primário é três vezes maior do que aquelas utilizadas nos testes apresentados nas duas subseções anteriores, os principais resultados obtidos podem ser conferidos no Apêndice 3.

No entanto, a Liga Nanocristalina manteve os melhores resultados da densidade de potência para as cargas resistivas, quando comparados com a Ferrita.

Assim, como nos experimentos anteriores, a potência e a densidade de potência foram calculadas pelas médias aritméticas das tensões e das correntes para as resistências, e são apresentadas, respectivamente, nos Gráfico 3.6 e Gráfico 3.7.

GRÁFICO 3.6 – CARGA RESISTIVA X POTÊNCIA PARA $I_P=15$ A.



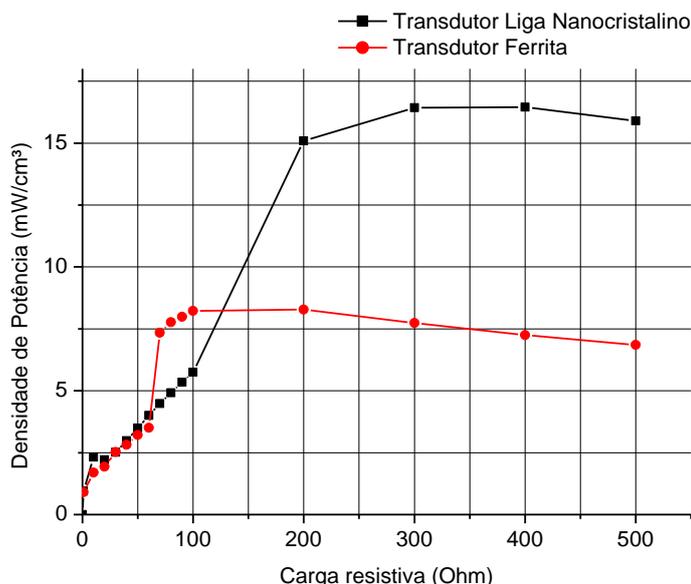
FONTE: DA AUTORA.

Ao serem comparados pela densidade de potência, o transdutor da liga Nanocristalina gerou $16,45 \text{ mW/cm}^3$ enquanto a Ferrita gerou $8,27 \text{ mW/cm}^3$. Um dos parâmetros responsáveis por esse resultado é a alta permeabilidade magnética relativa da Liga Nanocristalina que é de até 100.000 vezes a do ar.

Além da corrente que teve sua amplitude triplicada, as espiras foram aumentadas para o segundo e terceiro testes em relação ao primeiro e isso implica

em um aumento na tensão induzida. Deste modo, é notável o aumento na potência máxima e, conseqüentemente, na densidade de potência, para os dois transdutores, esses dados podem ser observados, resumidamente, na Tabela 3.3.

GRÁFICO 3.7 – CARGA RESISTIVA X DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA $I_p=15$ A.



FONTE: DA AUTORA.

TABELA 3.3 – RESUMO DOS MELHORES RESULTADOS PARA OS TRANSDUTORES.

Condição para os testes	Transdutores					
	Liga Nanocristalina			Ferrita		
	Vc [V]	P [mW]	Dp [mW/cm³]	Vc [V]	P [mW]	Dp [mW/cm³]
1º teste: parâmetros diferentes e $I_p=5$ A	0,5	9,2	7,9	0,7	15,9	1,9
2º teste: Nº de espiras iguais (430) e $I_p=5$ A	5,43	38,8	11,3	4,8	36,7	3,4
3º teste: Nº de espiras iguais (430) $I_p=15$ A	5,24	56,7	16,4	6,1	90,2	8,3

FONTE: DA AUTORA.

Os testes realizados foram fundamentais para a seleção do melhor material do núcleo do transdutor eletromagnético, pois esse é o primeiro componente do sistema de colheita de energia por indução magnética, portanto, deve ser observada a sua eficiência, que neste caso foi mensurada pela densidade de potência.

Para todos os testes realizados neste trabalho, o núcleo da liga Nanocristalina apresentou os melhores resultados, portanto, com base nestes dados experimentais a mesma foi selecionada como material para o núcleo do transdutor

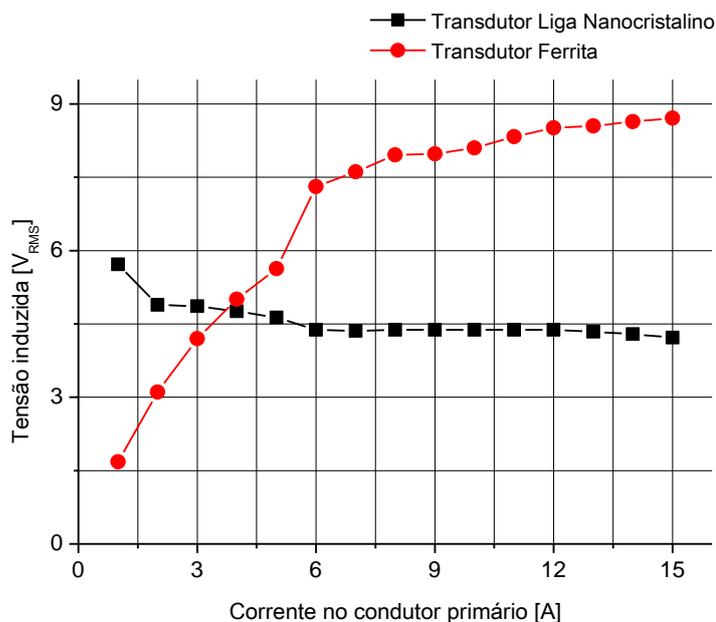
eletromagnético que será utilizado como fonte de energia elétrica para alimentar o sistema eletrônico energeticamente autônomo proposto.

3.2.4 Corrente no primário x Tensão induzida

Para colher a energia magnética, os transdutores são imersos na intensidade do campo magnético em torno do condutor, logo tem início o ciclo de magnetização do material do núcleo. Neste processo, conforme a corrente no primário aumenta a amplitude, para um material com alta permeabilidade magnética relativa, maior será o campo magnético interno no transdutor e, tende a aumentar o nível da tensão induzida na saída da bobina secundária.

Porém, quando comparadas as tensões eficazes induzidas, V_{rms} , medidas em circuito aberto para cada transdutor, observa-se que a liga Nanocristalina apresenta um comportamento diferente da Ferrita, pois, com o aumento da corrente no primário, a tensão eficaz induzida na liga Nanocristalina tem pouca variação, todavia, ocorre o inverso na Ferrita. Esta análise fora feita para os transdutores da Figura 3.3 e os dados plotados no Gráfico 3.8.

GRÁFICO 3.8 – TENSÃO INDUZIDA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE NO PRIMÁRIO.



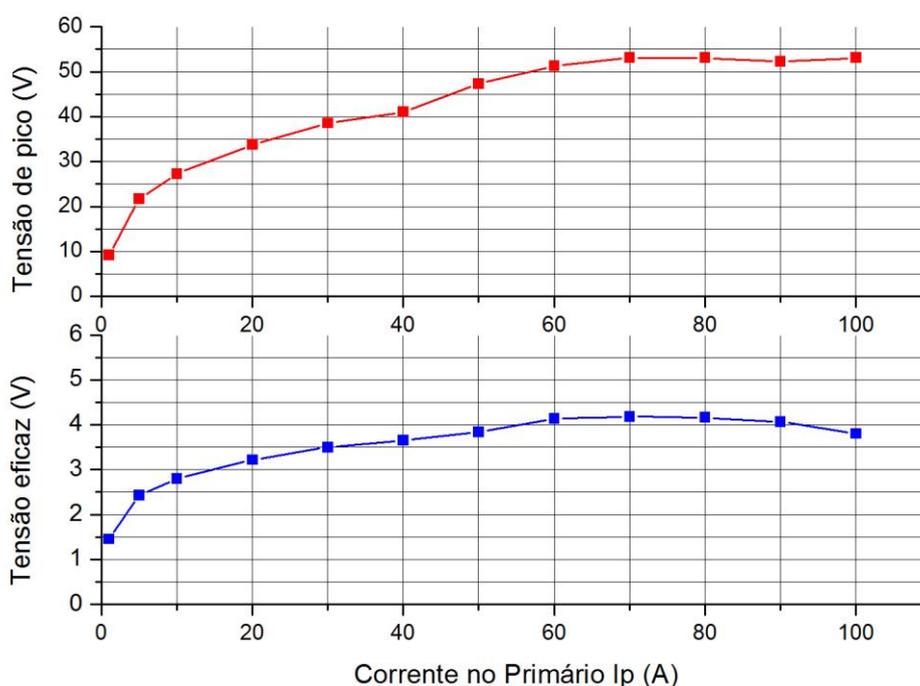
FONTE: DA AUTORA.

O núcleo da liga Nanocristalina atinge a densidade de saturação para uma intensidade de campo magnético menor do que a Ferrita, isto ocorre devido as propriedades magnéticas da liga Nanocristalina utilizada, como por exemplo, a alta permeabilidade magnética que facilita a concentração de fluxo magnético no interior do núcleo, levando-o à saturação magnética para uma baixa corrente, ou seja, baixa intensidade de campo magnético.

Entretanto, este fenômeno pode ser considerado uma vantagem da liga Nanocristalina, pois ao atingir a densidade de saturação o núcleo mantém uma tensão induzida eficaz, praticamente, invariável e independente da amplitude crescente da corrente no condutor primário.

Como exemplo prático, disto apresenta-se os dados do Gráfico 3.9, em que se alimenta uma carga de 100 Ω com um transdutor da liga Nanocristalina com 50 espiras e volume de 5,247 cm^3 . Observa-se que, o transdutor da liga Nanocristalina fornece uma tensão induzida, e mantém este valor, mesmo com a variação na corrente I_p de 0 a 100 A. Portanto, conclui-se que cada transdutor, assim como as fontes de energia finita tradicional, tem um valor de fornecimento de potência máximo, aparentemente, fixado pela tensão induzida máxima.

GRÁFICO 3.9 – TENSÃO INDUZIDA EFICAZ E DE PICO VERSUS CORRENTE NO PRIMÁRIO.



FONTE: DA AUTORA.

No que concerne à colheita de energia por indução magnética em linhas de potência, esta limitação natural da tensão eficaz induzida é uma vantagem, tendo em vista que, em linhas de potência existem fenômenos como picos de tensão e corrente que podem provocar possíveis danos ao sistema eletrônico ligado ao transdutor. Por isso, ao definir limites de operação para a fonte, ou seja, para o transdutor com liga Nanocristalina, a própria saturação funcionará como uma medida de segurança para os circuitos conectados ao mesmo.

Diante dos resultados experimentais apresentados, conclui-se que a liga Nanocristalina tem o melhor desempenho quanto a densidade de potência e isto implica em um maior rendimento, pois, a colheita de energia com volume menor de material traduz-se em uma fonte com dimensões físicas reduzidas, com menor peso, entre outras vantagens, sendo estas características de suma importância para sistemas eletrônicos energeticamente autônomos e portáteis.

Além disso, um destaque adicional das ligas Nanocristalinas é que estas apresentam boa estabilidade térmica em comparação com outros materiais ferromagnéticos, sem perdas das propriedades magnéticas, com temperaturas de serviço de até 150°C (HERZER, 1996).

Dessa forma, também por esse motivo, a liga Nanocristalina foi selecionada como material ferromagnético para o núcleo do transdutor eletromagnético utilizado na colheita e conversão de energia do campo magnético induzido.

3.2.5 Caracterização da Liga Nanocristalina

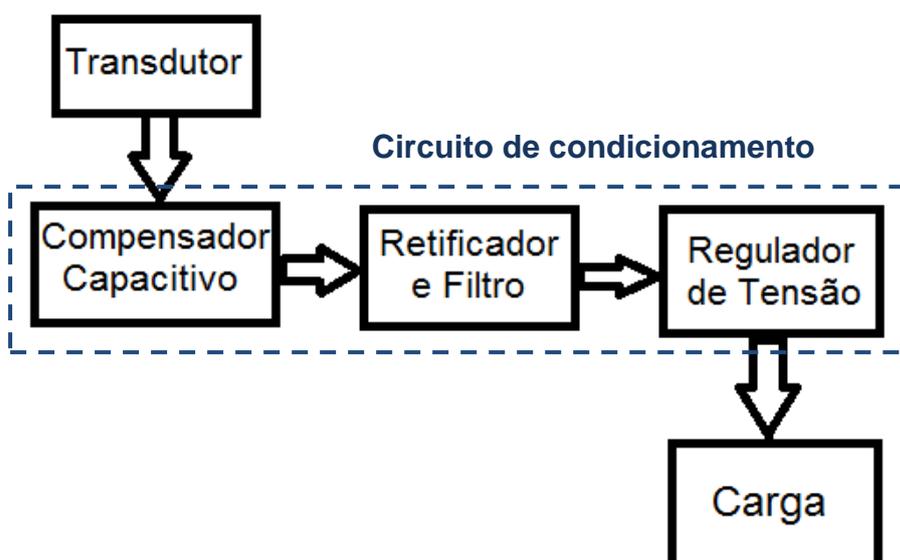
A liga Nanocristalina foi caracterizada quanto a sua estrutura por difração de raios X (difratômetro de raios X SHIMADZU modelo XRD 6000, radiação Cu K operando com tubo de alvo de cobre a uma tensão de 40 kV e 40 mA de corrente). Para a determinação dos componentes presentes na liga foi utilizado o programa (Pmgr) da SHIMADZU com o banco de dados JCPDS. Como resultado da caracterização obteve-se os materiais que compõem a liga Nanocristalina utilizada, o Ferro, o Silício e o Boro (FeSiB).

3.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

O primeiro componente do sistema de colheita proposto é o transdutor eletromagnético, utilizado para colher o campo magnético disperso em torno do condutor e convertê-lo em energia elétrica. Por isso, a primeira ação foi selecionar um transdutor capaz de fornecer potência para um circuito de condicionamento de energia e para carga a ser alimentada, como por exemplo, um nó sensor, e ainda manter as suas dimensões físicas compactas.

O circuito equivalente do transdutor eletromagnético pode ser visto na Figura 3.8, e, assim como um transformador de corrente, esse transdutor quando é submetido a um campo magnético variante, apresenta comportamento não linear em algumas regiões. Isto ocorre devido as perdas magnéticas no transdutor, representadas pela indutância e resistência da bobina secundária, que serão consideradas para dimensionar o circuito de condicionamento de energia. O circuito de condicionamento desenvolvido segue o diagrama de blocos visto na Figura 3.7.

FIGURA 3.7 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE ENERGIA.



FONTE: DA AUTORA.

A corrente de magnetização, a corrente de *Foucault* e a histerese magnética, serão desconsideradas nesse trabalho, por não ter sido desenvolvido um modelo matemático para conhecer a influência de ambas no elemento transdutor, as mesmas não foram consideradas no projeto do circuito de condicionamento.

3.3.1 Compensador Capacitivo

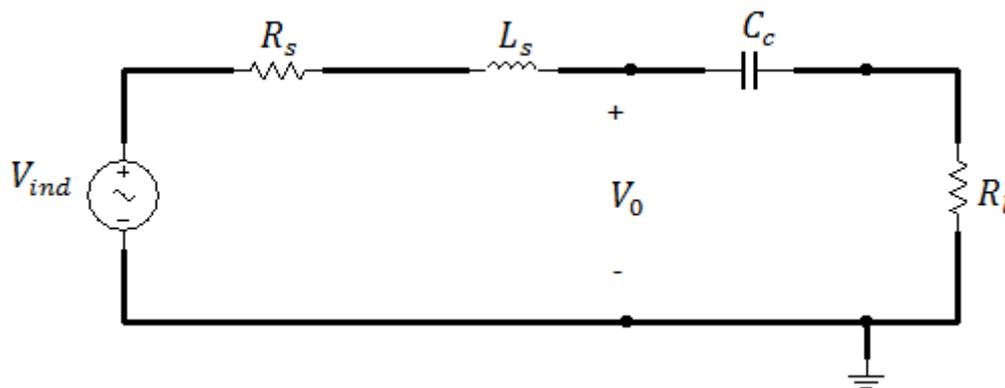
A impedância z_s da bobina secundária do transdutor é dada pela indutância L_s em série com a resistência R_s , quando analisadas na frequência de operação f , em que $\omega = 2\pi f$, z_s é expressa na forma retangular como,

$$z_s = R_s + j\omega L_s \text{ } [\Omega] \quad (3.1)$$

A bobina secundária é representada por uma fonte de tensão alternada ideal, $v_{ind} = V_{ind} \text{sen}\omega t$, em série com a impedância da bobina secundária z_s , dada pela equação 3.1.

O capacitor C_c , em série com a bobina, como pode ser visto na Figura 3.8, tem a função de compensar a indutância da bobina, ou seja, tornar as reatâncias indutiva e capacitiva iguais, $X_l = X_c$, tornando, portanto, a impedância puramente resistiva. Logo, quando a resistência da carga for igual à resistência do transdutor, a potência dissipada na carga será máxima. Portanto, podemos enunciar o teorema de máxima transferência de potência, o qual, de acordo com Sadiku (2004), a máxima transferência de potência para a carga ocorre quando a resistência da fonte (transdutor) for igual a resistência da carga R_l .

FIGURA 3.8 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSDUTOR.



FONTE: ADAPTADO DE TASHIRO *et al* (2011).

Indutores com núcleos de materiais ferromagnéticos são não lineares e, por conseguinte, uma excitação senoidal produz uma resposta não senoidal. Para tais casos, L é geralmente definida como a razão ϕ/i , em que, ϕ correspondem as linhas de fluxo magnético do circuito (LORRAIN, CORSON e LORRAIN, 1988).

A força eletromotriz autoinduzida é dada por: $d\Phi/dt$, entretanto, para o fluxo magnético variante no tempo, torna-se $d(Li)/dt$.

Baseando-se nesse princípio, a autoindutância da bobina, L_s , com N espiras e uma corrente i_p no primário, pode ser calculada pela seguinte equação,

$$L_s = N \frac{\Phi}{i_p} \text{ [H]} \quad (3.2)$$

A resistência do fio da bobina é calculada da seguinte forma,

$$R_s = \rho \frac{l}{S} \text{ (\Omega)} \quad (3.3)$$

para um condutor de comprimento l , a área da seção uniforme S , e ρ a resistividade do material por unidade de volume.

A tensão induzida V_0 representa o valor na saída na bobina antes do compensador capacitivo, C_c . Quanto ao método utilizado para dimensionar o capacitor C_c , foi baseado no cálculo da frequência de ressonância em um circuito RLC em série.

$$f = \frac{1}{2\pi L_s C_c} \text{ [Hz]} \quad (3.4)$$

Para dimensionar a capacitância de referência, reescreve-se a equação para isolar e calcular o C_c , obtem-se, portanto,

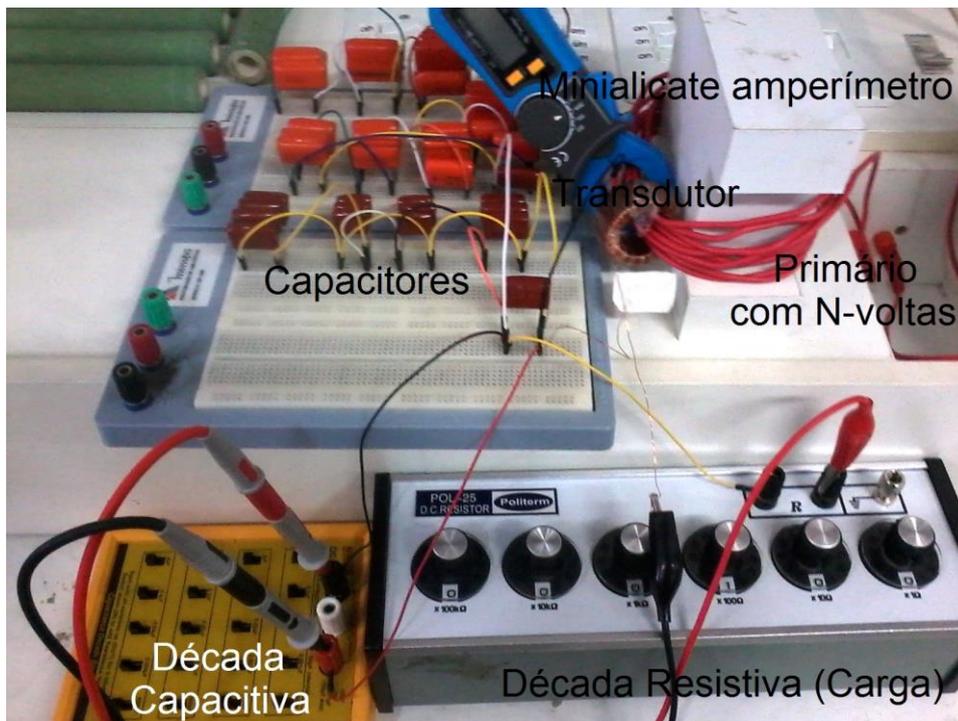
$$C_c = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_s} \text{ [F]} \quad (3.5)$$

Neste caso, considerando a frequência de operação fixa, $f = 60 \text{ Hz}$, calcula-se uma capacitância para compensar a reatância indutiva XL_s .

No entanto, devido a variação da corrente no primário, o capacitor C_c calculado pela Equação 3.5, não compensou completamente a reatância indutiva. Por isso, optou-se por definir o capacitor C_c , ou uma faixa de capacitância por meio de experimentos.

Para isso, foram utilizados uma década capacitiva (100 pF a 11,111 μF), e associações com capacitores em paralelo, devido a necessidade em aumentar a faixa de capacitância. O aparato de instrumentos utilizados para definir a capacitância de compensação pode ser visto na Figura 3.9.

FIGURA 3.9 – APARATO DE INSTRUMENTOS PARA DEFINIR O COMPENSADOR CAPACITIVO.



FONTE: FOTO DA AUTORA.

3.3.2 Circuito Retificador, Filtro e Regulador de tensão.

Na saída da bobina secundária, V_0 , tem-se uma forma de onda alternada e saturada, como podemos observar na Figura 3.11 (a). Por isso, antes de fornecer a potência para a carga, o sinal de tensão precisa ser condicionado. Por isso, foi desenvolvido um circuito de condicionamento composto por um retificador, um filtro a capacitor e um regulador de tensão, para se obter o nível desejado de tensão contínua.

O sinal foi retificado por dois diodos ligados a bobina no modo com derivação central, com a saída de onda completa, como visto na Figura 3.10. Nesta configuração, a principal vantagem é a utilização de apenas dois diodos ao invés de quatro, isso significa e menos espaço ocupado pelos diodos no circuito.

Como visto na Figura 3.10, durante o ciclo positivo de B1, o diodo D1 torna-se idealmente um curto-circuito e o diodo D2 idealmente um circuito-aberto. Durante o ciclo negativo de B2, invertem-se as funções dos diodos, mas se mantem a mesma polaridade da tensão na carga, com o dobro da frequência do sinal de entrada, nesse caso 120 Hz, como pode ser conferido visto na Figura 3.11 (b).

O diodo utilizado o *Schottky* BAT 43 foi dimensionado para a retificação do sinal devido as seguintes características de operação: comutação ultrarrápida e queda de tensão muito baixa na polarização direta. Isto torna esses diodos especiais em muitas aplicações que envolvem trabalho com pulsos de curta duração como em circuitos de comutação ou ainda em circuitos de proteção contra transientes. Segundo Boylestad *et al* (1998), o diodo *Schottky* apresenta um conjunto de características mais próximo do ideal e níveis de tensão de polarização, V_t , menores do que outros diodos retificadores.

O filtro utilizado foi o mais popular e simples utilizando apenas um capacitor C_f , conectado na saída do retificador, como visto na Figura 3.10. De acordo com o dimensionamento do capacitor é possível tornar a tensão contínua com *ripple* (oscilação) mínimo nos terminais do C_f , como pode ser visto na Figura 3.11 (c).

Em circuito aberto, a forma de onda em C_f seria, idealmente, um nível contínuo constante, igual a tensão de pico do circuito retificador. Mas, geralmente, haverá uma carga na saída do filtro, deve-se considerar isto para dimensionar o capacitor C_f de acordo com o valor da carga para diminuição do *ripple* (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1998). Portanto, a tensão de *ripple* (*rms*), pode ser calculada por:

$$V_r(rms) = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} f_{ripple} C_f} \rightarrow \frac{2,4V_{dc}}{R_l C_f} (V) \quad (3.6)$$

em que, a corrente na carga, I_{dc} , está em mA, R_l em k Ω , o capacitor C_f em μ F, e f_{ripple} é a frequência de *ripple* em Hertz. Por sua vez, a tensão média na saída do filtro, V_{dc} , é dada por:

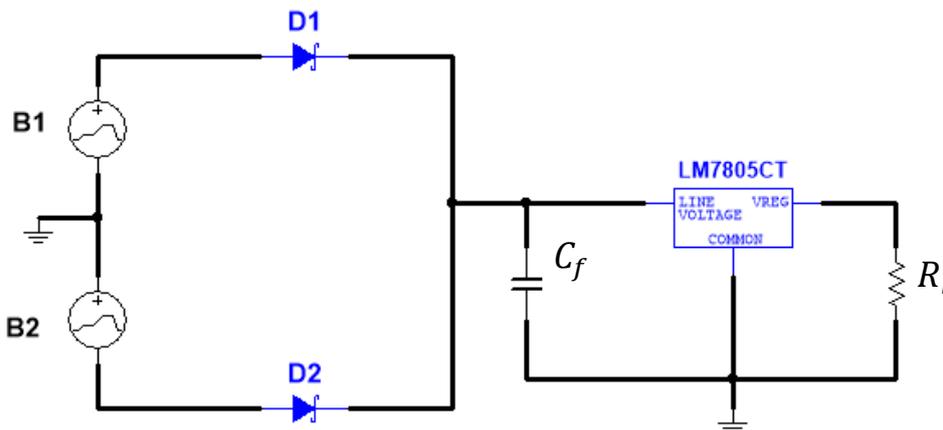
$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4f C_f} \quad (3.7)$$

em que V_m é a tensão máxima na saída do retificador. Por último, o *ripple* de um filtro capacitivo é dado em porcentagem por:

$$r = \frac{V_r(rms)}{V_{dc}} * 100 \% \rightarrow \frac{2,4}{R_l C_f} * 100 \% \quad (3.8)$$

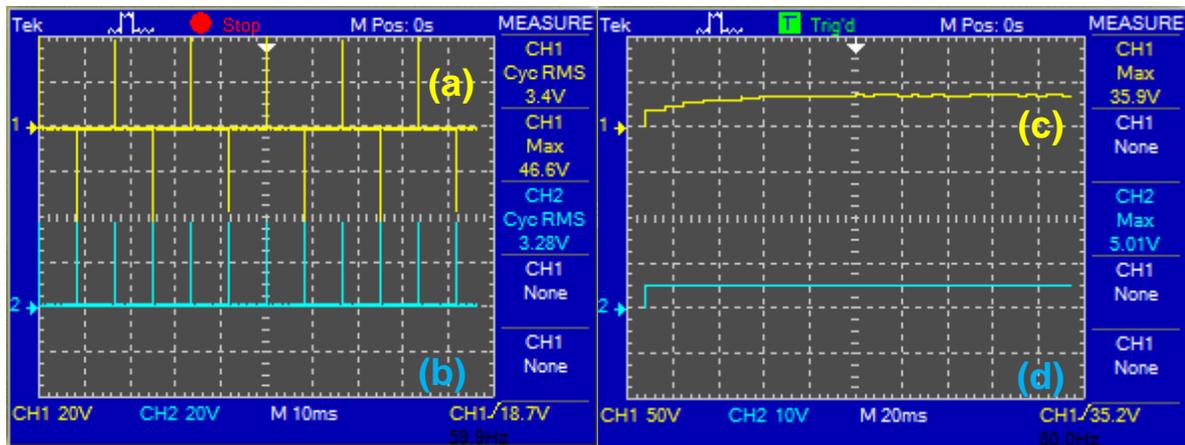
Na regulação da tensão, foi utilizado o circuito integrado LM7805CT, o qual, de acordo como o *datasheet*, pode receber uma tensão contínua de até 35 V, e fornece um nível entre 4,8 e 5,2 V, e permanece constante, mesmo que a tensão de entrada varie, ou a carga conectada mude de valor. O LM7805CT suporta uma corrente de saída de até 1 A, suportando picos máximos de até 2,2 A. Ao final, tem-se o sinal de saída que está apresentado na Figura 3.11 (d), aplicado na carga R_l .

FIGURA 3.10 – CONFIGURAÇÃO COM DERIVAÇÃO CENTRAL.



FONTE: DA AUTORA.

FIGURA 3.11 – SIMULAÇÃO (A) ENTRADA (B) RETIFICADOR (C) FILTRO E (D) REGULADOR.



FONTE: DA AUTORA.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.11, mostra que o circuito de condicionamento de energia projetado atende aos parâmetros desejados, uma vez que, o mesmo foi dimensionado com objetivo de alimentar como carga resistiva, o soc nRF24L1 da Nordic, o qual de acordo com o *datasheet*, precisa de uma tensão contínua de 5 volts e uma corrente de 20 mA, para que o consumo de energia, o qual é uma soma das correntes de todos os módulos ativos no momento da medição e também da aplicação, funcione adequadamente e alimentado pela colheita de energia por indução magnética.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal deste trabalho é o projeto de um sistema de colheita de energia que aproveita o campo magnético induzido em torno de condutores de linhas de potência, principalmente, em linhas de distribuição de energia, para alimentar um nó sensor. Por isso, serão apresentados, neste capítulo, resultados obtidos em estudos teórico e experimental para dimensionar cada componente do sistema de colheita, buscando sempre o melhor rendimento do sistema.

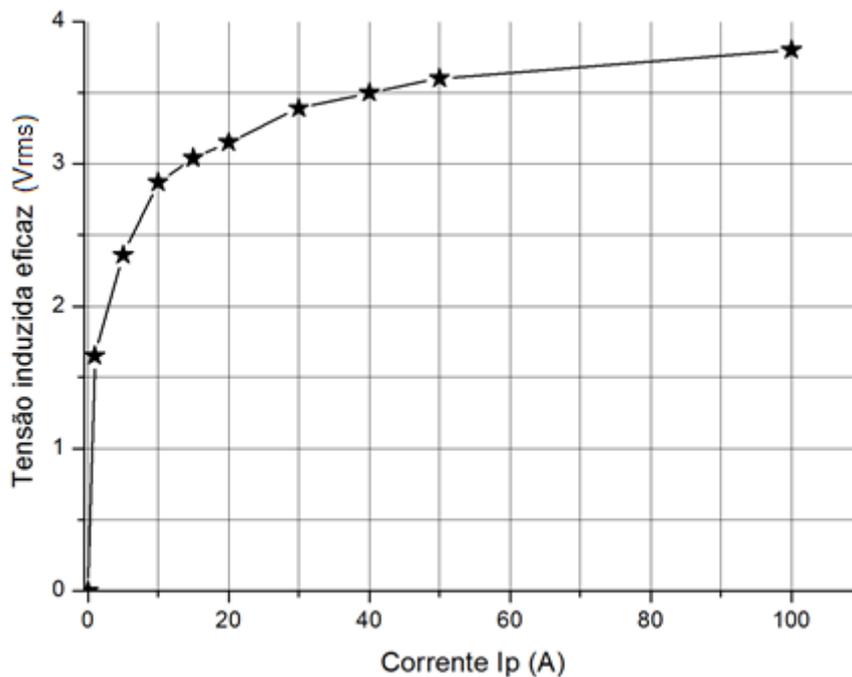
4.1 ANÁLISE DO TRANSDUTOR NANOCRISTALINO

O primeiro componente do sistema de colheita é o transdutor eletromagnético utilizado para a colheita do campo magnético disponível em torno do condutor e convertê-lo em energia elétrica. O objetivo é projetar um transdutor eletromagnético capaz de fornecer potência para o circuito de condicionamento de energia e para carga a ser alimentada, e ainda manter as suas dimensões físicas compactas.

Nesse contexto, baseando-se nos resultados apresentados no Capítulo 3, a liga Nanocristalina foi selecionada como material do transdutor e submetida a outros testes para obtenção do desempenho da liga FeSiB utilizada nos transdutores para CEIM. Os resultados apresentados a seguir representam o comportamento de todos os núcleos de material nanocristalino testados mudando-se apenas os valores de potência captada, pois esta grandeza depende de algumas particularidades de cada transdutor, como número de espiras, dimensões físicas, entre outras.

O que se observa no Gráfico 4.1 é que devido as propriedades magnéticas da liga, em particular, a sua alta permeabilidade magnética relativa de 100.000 vezes a permeabilidade do ar, o transdutor atinge a saturação magnética para uma intensidade de campo magnético relativamente baixa, a partir de 1,2 T. Após atingir a saturação, ou seja, quando todos os domínios magnéticos estão alinhados na mesma direção do campo magnético, o transdutor mantém a tensão induzida eficaz invariável, mesmo para uma corrente no condutor primário crescente.

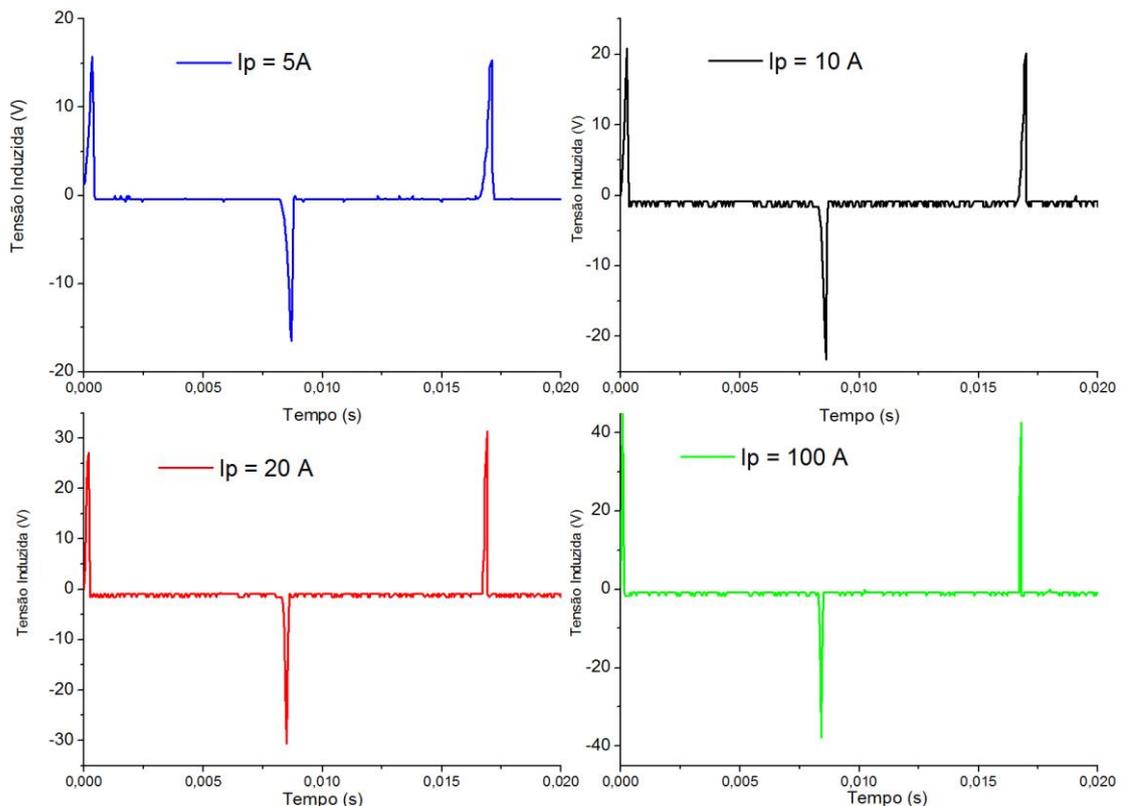
GRÁFICO 4.1 – TENSÃO INDUZIDA EFICAZ X CORRENTE I_p PARA O TRANSDUTOR DA LIGA NANOCRISTALINA.



FONTE: DA AUTORA.

No entanto, esta pode ser considerada uma vantagem para a aplicação proposta, tendo em vista que, em linhas de potência existem fenômenos como picos de tensão e de corrente, uma vez que, é possível definir limites de operação para a saturação do transdutor, esta seria uma estratégia de proteção para os componentes do sistema.

A forma de onda da tensão induzida na saída da bobina secundária para uma frequência de 60 Hz (período 0,016 segundos), quando o transdutor é exposto a amplitudes diferentes para a corrente no condutor primário, pode ser observado no Gráfico 4.2, pode-se observar a medida que a amplitude do pico de tensão aumenta, o tempo no qual o pico acontece diminui. Isto indica que a área do pico de tensão permanece a mesma, independente da variação na corrente I_p . Pois, quando aumenta a amplitude de tensão diminui a base, ou seja, o tempo de subida e descida do pico.

GRÁFICO 4.2 – TENSÃO INDUZIDA PARA DIFERENTES AMPLITUDES DE I_p .

FONTE: DA AUTORA.

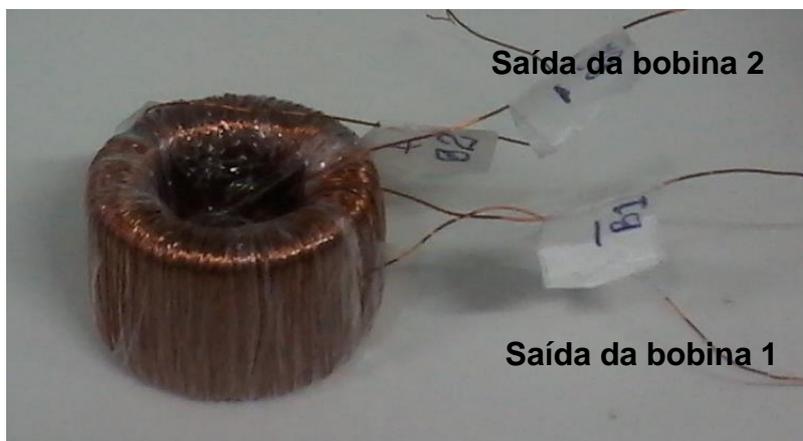
Embora a saturação possa contribuir de certa forma para a segurança do circuito eletrônico ligado ao transdutor com uma tensão eficaz invariante, os altos picos das tensões induzidas saturadas podem ser inapropriados, pois, a medida que a corrente no condutor primário aumenta, os picos na amplitude também aumentam. Certamente, se tornará ainda mais complexo dimensionar circuitos compactos, com componentes eletrônicos que suportem tais fenômenos sem danificá-los.

Portanto, foi utilizada a técnica de fontes em paralelo na estrutura da bobina para diminuir a amplitude destes picos, fazendo-se no mínimo dois enrolamentos ao invés de um, e ligando-os em paralelo. Com a redução no número de espiras em cada enrolamento, o que influencia diretamente na impedância da bobina, foi possível diminuir os picos elevados de tensão sem interferir no desempenho do transdutor.

4.2 BOBINAS SECUNDÁRIAS LIGADAS EM PARALELO

O método utilizado para reduzir os picos de altas amplitudes formados pela tensão induzida no transdutor baseou-se na técnica em que as fontes de tensão são ligadas em paralelo. Em que, cada bobina se comporta como uma fonte de tensão alternada ideal em série com a sua respectiva impedância (ver equação 3.1). O transdutor apresentado na Figura 4.1 foi utilizado para os testes com a técnica de bobinas em paralelo.

FIGURA 4.1 – TRANSDUTOR COM DUAS BOBINAS.



FONTE: DA AUTORA.

Na Tabela 4.1, estão descritos os parâmetros do transdutor da Figura 4.1. Todos os parâmetros são variáveis importantes as quais influenciam na análise de desempenho do transdutor. Ou seja, para selecionar um transdutor para alimentar um sistema eletrônico todos estes parâmetros devem ser considerados.

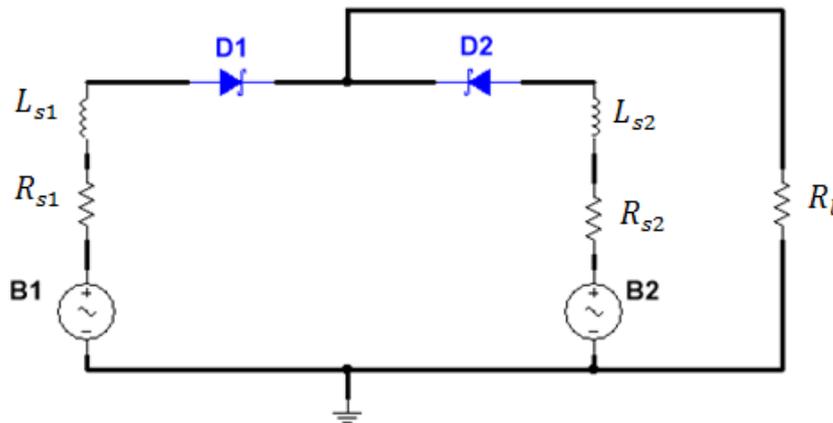
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DO TRANSDUTOR COM DUAS BOBINAS.

Descrição	Nanocristalino
Diâmetro externo (mm)	38,9
Diâmetro interno (mm)	30,7
Altura (mm)	20,2
Volume (cm ³)	9,054
Permeabilidade relativa	100.000
Densidade magnética de saturação inicial	1,2 T
Massa (g)	36,17
Valor por núcleo (R\$)	11,20
Bitola do fio de cobre (AWG)	26

FONTE: (<http://www.magmattec.com/produtos.html>).

O circuito equivalente para o transdutor com duas bobinas em paralelo, ligado a uma carga R_l , é apresentado na Figura 4.2. A bobina 1 é representada por B1 em série com a indutância L_{s1} e a resistência R_{s1} , assim como, a bobina 2, é representada por B2 em série com a indutância L_{s2} e a resistência R_{s2} .

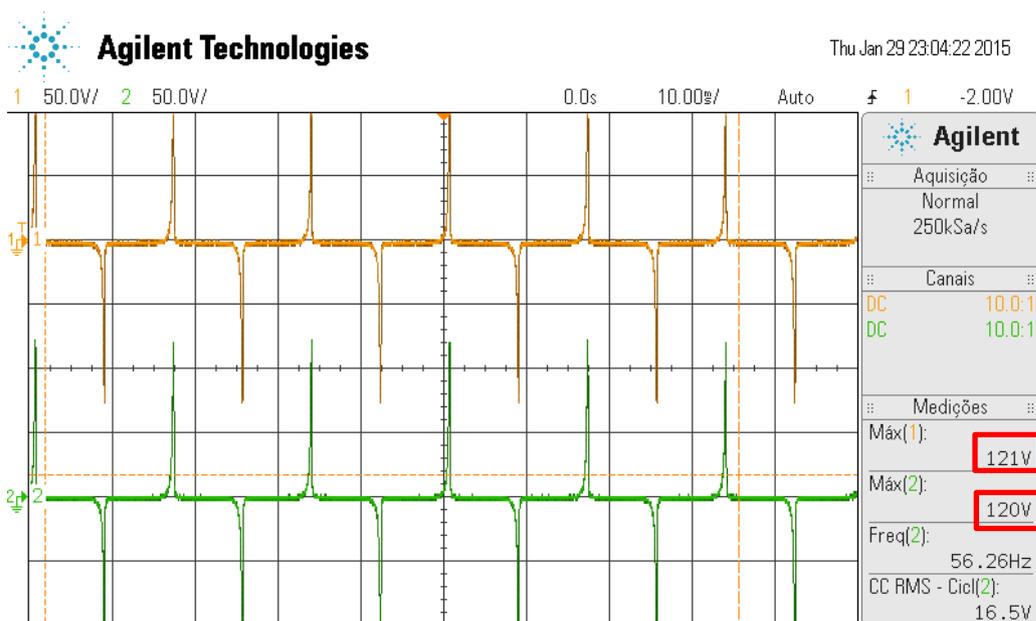
FIGURA 4.2 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DUAS BOBINAS EM PARALELO.



FONTE: DA AUTORA.

Os diodos *Shocktky* colocados em série com as bobinas impedem a circulação de corrente entre as duas fontes ligadas em paralelo. Além disso, como foi explicado no Capítulo 3, esses dois diodos são rearranjados para funcionar como um retificador de onda completa com derivação central.

FIGURA 4.3 – RESPOSTA INDIVIDUAL DAS BOBINAS B1 E B2.

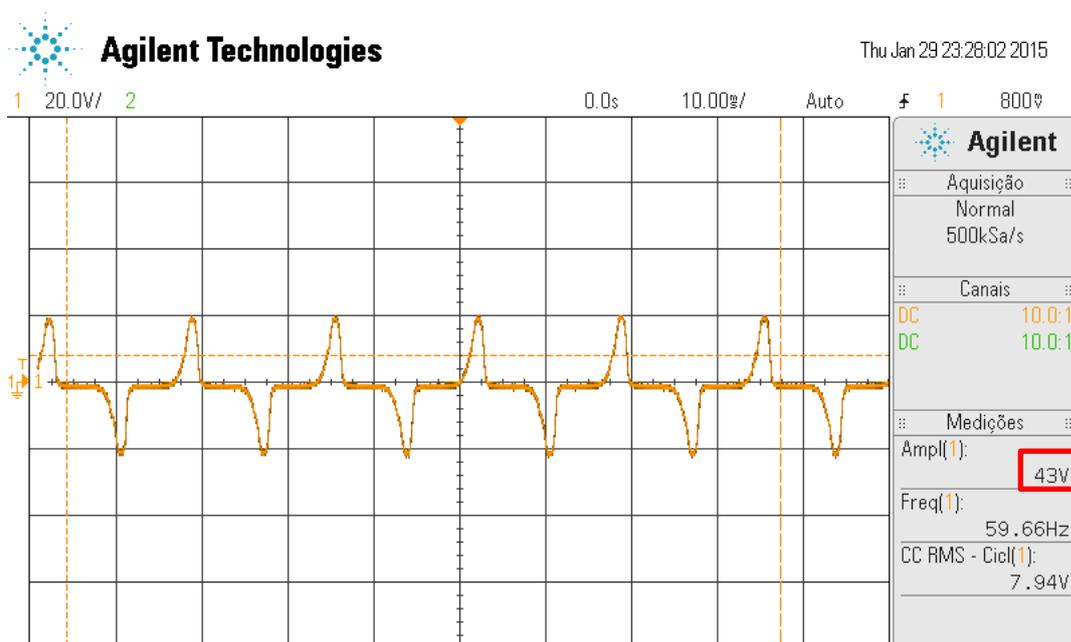


FONTE: DA AUTORA.

O primeiro teste foi realizado com as duas bobinas individuais com circuito aberto e a corrente no condutor primário igual a 20 A. O resultado da tensão induzida pode ser observado na Figura 4.3.

As respostas individuais na saída das bobinas apresentam uma tensão induzida da ordem de 120 volts de pico, enquanto que as bobinas B1 e B2 ligadas em paralelo apresentam uma redução considerável na tensão de pico, como pode ser visto na Figura 4.4.

FIGURA 4.4 – BOBINAS B1 E B2 LIGADAS EM PARALELO.



FONTE: DA AUTORA.

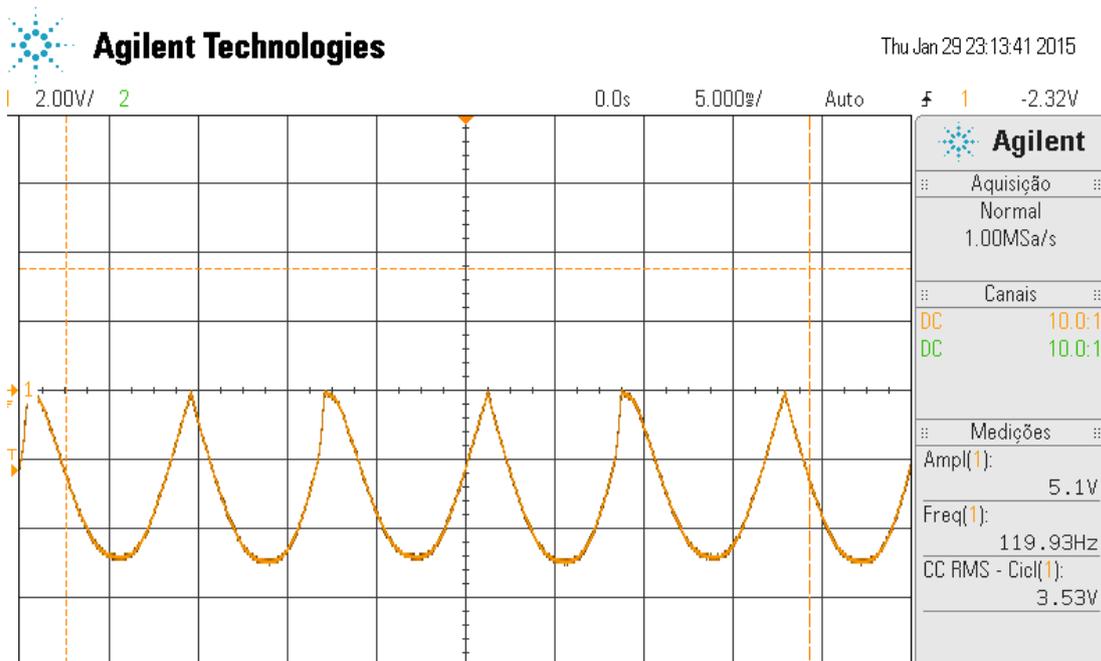
Quando as bobinas são conectadas em paralelo, e repetindo-se as mesmas condições de teste para bobinas individuais, pode-se observar na Figura 4.4, que houve uma redução de aproximadamente 1/3 da tensão de pico induzida, enquanto a tensão induzida eficaz diminuiu, aproximadamente, $\frac{1}{2}$. Portanto, o objetivo de reduzir os altos picos de tensão foi alcançado, com redução de aproximadamente, 120 volts por bobina para 43 volts de pico com bobinas em paralelo.

4.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

O circuito de condicionamento foi projetado com base em uma carga resistiva de $100\ \Omega$ e uma corrente de $20\ \text{A}$ no condutor primário. Os resultados obtidos no experimento prático foram semelhantes aos apresentados na simulação, apresentada na subseção 3.3.2.

Os diodos D1 e D2 ligados em série com as bobinas, como visto na Figura 3.10 e Figura 4.2, retificam o sinal em cada semiciclo da tensão. Portanto, na saída da bobina a frequência é o dobro da frequência do fluxo no primário, $120\ \text{Hz}$, e apresenta a forma de onda vista na Figura 4.5.

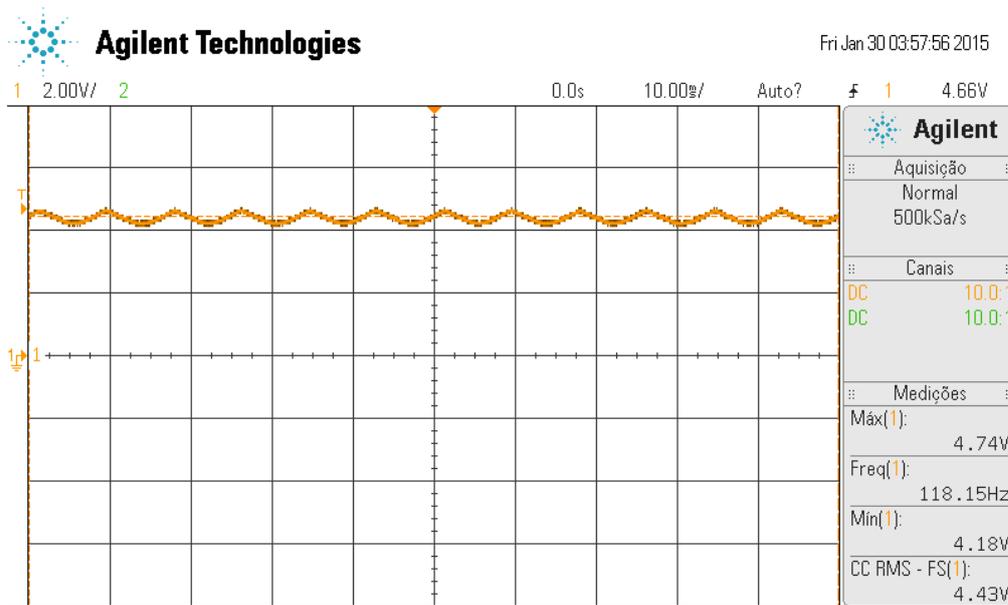
FIGURA 4.5 – TENSÃO NA SAÍDA DO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA.



FONTE: DA AUTORA.

Baseando-se na oscilação (*ripple*) apresentado neste sinal, um filtro a capacitor foi dimensionado e acrescentado ao circuito para diminuir a oscilação do sinal para aproximadamente 10 % da tensão média. O resultado desta etapa pode ser visto na Figura 4.6.

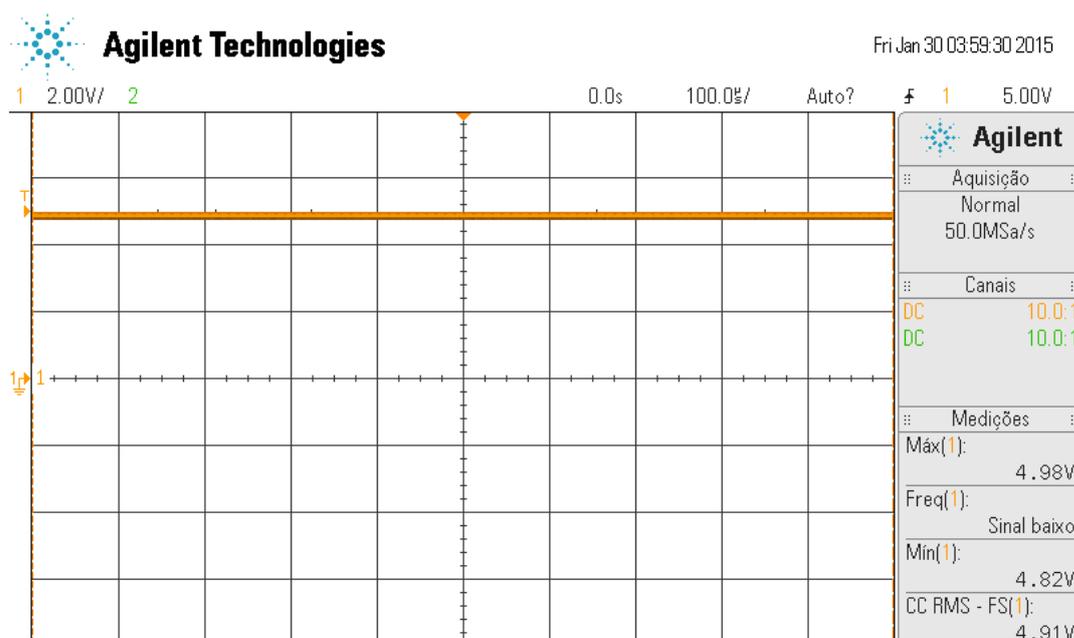
FIGURA 4.6 – TENSÃO NA SAÍDA DO FILTRO A CAPACITOR.



FONTE: DA AUTORA.

Por fim, o sinal na saída do circuito de condicionamento correspondente ao regulador de tensão, é mostrado na Figura 4.7, o qual disponibiliza uma corrente eficaz na carga $I_l = 46,5 \text{ mA}$ e tensão eficaz de $v_{rms} = 4,91 \text{ V}$, portanto, a potência disponibilizada pelo transdutor para a carga de 100Ω é $P = 228,5 \text{ mW}$.

FIGURA 4.7 – TENSÃO NA SAÍDA DO REGULADOR.



FONTE: DA AUTORA.

Vale salientar que esta potência pode variar de acordo com a carga R_L , apenas a tensão é fixa, devido ao regulador de tensão 78L05 utilizado, que a mantém em 5 V ($\pm 2\%$), de acordo com o *datasheet* do regulador de tensão. Além disso, destaca-se que o circuito de condicionamento foi projetado de acordo com a resposta do transdutor com duas bobinas em paralelo, Figura 4.1, no intuito de minimizar os altos picos de tensão que ocorrem em transdutores com apenas uma bobina, para os quais certamente, o projeto do circuito de condicionamento precisa considerá-los para que os componentes do mesmo possam comportá-los sem danificar o circuito.

4.4 APLICAÇÃO - NÓ SENSOR NRF24LE1

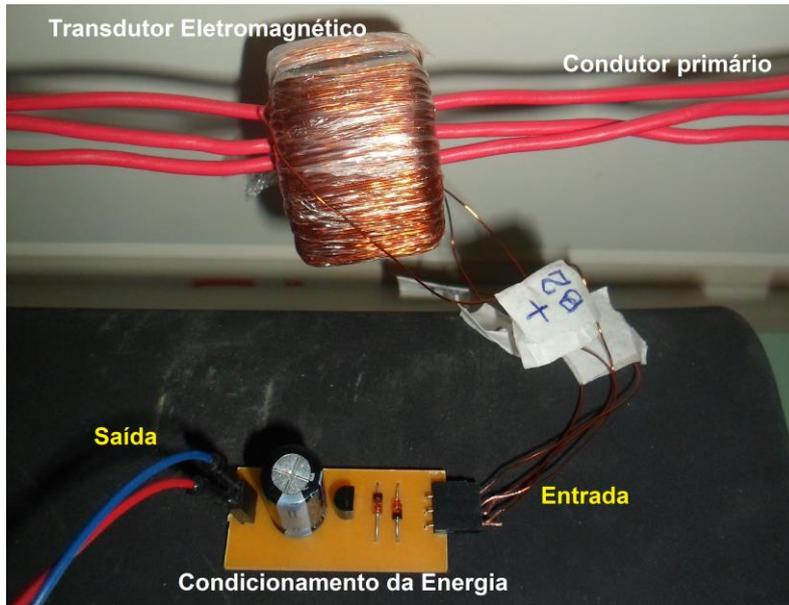
O sistema eletrônico energeticamente autônomo proposto neste trabalho é composto por três componentes: a fonte de alimentação que utiliza a CEIM, o circuito de condicionamento de energia e uma carga resistiva. Nas seções anteriores foram demonstrados a metodologia e os resultados alcançados para o projeto e testes experimentais, a fim de definir o melhor transdutor para a fonte e para o circuito de condicionamento. Portanto, nesta seção será tratada da carga resistiva, o *System-on-Chip* nRF24LE1 da Nordic.

O nRF24LE1 é um membro da família de transceptores RF 2.4 GHz inteligentes com microcontroladores embutidos de baixo custo e de alta performance. O nRF24LE1 é otimizado para fornecer uma solução de chip único para aplicações sem fio de ultrabaixa potência. Para a camada de aplicação do nRF24LE1 oferece um rico conjunto de periféricos, incluindo: SPI, 2 fios, UART, 6-12 ADC *bit*, PWM entre outros (NORDIC, 2010).

Para definir a fonte de alimentação a ser utilizada, o consumo de energia pelo nRF24LE1 foi baseado na soma das correntes dos módulos ativos no momento da aplicação. O fluxograma visto na Figura 4.9, representa o modo de operação e consumo destas cargas para as condições em que $V_{DD} = 3$ a 5 V, temperatura ambiente de 25°C.

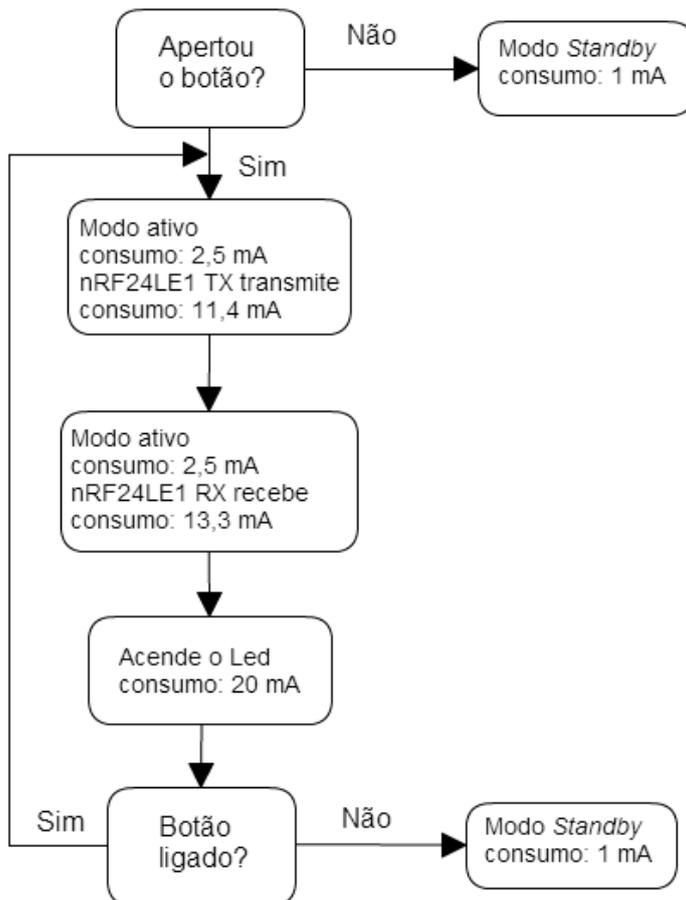
A aplicação foi realizada com fonte como vista na Figura 4.8, para cada nó nRF24LE1, sendo que foram utilizadas duas, uma alimenta o nó transmissor e outra o nó receptor e o *led* (diodo emissor de luz).

FIGURA 4.8 – FONTE DE CEIM DESENVOLVIDA.



FONTE: DA AUTORA.

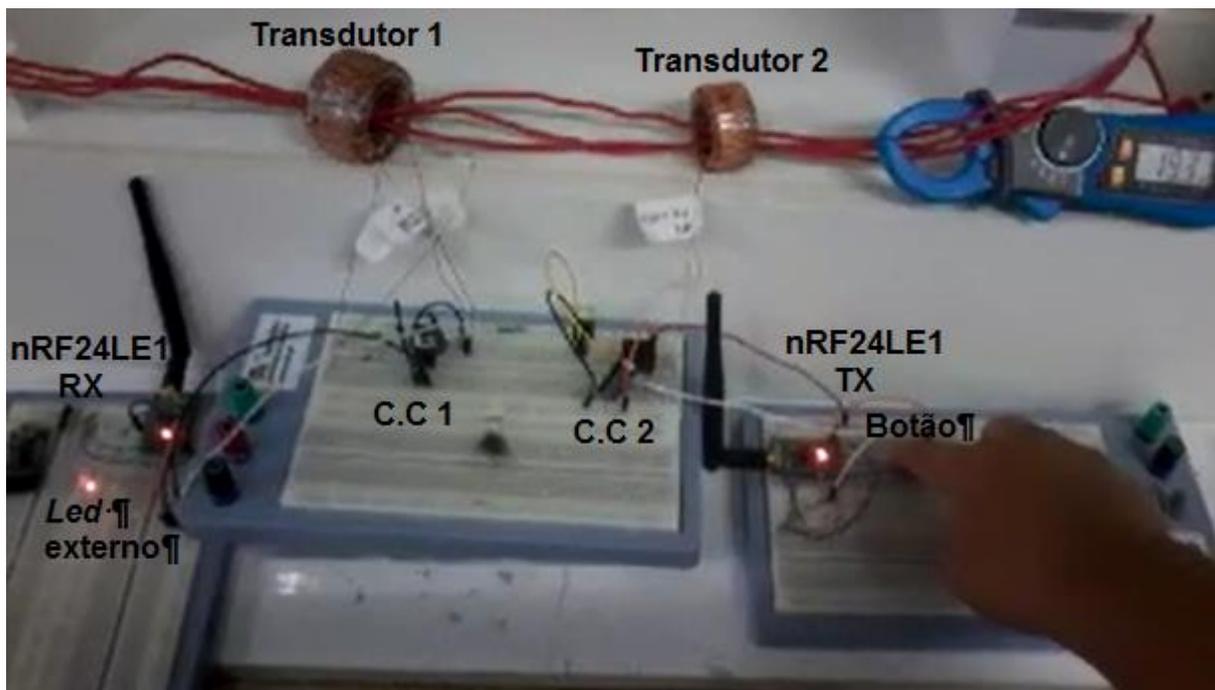
FIGURA 4.9 – FLUXOGRAMA EXPLICATIVO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DOIS NÓS.



FONTE: DA AUTORA.

Para a operação do sistema foi realizado um experimento com um programa botão e *led* simples. De modo que ao apertar o botão o transmissor nRF24LE1 TX envia o sinal via rádio frequência para o nRF24LE1 RX o qual ao receber o sinal aciona um *led* externo, e ambos são alimentados por fontes CEIM formadas por transdutores e circuitos de condicionamento (C.C). Na Figura 4.10, pode ser vista a aplicação realizada, na qual os dois nós são alimentados pelas fontes de CEIM.

FIGURA 4.10 – APLICAÇÃO COM DOIS NÓS ALIMENTADOS PELAS FONTES DE CEIM.

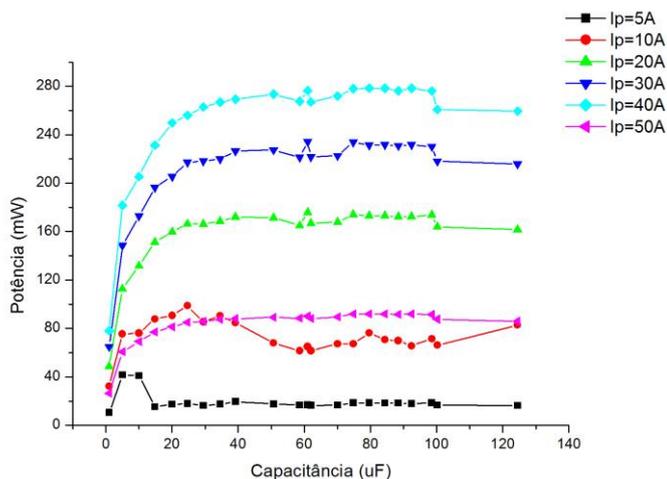


O sinal na saída do circuito de condicionamento projetado, como mostrado na Figura 4.7, disponibiliza uma tensão eficaz de $v_{rms} = 4,91 V$ e corrente eficaz na carga $I_l = 46,5 mA$, portanto, a potência disponibilizada pelo transdutor para a carga de 100Ω é $P = 228,5 mW$. Como o consumo máximo de corrente ocorreu no momento em que o sinal foi recebido e o *led* aceso, ou seja, o sistema consumiu uma corrente máxima de $I_{lRX} + I_{led} = 35,8 mA$ e tensão de $v_{rms} = 5 V$, portanto, com a máxima potência, $P = 179 mW$, para esta aplicação. Isso quer dizer que a fonte projetada atendeu a demanda energética da carga proposta nesta aplicação.

4.5 COMPENSADOR CAPACITIVO

Alguns testes foram realizados variando a capacitância C_c em função da densidade de potência para diferentes correntes no primário. Como é mostrado no Gráfico 4.3, para cada corrente no primário, existe uma faixa de capacitância ótima que aumenta a potência na carga.

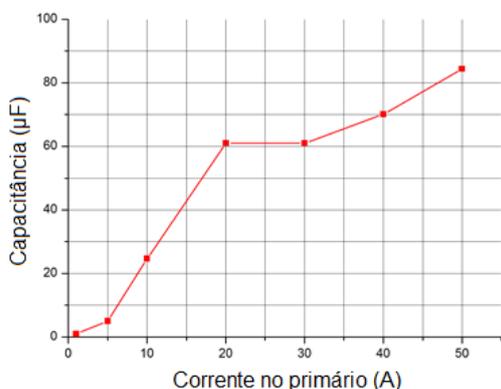
GRÁFICO 4.3 – POTÊNCIA X CAPACITÂNCIA.



FONTE: DA AUTORA.

Assim como foi explicado anteriormente na seção 3.3.1, a indutância da bobina L_s varia de acordo com a corrente no primário, alterando a reatância indutiva, e por isso, o capacitor de compensação C_c , projetado para uma frequência de ressonância de 60 Hz, também varia. Para uma faixa de C_c ótima, correspondente a cada corrente no primário existe um valor de capacitância no intervalo dessa faixa que tem a melhor resposta, como pode ser observado no Gráfico 4.4.

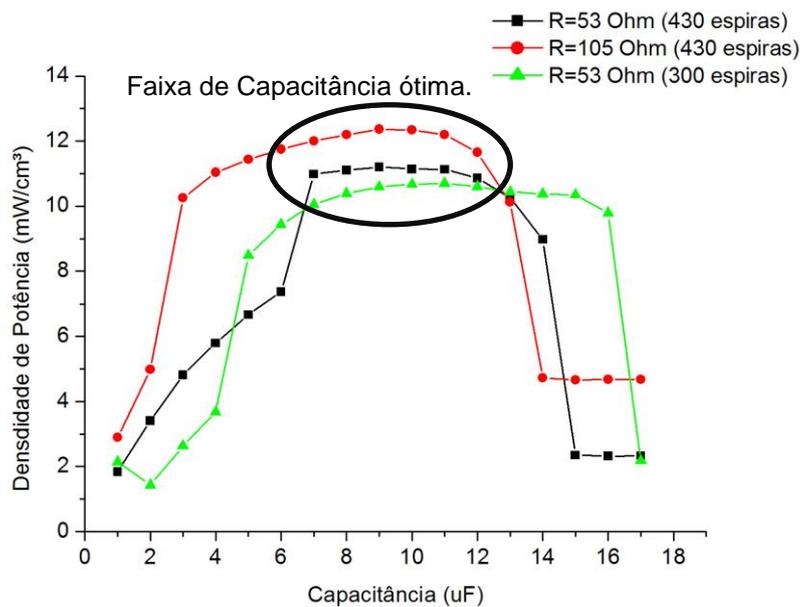
GRÁFICO 4.4 – CORRENTE NO PRIMÁRIO IP X CAPACITÂNCIA.



FONTE: DA AUTORA.

De acordo com os resultados, pode-se afirmar que o capacitor ótimo depende da corrente no primário, e não apenas da carga ou de parâmetros físicos do transdutor. Um exemplo prático disso está representado no Gráfico 4.5, em que foram utilizados dois transdutores com características físicas diferentes, o visto na Figura 3.5 e o visto na Figura 4.1. Além de cargas diferentes também, 53 Ω e 105 Ω .

GRÁFICO 4.5 – CAPACITÂNCIA X DENSIDADE DE POTÊNCIA.



FONTE: DA AUTORA.

Quando submetidos a corrente fixa no primário $I_p = 5$ A, a faixa de capacitância ótima se mantém a mesma para as três situações:

- O Transdutor da Figura 3.5, com uma carga ligada na saída de 53 Ω com 430 espiras;
- O Transdutor da Figura 3.5, com uma carga ligada na saída de 105 Ω com 430 espiras;
- O Transdutor da Figura 4.1 com uma carga ligada na saída de 53 Ω com 300 espiras;

Embora as características como cargas, números de espiras e volume sejam relativamente próximas, existem propriedades bem diferentes como o material e a permeabilidade. Mesmo assim, a faixa de capacitância ótima se mantém a mesma para todos os três casos.

5 CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

A demanda por aplicações de sistemas energeticamente autônomos é crescente, principalmente, em Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). No entanto, estas ainda contam com uma importante limitação que é a fonte de energia. Algumas tecnologias buscam suprir esta limitação, entre elas se destaca a colheita de energia, processo em que se utiliza da energia “desperdiçada” no ambiente para gerar energia elétrica para alimentar dispositivos de ultrabaixo consumo. Dentre as diversas fontes de colheita, neste trabalho, foi estudada a colheita de energia por indução magnética (CEIM), a qual pode ser considerada como uma alternativa viável para alimentar, por exemplo, nós sensores instalados em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

A CEIM ‘aproveita’ o campo magnético gerado em torno das linhas destas redes, e, através de um transdutor eletromagnético, baseado na estrutura do transformador de corrente, capta e converte a energia magnética em energia elétrica. Nesta pesquisa foi selecionada a liga Nanocristalina FeSiB como material do núcleo, devido ao seu bom desempenho na colheita do campo magnético.

A tensão induzida alternada foi ligada a um circuito de condicionamento que retificou, filtrou e regulou o nível de tensão, obtendo como resultado uma potência de $P = 228,5 \text{ mW}$ para alimentar uma carga resistiva de, aproximadamente, 100Ω . Sendo que esta potência pode variar de acordo com a carga, apenas a tensão regulada é fixa em 5 V .

Durante a pesquisa também foi estudado um método para otimizar o rendimento do transdutor. Trata-se de um compensador capacitivo ligado em série com a bobina secundária para compensar a reatância indutiva da mesma, a fim de tornar a impedância da bobina puramente resistiva, para uma possível transferência máxima de potência, a ser validada em trabalhos futuros. Os testes comprovaram que realmente existem valores de capacitância que permitem a disponibilidade de maior potência para diferentes cargas. Demonstrou-se ainda que, o capacitor ótimo depende praticamente, da variação na corrente primária, ou seja, as dimensões do transdutor, o número de espiras e a carga RI , exercem pouca influência. Diante destes resultados podemos dizer que para determinadas características de

transdutores é possível utilizar um capacitor ou uma faixa de capacitância a fim de aumentar o desempenho da fonte (transdutor).

Outra técnica proposta e utilizada neste trabalho, foi divisão da bobina secundária em pelo menos dois enrolamentos e ambos ligados em paralelo, para reduzir a indutância e por conseguinte os picos de tensão induzida observados durante os experimentos. Obteve-se resultados positivos, pois, os elevados picos de tensão tiveram sua magnitude reduzida sem interferir fortemente na tensão eficaz. Por isso, pode-se dizer que a técnica foi bem sucedida e pode ser aplicada em outros transdutores que apresentem o mesmo problema.

Por fim, obteve-se um protótipo operacional de um sistema eletrônico energeticamente autônomo que utiliza a colheita de energia por indução magnética para alimentar dois nós nRF24LE1 sem fio da *Nordic Semiconductores*, que se comunicam por rádio frequência, com uma potência consumida de 179 *mW*. Embora a fonte desenvolvida com núcleo da liga nanocristalina disponibilize uma potência maior, em torno de 245 *mW*.

6 TRABALHOS PUBLICADOS

1. **SANTOS, M. P.**; VIEIRA, D. A.; RODRIGUEZ, Y. P. M.; MORAIS JR., T. O.; SOUZA, C. P.; FREIRE, R. C. S. *Energy Harvesting using magnetic induction considering different core materials*. I2MTC. Montevideo, 2014. p. 942-944.
2. VIEIRA, D. A.; **SANTOS, M. P.**; LIMA, D. S. G.; Rodriguez, Y. P. M; SOUZA, C. P.; MORAES JUNIOR, T. O. *Energy harvesting for magnetic dispersion: toroidal core study of iron powder obtained by milling*. In: 6th International Conference on Electroceramics (ICE 2013), 2013, João Pessoa.
3. JÚNIOR, T. O. M.; RODRIGUEZ, Y. P. M.; MELO, E. C. S.; **SANTOS, M. P.**; SOUZA, C. P. *Energy Harvesting Based on Magnetic Dispersion for Three-Phase Power System*. *Energy and Power Engineering*, v. 05, p. 20-23, 2013. doi:10.4236/epe.2013.53B005.

7 TEMA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como tema para trabalhos futuros algumas linhas são propostas:

- Modelagem matemática do transdutor eletromagnético, para facilitar o projeto do transdutor eletromagnético, e conseqüentemente do circuito de condicionamento;
- Projeto de 'banco de capacitores ótimo' para o compensador capacitivo genérico, numa ampla variação na corrente do primário;
- Projeto de um circuito para o gerenciamento da energia;
- Testar outros materiais para o núcleo do transdutor;

REFERÊNCIAS

AHOLA, J. *et al.* **Design considerations for current transformer based energy harvesting for electronics attached to electric motor.** International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM. June 2008. p. 901-905.

AMARO, J. P. *et al.* **Energy harvesting for Zigbee compliant Wireless Sensor Network nodes.** IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: [s.n.]. Oct 2012. p. 2583-2588.

BATISTA, T. C. **Transformador de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina para Medição.** Campina Grande, PB: Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

BATISTELA, N. J. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao Silício.** Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Tese, 2001.

BEEBY, S.; WHITE, N. **Energy harvesting for autonomous systems.** [S.l.]: Artech House, 2010.

BHUIYAN, R. H.; DOUGAL, R. A.; ALI, M. **A miniature energy harvesting device for wireless sensor in electric power system.** Sensor Journal IEEE, 10, July 2010. 4441-4444.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** 6ª. ed. [S.l.]: LTC, 1998.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism.** [S.l.]: Wiley-IEEE Press , 1993.

CALLIESTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma introdução.** LTC, 1991.

CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaio.** 4. ed. São Paulo - SP: Érica, 2011.

DEWAN, A. *et al.* **Alternative power sources for remote sensors: A review.** Journal of Power Sources, n. 245, p. 129-143, 2014.

EIJ. Glossary: Energy harvesting. **Energy Harvesting Journal.** Disponível em: <<http://www.energyharvestingjournal.com/glossary/energy-harvesting-332.asp>>. Acesso em: 20 Novembro 2014.

FARIA, N.; LIMA, F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais.** 1. ed. São paulo: Livraria da Física, 2005.

- HERZER, G. **Amorphous and nanocrystalline soft magnets**. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Magnetic Hysteresis in Novel Materials, Mykonos, Greece, July 1996. 711-730.
- HOOFF, C. V. **Micro-Power Generation using thermal and vibrational energy scavengers**. IEEE Int. Solid-State Circ. [S.l.]: [s.n.]. 2008.
- KANSAL, A. *et al.* **Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks**. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, v. 6, September 2007.
- LORRAIN, P.; CORSON, D. R.; LORRAIN, F. **Electromagnetic Fields and Waves**. Third. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1988.
- LOUREIRO, A. *et al.* **Redes de sensores sem fio**. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais.
- MAXWELL, J. C. **A treatise on Electricity and Magnetism**. [S.l.]: University of Oxford., v. Vol. I, 1873.
- MO, C.; DAVIDSON, J. **Energy Harvesting Technologies for Structural Health monitoring applications**. 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2013. p. 192-198.
- MOON, J. *et al.* **VAMPIRE: A Magnetically Self-powered Sensor Node Capable of Wireless Transmission**. IEEE. Cambridge, MA-USA: Massachusetts Institute of Technology. 2013. p. 3151-3159.
- MORAES JR., T. O. **Sistema de Captação de Energia (Energy Harvesting) por dispenção magnetica em linha de potência**. 2013. Dissertação de Mestrado. UFPB-João Pessoa.
- NORDIC. **nRF24LE1 Ultra-low Power Wireless System On-Chip Solution**. Datasheet, August 2010.
- OATLEY, C. **Electric and magnetic fields**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1976.
- PEREIRA, M. R.; AMORIM, P. C. **Tutorial sobre redes de sensores**. [S.l.]: [s.n.], 2007. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- ROSCOE, N. M.; JUDD, M. D. **Harvesting Energy From Magnetic Fields to Power Condition Monitoring Sensors**. Sensors Journal, IEEE, v. 13, n. 6, p. 2263-2270, June 2013. ISSN 1530-437X.
- ROSCOE, N. M.; JUDD, M. D.; FITCH, J. **Development of magnetic induction energy harvesting for condition monitoring**. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009. Proceedings of the 44th International. Sept 2009. p. 1-5.
- SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

- SÁEZ, M. L. M. **Energy Harvesting from Passive Human Power**. Electronic Engineering. [S.l.]. 2004. (PhD Thesis Project).
- SANTOS, M. P. *et al.* **Energy Harvesting using magnetic induction considering different core materials**. I2MTC. Montevideo, Uy: [s.n.]. 2014. p. 942-944.
- SORDIASHIE, E. **Electromagnetic harvesting to power energy management sensors in the built environment**. Dissertação de Mestrado. ed. Nebraska: [s.n.], 2012.
- SPALDIN, N. A. **Magnetic Materials: Fundamentals and Applications**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. **Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications**. IEEE Communications surveys & tutorials, v. 13, p. 443-461, 2011.
- SUN, C. *et al.* **PVDF microbelts for harvesting energy from respiration**. Energy & Environmental Science, v. 1, September 2011.
- TAITHONGHAI, T.; LEELARASMEE, E. **Adaptative electromagnetic energy harvesting circuit for wireless sensor application**. Electrical Enginnering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. [S.l.], p. 278-281. 2009.
- TARTAGNI, M. **Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems**. CATRENE Working Group on Energy Autonomous Systems. [S.l.], p. 84. 2009.
- TASHIRO, K. *et al.* **Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 47, n. 10, p. 4441-4444, Oct 2011. ISSN: 0018-9464.
- ULABY, F. T.; MICHIELSSEN, E.; RAVAIOLI, U. **Fundamentals of Applied Electromagnetics**. 6^a. ed. [S.l.]: Pearson, 1994.
- VULLERS, R. J. M. *et al.* **Micropower energy harvesting**. Solid-State Electronics, p. 684-693, 2009.
- WALTENEGUS, D.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice**. [S.l.]: Willey, 2010.
- WANG, Z. *et al.* **An enhanced energy harvesting method based on resonant current transformer for high voltage AC cable monitoring equipment**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE. March 2014. p. 3455-3459.
- WINDERS JR., J. J. **Power Transformers: Principles and Applications**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.

WU, Z.; WEN, Y.; LI, P. **A Power Supply of Self-Powered Online Monitoring Systems for Power Cords**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 28, December 2013.

YICK,; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. **Wireless sensor network survey**. Computer Networks, v. 52, p. 2292-2330, August 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - DADOS OBTIDOS PARA TRANSDUTORES COM CARACTERÍSTICAS DIFERENTES

Nanocristalino										
Carga (Ω)	Tensão				Corrente				Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]
	Med_1 (V)	Med_2 (V)	Med_3 (V)	Média (V)	Med_1 (A)	Med_2 (A)	Med_3 (A)	Média (A)		
1	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,026	0,026	0,711	0,618
2	0,053	0,052	0,052	0,052	0,026	0,026	0,026	0,026	1,385	1,204
3	0,079	0,078	0,079	0,079	0,027	0,026	0,026	0,026	2,072	1,802
4	0,106	0,105	0,105	0,105	0,027	0,026	0,026	0,026	2,763	2,403
5	0,132	0,131	0,130	0,131	0,026	0,026	0,026	0,026	3,432	2,985
6	0,158	0,157	0,154	0,156	0,026	0,026	0,026	0,026	4,091	3,557
7	0,184	0,183	0,180	0,182	0,026	0,026	0,026	0,026	4,759	4,138
8	0,210	0,209	0,207	0,208	0,026	0,026	0,026	0,026	5,430	4,721
9	0,236	0,235	0,233	0,235	0,026	0,026	0,026	0,026	6,113	5,316
10	0,260	0,261	0,257	0,259	0,026	0,026	0,026	0,026	6,731	5,853
11	0,287	0,286	0,282	0,285	0,026	0,026	0,026	0,026	7,388	6,424
12	0,312	0,311	0,308	0,310	0,026	0,026	0,026	0,026	8,000	6,957
13	0,335	0,334	0,330	0,333	0,026	0,026	0,025	0,026	8,518	7,407
14	0,353	0,352	0,348	0,351	0,025	0,025	0,025	0,025	8,815	7,665
15	0,369	0,368	0,364	0,367	0,025	0,025	0,024	0,024	8,983	7,811
16	0,382	0,382	0,379	0,381	0,024	0,024	0,024	0,024	9,069	7,886
17	0,396	0,394	0,392	0,394	0,023	0,023	0,023	0,023	9,127	7,936
18	0,409	0,406	0,404	0,407	0,023	0,023	0,022	0,023	9,172	7,975
19	0,421	0,417	0,415	0,418	0,022	0,022	0,022	0,022	9,178	7,981
20	0,432	0,428	0,427	0,429	0,022	0,021	0,021	0,021	9,191	7,992
21	0,442	0,439	0,437	0,439	0,021	0,021	0,021	0,021	9,168	7,972
22	0,452	0,449	0,445	0,449	0,020	0,020	0,020	0,020	9,131	7,940
23	0,460	0,457	0,454	0,457	0,020	0,020	0,020	0,020	9,069	7,886
24	0,468	0,466	0,463	0,466	0,019	0,019	0,019	0,019	9,021	7,845
25	0,476	0,474	0,471	0,474	0,019	0,019	0,019	0,019	8,963	7,794
26	0,484	0,481	0,479	0,481	0,019	0,018	0,018	0,018	8,897	7,737
27	0,492	0,490	0,487	0,489	0,018	0,018	0,018	0,018	8,854	7,699
28	0,499	0,497	0,495	0,497	0,018	0,018	0,018	0,018	8,818	7,667
29	0,503	0,504	0,502	0,503	0,017	0,017	0,017	0,017	8,728	7,590
30	0,511	0,511	0,509	0,510	0,017	0,017	0,017	0,017	8,669	7,538

Med_ Medição

V Volts

A Ampère

Ferrita										
Carga Ω	Tensão (V)				Corrente (A)				Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]
	Med1 (V)	Med2 (V)	Med3 (V)	Média (V)	Med1 (A)	Med2 (A)	Med3 (A)	Média (A)		
1	0,043	0,043	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	1,790	0,211
2	0,083	0,083	0,082	0,083	0,041	0,042	0,041	0,041	3,422	0,403
3	0,122	0,122	0,121	0,122	0,041	0,041	0,040	0,041	4,938	0,581
4	0,160	0,160	0,158	0,160	0,040	0,040	0,040	0,040	6,350	0,747
5	0,197	0,193	0,194	0,194	0,039	0,038	0,039	0,039	7,555	0,889
6	0,232	0,226	0,227	0,229	0,039	0,038	0,038	0,038	8,694	1,023
7	0,265	0,258	0,260	0,261	0,038	0,037	0,037	0,037	9,727	1,144
8	0,297	0,289	0,291	0,292	0,037	0,036	0,036	0,037	10,650	1,253
9	0,326	0,325	0,323	0,325	0,036	0,036	0,036	0,036	11,715	1,378
10	0,355	0,354	0,352	0,354	0,035	0,035	0,035	0,035	12,481	1,468
11	0,382	0,380	0,376	0,379	0,035	0,035	0,034	0,035	13,069	1,538
12	0,407	0,406	0,401	0,405	0,034	0,034	0,033	0,034	13,624	1,603
13	0,433	0,424	0,425	0,427	0,033	0,033	0,033	0,033	14,030	1,651
14	0,455	0,447	0,448	0,450	0,032	0,032	0,032	0,032	14,438	1,699
15	0,478	0,467	0,469	0,471	0,032	0,031	0,031	0,031	14,818	1,743
16	0,499	0,487	0,491	0,492	0,031	0,031	0,031	0,031	15,145	1,782
17	0,516	0,509	0,510	0,512	0,030	0,030	0,030	0,030	15,406	1,813
18	0,530	0,532	0,528	0,530	0,029	0,029	0,029	0,029	15,575	1,832
19	0,549	0,549	0,546	0,548	0,029	0,029	0,029	0,029	15,777	1,856
20	0,561	0,566	0,560	0,562	0,028	0,028	0,028	0,028	15,838	1,863
21	0,579	0,581	0,576	0,579	0,027	0,028	0,027	0,028	15,899	1,870
22	0,590	0,594	0,593	0,593	0,027	0,027	0,027	0,027	15,922	1,873
23	0,604	0,608	0,608	0,607	0,026	0,026	0,026	0,026	15,974	1,879
24	0,620	0,618	0,623	0,620	0,026	0,026	0,026	0,026	15,975	1,879
25	0,614	0,632	0,635	0,627	0,025	0,025	0,025	0,025	15,836	1,863
26	0,643	0,644	0,653	0,646	0,025	0,025	0,025	0,025	15,973	1,879
27	0,653	0,654	0,664	0,657	0,024	0,024	0,025	0,024	15,972	1,879
28	0,665	0,666	0,673	0,668	0,024	0,024	0,024	0,024	15,908	1,872
29	0,680	0,676	0,683	0,680	0,023	0,023	0,023	0,023	15,903	1,871
30	0,690	0,686	0,694	0,690	0,023	0,023	0,023	0,023	15,793	1,858

APÊNDICE 2 - DADOS OBTIDOS PARA TRANSDUTORES COM NÚMEROS DE ESPIRAS IGUAIS

$I_p = 5$ A, $N=430$ espiras.

Ferrita					Liga Nanocristalina			
Carga Ω	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]
1	0,014	0,013	0,181	0,017	0,014	0,012	0,160	0,046
10	0,126	0,013	1,579	0,145	0,116	0,012	1,354	0,392
20	0,248	0,013	3,117	0,286	0,233	0,012	2,712	0,786
30	0,373	0,012	4,619	0,424	0,350	0,012	4,083	1,184
40	0,497	0,012	6,152	0,564	0,466	0,012	5,418	1,571
50	0,620	0,012	7,663	0,703	0,583	0,012	6,774	1,964
60	0,741	0,012	9,109	0,836	0,697	0,012	8,110	2,351
70	0,861	0,012	10,578	0,970	0,815	0,012	9,467	2,744
80	0,985	0,012	12,118	1,112	0,930	0,012	10,765	3,120
90	1,102	0,012	13,533	1,242	1,045	0,012	12,114	3,511
100	1,223	0,012	14,933	1,370	1,160	0,012	13,433	3,894
200	2,335	0,012	27,203	2,496	2,290	0,012	26,518	7,686
300	3,223	0,011	34,647	3,179	3,370	0,011	37,778	10,950
400	3,840	0,010	36,749	3,371	3,960	0,010	38,848	11,260
500	4,220	0,008	35,490	3,256	4,330	0,009	37,411	10,844
600	4,300	0,007	30,702	2,817	4,624	0,008	35,512	10,293
700	4,480	0,006	28,582	2,622	4,877	0,007	33,846	9,811
800	4,600	0,006	26,496	2,431	5,080	0,006	32,156	9,321
900	4,710	0,005	24,586	2,256	5,270	0,006	30,724	8,906
1000	4,800	0,005	23,040	2,114	5,430	0,005	29,431	8,531

APÊNDICE 3 - DADOS OBTIDOS PARA CORRENTE $I_p=15A$ E TRANSDUTORES COM NÚMEROS DE ESPIRAS IGUAIS

Ferrita para $I_p=15 A$ N=430 espiras

Carga Ω	Média - Tensão [V]	Média - Corrente [A]	Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]
1	0,105	0,094	9,832	0,902
10	0,384	0,048	18,420	1,690
20	0,497	0,042	21,053	1,931
30	0,650	0,042	27,511	2,524
40	0,795	0,039	30,770	2,823
50	0,948	0,037	34,998	3,211
60	1,080	0,035	38,167	3,502
70	2,360	0,034	79,980	7,338
80	2,600	0,033	84,682	7,769
90	2,780	0,031	87,014	7,983
100	2,980	0,030	89,638	8,224
200	4,250	0,021	90,185	8,274
300	5,040	0,017	84,319	7,736
400	5,630	0,014	78,989	7,247
500	6,120	0,012	74,664	6,850

Nanocristalino $I_p=15 A$ N=430 espiras

Carga Ω	Média - Tensão [V]	Média - Corrente [A]	Potência [mW]	Densidade [mW/cm ³]
1	0,064	0,051	3,263	0,946
10	0,259	0,031	7,995	2,317
20	0,318	0,024	7,651	2,218
30	0,384	0,023	8,678	2,515
40	0,468	0,022	10,313	2,989
50	0,559	0,022	12,040	3,490
60	0,654	0,021	13,802	4,000
70	0,748	0,021	15,461	4,481
80	0,836	0,020	16,969	4,918
90	0,930	0,020	18,429	5,342
100	1,013	0,020	19,824	5,746
200	3,160	0,016	52,045	15,086
300	4,080	0,014	56,671	16,426
400	4,760	0,012	56,739	16,446
500	5,240	0,010	54,863	15,902

APÊNDICE 4 - DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM O COMPENSADOR CAPACITIVO

Capac . uF	Ip=5A			Ip=10A			Ip=20A			Ip=30A			Ip=40A			Ip=50A		
	Vc	Ic - A	pot- mW	Vc	Ic - A	Pot- mW	Vc	Ic - A	pot- mW	Vc	Ic - A	pot- mW	Vc	Ic - A	pot- mW	Vc	Ic - A	pot- mW
1	0,74	0,01	10,5	1,76	0,02	32,2	2,17	0,02	48,6	2,48	0,03	64,88	2,71	0,03	78,2	2,91	0,03	91,31
5	2,04	0,02	41,62	2,75	0,03	75,4	3,36	0,03	112,6	3,87	0,04	148,7	4,27	0,04	181,6	4,58	0,05	209,2
10	2,03	0,02	40,86	2,76	0,03	76,1	3,63	0,04	131,7	4,16	0,04	172,8	4,54	0,05	205,4	4,89	0,05	238,7
14,8	1,24	0,01	15,35	2,97	0,03	87,8	3,89	0,04	151,2	4,44	0,04	196,4	4,82	0,05	231,4	5,16	0,05	266,2
20,02	1,32	0,01	17,33	3,02	0,03	90,7	4	0,04	159,7	4,54	0,05	205,5	5	0,05	249,9	5,3	0,05	280,5
24,67	1,34	0,01	17,89	3,14	0,03	98,8	4,08	0,04	166,4	4,67	0,05	217,2	5,06	0,05	256,1	5,42	0,05	293,2
29,46	1,28	0,01	16,31	2,93	0,03	85,5	4,08	0,04	166,1	4,68	0,05	218,2	5,13	0,05	262,9	5,44	0,05	295,7
34,56	1,32	0,01	17,46	3,01	0,03	90,4	4,11	0,04	168,8	4,69	0,05	220,1	5,17	0,05	266,9	5,5	0,05	302
39,2	1,4	0,01	19,46	2,92	0,03	84,8	4,15	0,04	172,1	4,76	0,05	226,6	5,19	0,05	269,4	5,51	0,06	303,5
50,7	1,33	0,01	17,68	2,61	0,03	68,1	4,14	0,04	171,5	4,77	0,05	227,5	5,23	0,05	273,5	5,55	0,06	307,8
58,6	1,29	0,01	16,55	2,48	0,02	61,5	4,07	0,04	165	4,71	0,05	221,4	5,18	0,05	267,7	5,52	0,06	304,9
61,02	1,3	0,01	16,81	2,55	0,03	65	4,2	0,04	175,7	4,84	0,05	234,3	5,26	0,05	276,5	5,58	0,06	311,1
62,03	1,28	0,01	16,44	2,48	0,02	61,6	4,09	0,04	167	4,71	0,05	221,7	5,17	0,05	267,1	5,52	0,06	304,5
70,06	1,29	0,01	16,59	2,6	0,03	67,3	4,10	0,04	167,9	4,75	0,05	225,6	5,22	0,05	272	5,56	0,06	308,7
74,8	1,36	0,01	18,48	2,6	0,03	67,3	4,18	0,04	174,1	4,84	0,05	233,8	5,28	0,05	278	5,64	0,06	317,2
79,61	1,37	0,01	18,54	2,77	0,03	76,3	4,16	0,04	173	4,82	0,05	231,4	5,28	0,05	278,5	5,64	0,06	317,5
84,34	1,36	0,01	18,37	2,66	0,03	70,7	4,16	0,04	173,1	4,82	0,05	231,8	5,28	0,05	278,3	5,64	0,06	317,6
88,42	1,36	0,01	18,37	2,65	0,03	69,9	4,17	0,04	172,4	4,81	0,05	231	5,26	0,05	276,3	5,62	0,06	316
92,44	1,34	0,01	17,8	2,56	0,03	65,5	4,16	0,04	172,4	4,82	0,05	231,8	5,28	0,05	278,4	5,64	0,06	317,2
98,56	1,36	0,01	18,48	2,66	0,03	71,6	4,17	0,04	173,7	4,8	0,05	230,3	5,26	0,05	276,2	5,62	0,06	315,3
100,2	1,29	0,01	16,64	2,57	0,03	66,2	4,05	0,04	163,9	4,67	0,05	218,1	5,11	0,05	260,9	5,5	0,05	302,3
124,5	1,28	0,01	16,38	2,88	0,03	82,8	4,00	0,04	161,6	4,6	0,05	215,9	5,1	0,05	259,6	5,45	0,05	296,6