

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

ADOLFO STEINER DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE HARVESTING DE ENERGIA
ELETROMAGNÉTICA

Joinville
2020

ADOLFO STEINER DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE HARVESTING DE ENERGIA
ELETROMAGNÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador(a): Prof. Dr. Diego Santos Greff

Joinville
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Renato e Regina, e irmãs, Júlia e Renata, por sempre me incentivarem a buscar meus objetivos e terem me auxiliado em toda minha caminhada, pelos momentos de felicidade na união da família.

À minha namorada, Natasha, que me ajudou a passar por todos os desafios e conflitos e que comemorou comigo todas as conquistas.

Ao meu orientador, Diego, que se tornou também um amigo, conselheiro e mentor dentro e fora da universidade.

Aos meus professores de toda a caminhada escolar, principalmente aos da graduação que me entregaram ao longo de minha trajetória seu bem mais valioso: o conhecimento. Ao Laboratório de Integração de Software/Hardware e ao Grupo de Energias Renováveis pela oportunidade de aplicação dos conhecimentos adquiridos e incentivo ao desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Por fim, agradeço à todos os amigos que participaram desta caminhada, dividindo as angústias, virando as noites estudando e trazendo muita alegria e descontração em todos os momentos.

Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.

— Nikola Tesla

RESUMO

Utilizando sistemas embarcados acoplados a máquinas, rapidamente obtêm-se a digitalização dos estados do equipamento. Porém, com o crescente uso de sistemas embarcados e sem fio, a produção e aplicação de baterias vem crescendo e isso implica em grande quantidade de material despendido e um acréscimo no custo de produtos além de uma manutenção constante para troca ou recarga destas baterias. A possibilidade de alimentação destes dispositivos através do harvesting da energia do ambiente é mais sustentável e economicamente mais atraente. Entretanto, com as tecnologias existentes atualmente para captação da energia do ambiente ainda é difícil a obtenção de toda a energia necessária. Por isso é necessário a utilização de topologias variadas de circuitos elétricos que permitam controlar a potência energética absorvida, de forma que fique ideal para o uso nos componentes e dispositivos eletrônicos atuais. Neste trabalho apresenta-se a fundamentação teórica, o planejamento metodológico e os testes realizados durante o desenvolvimento de um sistema de harvesting de energia baseado em energia eletromagnética. Este sistema baseia-se na coleta da energia despendida pelo campo magnético gerado por um motor utilizando uma bobina, o tratamento da tensão gerada através de um circuito retificador de precisão e a manutenção da potência utilizando um circuito integrado dedicado. Com as tensões atingidas ao final do sistema, pode-se alimentar sistemas de Internet das Coisas baseados em microcontroladores, comumente alimentados com 3,3V.

Palavras-chave: Harvesting Eletromagnético. Motores. Retificador de Precisão. Internet das Coisas.

ABSTRACT

Using embedded systems attached into machines, we can quickly obtain the status of equipments digitaly. However, with the increasing use of embedded systems and wireless devices, batteries production and application has been growing and this implies a large amount of expended material and an addition in product cost besides a constant maintenance for substituting or recharging these batteries. The possibility of powering these devices using enviroment energy harvesting is more sustainable and economically more attractive. However, with the technologies currently available to collect enviroment energy, it is still difficult to obtain whole needed energy. That is why is necessary to use varied electric circuit topologies that allow to control the absorbed energetic power, so that it is usable in present components and electonic devices. This work presents the theoretical foundation, methodological planning and the tests performed during the development of an energy harvesting system based on electromagnetic energy. This system is based on the harvest of energy expended by the magnetic field generated by a motor using a coil, the treatment of the generated voltage through a precision rectifier circuit and the maintenance of power using a dedicated integrated circuit. With the voltages reached at the end of the system, it is possible to power Internet of Things systems based on microcontrollers, commonly powered with 3.3V.

Keywords: Electromagnetic Harvesting. Motors. Precision Rectifiers. Internet of Things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Harvester de Energia Clássico	12
Figura 2 – Modelagem da densidade de fluxo externo de um motor	15
Figura 3 – Organograma de classificação dos motores elétricos	16
Figura 4 – Número de dispositivos conectados	18
Figura 5 – Ponte Retificadora	20
Figura 6 – Retificador Ativo	21
Figura 7 – Topologia do conversor Buck	22
Figura 8 – Topologia do conversor Boost	22
Figura 9 – Topologia do conversor Forward	23
Figura 10 – Retificador ativo meia-onda melhorado	24
Figura 11 – Simulação de funcionamento de retificadores ativos: vin é a tensão de entrada, vout1 saída do retificador e vout2 saída do retificador ativo melhorado	24
Figura 12 – Simulador LT Spice	29
Figura 13 – Topologia do sistema desenvolvido	30
Figura 14 – Circuito de Manutenção	32
Figura 15 – Componentes utilizados	33
Figura 16 – Software EasyEDA	34
Figura 17 – Bancada de trabalho e motor utilizados	35
Figura 18 – Bobinas construídas	36
Figura 19 – Ponte RLC ajustada em medição a 1kHz	38
Figura 20 – Forma de onda obtida com bobina de 4cm de diâmetro	39
Figura 21 – Formas de onda obtidas com as bobinas (d), (e), (c) e (b)	39
Figura 22 – Esquemático e PCB do circuito de retificação	40
Figura 23 – Configuração de testes	41
Figura 24 – Teste comparativo dos retificadores	41
Figura 25 – Esquemático e PCB do circuito de retificação atualizado	42
Figura 26 – Resposta do circuito de manutenção com saída programada para 3.7V	43
Figura 27 – Resposta do circuito de manutenção com saída programada para 4.5V	43
Figura 28 – Simulação da saída do circuito de retificação conectado ao circuito de manutenção de energia	44
Figura 29 – Saída do circuito de retificação conectado ao circuito de manutenção de energia	45
Figura 30 – Resultado da integração do sistema de retificação e manutenção . .	46
Figura 31 – PCB do projeto completo - 100x70x20mm	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de energia e suas densidades de potência	19
Tabela 2 – Principais características de conversores de micropotência	26
Tabela 3 – Componentes do projeto e custos	33
Tabela 4 – Comparação entre bobinas testadas	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG	American Wire Gauge
BJT	Bipolar Junction Transistor
BOM	Bill of Materials
CI	Circuito Integrado
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
EH	Energy Harvesting
GREEN	Grupo de Energias Renováveis
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
MIT	Motor de Indução Trifásico
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
PCB	Printed Circuit Board
RF	Rádio Frequência
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ULP	Ultra Low Power

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Motores e Indução Eletromagnética	14
2.1.1	Indução Eletromagnética	14
2.1.2	Motores CA	16
2.2	Indústria 4.0 e o consumo de energia elétrica	17
2.3	Internet das Coisas Industrial	17
2.4	Harvesting e Transmissão de Energia Sem Fio	18
2.4.1	Harvesting de Energia	18
2.4.2	Transmissão de Energia Sem Fio	19
2.5	Processamento de Microenergia	20
2.5.1	Retificadores	20
2.5.2	Conversores CC-CC	21
2.6	Problemas no uso de retificadores e conversores	23
2.6.1	Requisitos do processamento de energia para Harvesting	25
2.7	Circuitos Integrados ULP	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Requisitos de Projeto	28
3.2	Softwares e simulações	28
3.3	Definição de arquitetura e componentes	29
3.3.1	Acoplamento magnético	30
3.3.2	Retificador	31
3.3.3	Manutenção de Energia	31
3.3.4	Módulo de IoT	31
3.3.5	Lista de componentes	32
3.4	Desenvolvimento da placa de circuito impresso	34
3.5	Aplicação de teste	34
4	TESTES E RESULTADOS	36
4.1	Acoplamento magnético	36
4.2	Retificadores	39
4.2.1	Retificador ativo	40

4.2.2	Retificador ativo melhorado	41
4.3	Sistema de Manutenção de Energia	42
4.3.1	Integração com retificador	44
4.4	Projeto final	46
4.4.1	Avaliação de consumo energético	47
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A	54

1 INTRODUÇÃO

A indústria se revoluciona constantemente. Kitain (2018) afirma que, com o ritmo rápido de crescimento tecnológico, não é fácil imaginar para onde a transformação digital está levando o setor de manufatura, mas uma boa maneira de fazer isso é olhar de perto o conceito de “Gêmeo Digital” dentro da Internet das Coisas industrial (IIoT).

Gêmeo Digital é uma representação virtual que espelha os atributos físicos de uma fábrica, planta, produto ou componente do “mundo real” em tempo real, através do uso de sensores, câmeras e outras técnicas de coleta de dados (KITAIN, 2018).

O uso de motores na indústria é responsável por aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica gerada no Brasil e são os grandes vilões do desperdício quando não funcionam adequadamente. Baseado nisso, sistemas de geração de informação em tempo real promovem o aumento da eficiência, reduzindo paradas indesejadas e alcançando um melhor controle sobre os recursos (WEG, 2019).

Boa parte dos dispositivos utilizados em Internet das Coisas são alimentados por baterias, e esses dispositivos funcionam continuamente por um período de tempo limitado. Trocar a bateria de dispositivos ou recarregá-la se torna impraticável a medida que a quantidade de dispositivos aumenta, devido ao alto custo de consertar e recondicionar estes aparatos (YILDIZ, 2009).

Mostra-se necessário então uma alternativa aos dispositivos alimentados por baterias. Neste contexto a técnica de “[...] harvesting de energia, ou escavação de energia, é um processo que captura pequenas quantidades de energia que de outro modo seriam perdidos na forma de calor, luz, som, vibração ou movimento.” (INSTITUTE OF PHYSICS, 2011).

Carli et al. (2015) apresentam que, na IoT do futuro, a maioria dos objetos terá conexão sem fio, levando a um grande número de dispositivos conectados. Esse alto número de dispositivos só é possível com o harvesting de energia do ambiente, já que a troca de baterias é impraticável para tantos dispositivos.

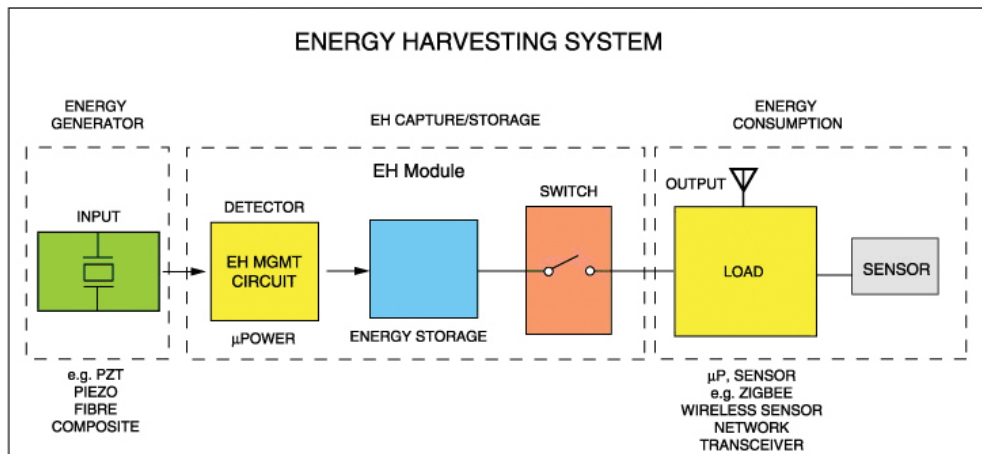
Leoni et al. (2018) afirmam que os melhores coletores de harvesting de energia conhecidos são grandes painéis solares e geradores eólicos, os quais se tornaram as melhores fontes de energia alternativa, mas pequenos aparelhos precisam de sistemas que podem capturar miliwatts de energia da luz, vibração, fontes térmicas e biológicas.

Rani e Sharma (2017) descrevem um sistema clássico de harvesting como sendo o conjunto de um gerador de energia, eletrônica de captura, armazenamento e manutenção desta energia e uma carga projetada para ser alimentada pelo harvester, que normalmente é uma rede de sensores sem fio. Este sistema é apresentado na Figura 1.

A maioria dos sistemas de harvesting fornece tensões muito abaixo do necessário para a alimentação da circuitaria típica de um nó de IoT.

Converter uma tensão tão baixa para uma tensão CC na faixa de 0,5-1,0 V [...] não é uma tarefa fácil. [...] porque para tensões fornecidas abaixo de 100mV é extremamente difícil gerar sinais oscilatórios e simultaneamente lidar com as perdas causadas pelo estágio de boost. (MACHADO et al., 2014, p. 1)

Figura 1 – Harvester de Energia Clássico



Fonte: Sunita e Shavet (2017)

O aumento recente de dispositivos alimentados por bateria e elementos de armazenamento de baixa tensão está aumentando a demanda por conversores Corrente Contínua – Corrente Contínua (CC-CC) eficientes para aplicações que requerem alto ganho, alta eficiência e redução de massa, volume e custo (PRUDENTE et al., 2008).

A metodologia deste trabalho engloba o desenvolvimento de um sistema de harvesting baseado na energia eletromagnética dispersa por um motor elétrico de indução de modo a possibilitar a alimentação de um módulo IIoT de instrumentação desse motor. A construção do sistema foi realizada no laboratório do Grupo de Energias Renováveis (GREEN) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) bem como os testes e aplicações com um motor.

1.1 OBJETIVO

Para a solução dos problemas na concepção de um sistema de harvesting de energia, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo de captação de energia eletromagnética e um circuito de tratamento de energia capturada de forma a retificar a tensão coletada

e prover alto ganho de modo a dispor a tensão necessária para alimentação de um sistema de IoT.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de captação e tratamento de energia eletromagnética;
- Propor uma aplicação de IoT que sirva como teste ao sistema desenvolvido;
- Avaliar a necessidade energética do circuito construído.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os temas necessários para realização dos objetivos propostos no capítulo anterior. Conceitos a respeito de motores e princípios de indução eletromagnética, os ganhos promovidos pela indústria 4.0 e a apresentação do mercado crescente de dispositivos de IoT serão mencionados aqui. Sistemas de harvesting para alimentação de nós IoT como alternativa às baterias, além da descrição das topologias de circuitos de processamento de energia também serão apresentados.

2.1 MOTORES E INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Motores elétricos são dispositivos que convertem continuamente energia elétrica em mecânica (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006). Os geradores fazem o papel inverso. Essa conversão é possível em grande parte através da utilização de materiais magnéticos e o comportamento desses materiais quando associados à um campo magnético.

Neste capítulo será apresentado o conceito de indução eletromagnética e sua interação no funcionamento de motores, bem como um breve resumo sobre máquinas elétricas de corrente alternada.

2.1.1 Indução Eletromagnética

A variação de um campo magnético no tempo produz um campo elétrico no espaço como é apresentado pela Lei de Faraday na Equação 1.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

A Equação 1 apresenta que a integral de linha da intensidade de campo elétrico \vec{E} ao longo de um contorno fechado C é igual a variação no tempo da densidade de fluxo magnético \vec{B} na região \vec{S} contornada por C . $d\vec{A}$ é um elemento infinitesimal de \vec{S} (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006).

Em enrolamentos de alta condutividade elétrica, pode-se mostrar que o campo \vec{E} no fio é extremamente baixo, podendo ser desprezado, de modo que o termo à esquerda da igualdade na Equação 1 pode ser reduzido ao negativo da tensão induzida e nos terminais do enrolamento. Além disso, no segundo termo da equação predomina o fluxo no núcleo ϕ . Como o enrolamento concatena o fluxo N vezes, encontra-se a Equação 2 (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006).

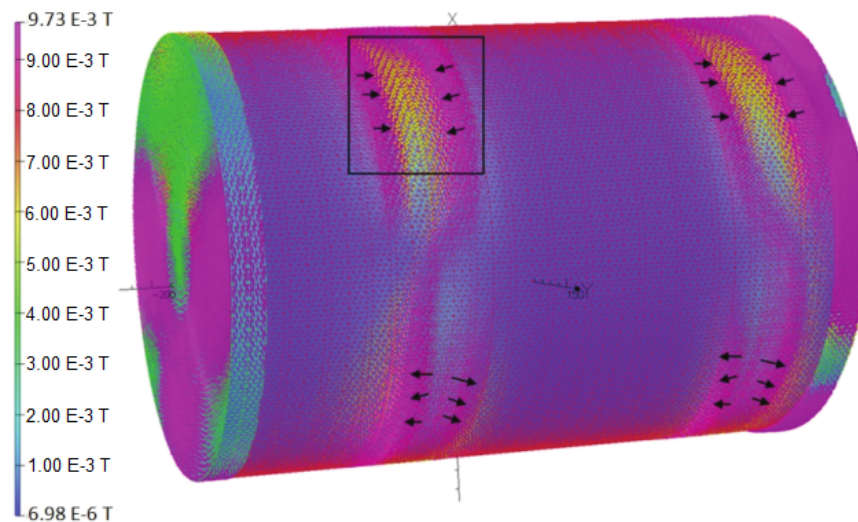
$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (2)$$

Esse princípio é a base de funcionamento de transformadores, um exemplo comum de circuitos acoplados magneticamente. O transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se uma tensão alternada for aplicada no enrolamento primário, será produzido um fluxo alternado que induzirá uma tensão no enrolamento secundário dependente do número de espiras do primário e do secundário (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006).

Como motores funcionam também através do princípio da indução eletromagnética, isso implica em um campo eletromagnético gerado em volta do motor em funcionamento. O fluxo externo em volta de uma máquina elétrica rotativa CA é resultante do fluxo do entreferro e do fluxo gerado pelo enrolamento do estator (LECOINTE et al., 2012).

Lecoïnte et al. apresentam a modelagem da densidade de fluxo externa de um motor de indução trifásico de 2 pares de polo, 7,5 kW, 400V considerando o motor sem carga. Essa modelagem é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Modelagem da densidade de fluxo externo de um motor



Fonte: Lecoïnte et al. (2012, p. 95)

A Figura 2 mostra que o fluxo magnético fica concentrado perto das extremidades dos enrolamentos. Isso se justifica pelo fato de que não existe ferro para canalizar o fluxo nessas regiões, ao contrário do centro da máquina (LECOINTE et al., 2012).

De acordo com o apresentado, é possível utilizar o fluxo externo de um motor para induzir tensão em um enrolamento próximo à carcaça do motor sem contato.

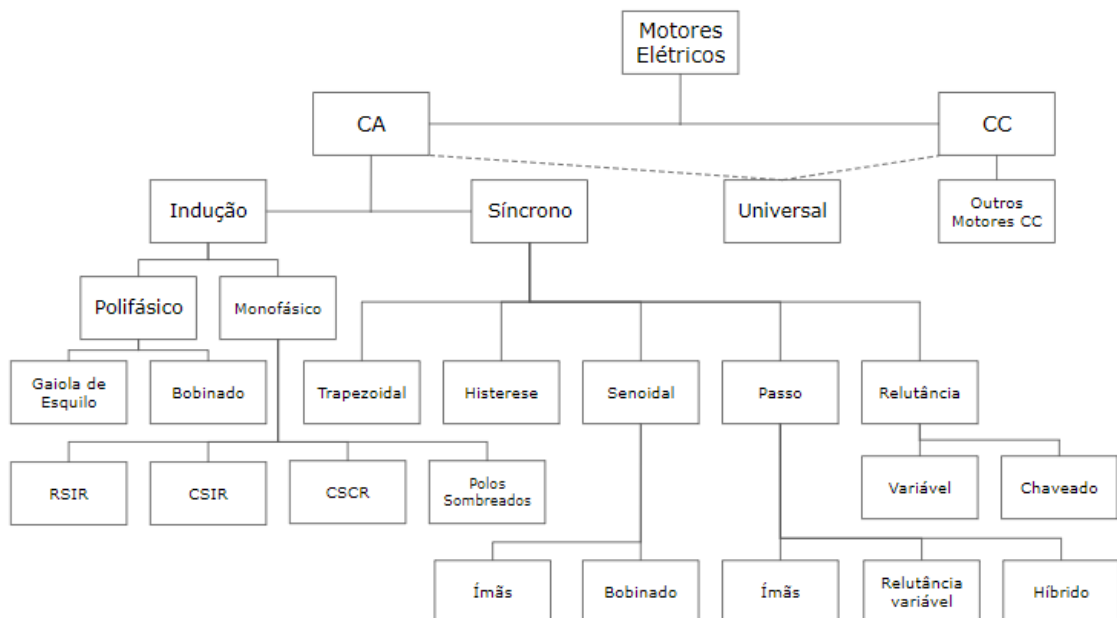
2.1.2 Motores CA

Os princípios que fundamentam o funcionamento das máquinas elétricas são comuns a máquinas CA e CC. No geral, existe um grupo de bobinas ou enrolamentos que interagem com o campo magnético produzido no motor e através do princípio da indução eletromagnética gera tensão. Essa interação se dá através da rotação de um elemento interno ao motor, chamado de rotor. A parte fixa que engloba o rotor é chamada estator (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006).

As máquinas CA se dividem em dois grupos: síncronas e de indução. A diferença entre os dois grupos se dá na forma em que a corrente é fornecida ao rotor: nas máquinas síncronas a corrente é fornecida através de contatos rotativos (rotor bobinado) e nas máquinas de indução a corrente é induzida através da combinação da variação, ao longo do tempo, da corrente no estator e do movimento do rotor em relação ao estator (FITZGERALD; KINGSLEY JR., 2006).

O organograma apresentado na Figura 3 apresenta uma classificação dos motores de acordo com seu funcionamento. Os motores podem ser separados de acordo com o tipo, formato e quantidade de ondas induzidas pelo movimento do rotor em relação ao estator.

Figura 3 – Organograma de classificação dos motores elétricos



Fonte: O Autor (2020)

Devido a transmissão da energia elétrica ser realizada utilizando corrente alternada para redução de perdas, o uso de motores CA é mais difundido, sendo os trifásicos mais comuns devido estes motores estarem menos sujeito a flutuação na transferência de potência da fonte para a carga e também por não necessitarem de um

circuito auxiliar para a partida (BOYLESTAD, 2011). No Brasil, 75% dos motores são motores de indução trifásicos (BULGARELLI, 2015).

2.2 INDÚSTRIA 4.0 E O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2020) apresenta Indústria 4.0 como sendo o conjunto de tecnologias que permitem a fusão do mundo físico, digital e biológico, dadas por: manufatura aditiva, inteligência artificial (IA), internet das coisas, biologia sintética e os sistemas ciber físicos (CPS).

A indústria no Brasil representa hoje menos de 10% do PIB e entre 2006 e 2016, teve sua produtividade reduzida em mais de 7% (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2020). Em contrapartida, a indústria consome 36% da energia gerada no país, segundo dados apresentados no Anuário Estatístico de Energia Elétrica, gerado pela Empresa de Pesquisa Energética (2019).

Segundo levantamentos, a revolução da indústria 4.0 no Brasil promoverá uma redução de R\$ 73 bilhões anuais nos custos industriais, sendo R\$ 35 bilhões em ganhos de eficiência, R\$ 31 bilhões em redução de custos de manutenção e R\$ 7 bilhões em economia de energia (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2020).

O alto consumo de energia das indústrias se dá devido à utilização de máquinas elétricas, em especial o motor de indução trifásico (MIT), que são responsáveis por inúmeras tarefas na indústria como: compressores, elevadores, bombas centrífugas, esteiras transportadoras, ventiladores, misturadores, agitadores, etc (WEG, 2018).

Os motores elétricos totalizam 68% do consumo de energia elétrica na indústria, totalizando quase 25% de todo o consumo (WEG, 2019). Devido ao constante condicionamento de motores antigos na indústria, o uso de motores ineficientes não diminui, causando um impacto significativo no consumo, contrapondo os constantes avanços da tecnologia que fazem os motores chegarem a rendimentos de mais de 90% (BULGARELLI, 2015). Através disso, compreende-se a importância do monitoramento de motores na indústria.

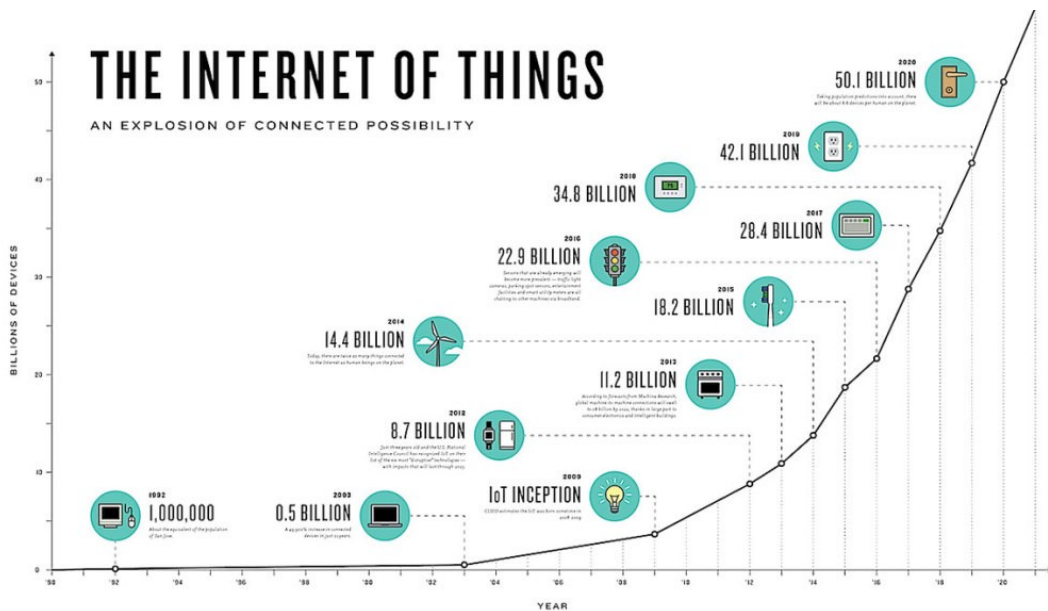
2.3 INTERNET DAS COISAS INDUSTRIAL

Garg e Garg (2017) descreve Internet das Coisas como sendo a conexão em rede de objetos do dia a dia. Esses objetos podem ser físicos ou virtuais e estão conectados sem fio através da internet. Seguindo essa definição podemos observar que estamos rodeados deste tipo de dispositivo: celulares, geladeiras, TVs, relógios, entre outros. Nas fábricas essa definição se estende a conexão das máquinas.

Baker (2017) mostra que a quantidade de dispositivos conectados a IoT em 2020 será de aproximadamente 50 bilhões como apresentado na Figura 4. Dispositivos

alimentados com baterias funcionam continuamente por um período de tempo limitado. Trocar a bateria de dispositivos ou recarregá-la considerando essa quantidade enorme de dispositivos se torna impraticável e até mesmo impossível (YILDIZ, 2009).

Figura 4 – Número de dispositivos conectados



Fonte: Baker (2017, online)

2.4 HARVESTING E TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

A instrumentação de motores elétricos na indústria mostra-se cada vez mais essencial, visto a influência das máquinas elétricas no consumo e funcionamento de fábricas e equipamentos. Os aparatos ideais para isso são nós de internet das coisas que possuem a facilidade de aplicação e mobilidade além de conectividade para integração de dados em rede.

Entretanto, o aumento no uso de dispositivos de IoT exige a busca de diferentes formas de alimentação de energia visando melhorar o desempenho e diminuir o impacto ambiental, uma vez que o uso de pilhas e baterias provoca grande dano ao meio-ambiente quando precisam ser descartados.

2.4.1 Harvesting de Energia

Uma vez que a demanda de fontes de energia para pequenas cargas cresce exponencialmente, só será possível ter tantos objetos conectados através do harvesting de energia (CARLI et al., 2015). Garg e Garg (2017) descrevem harvesting de energia (EH) como sendo o processo de obtenção de energia de uma ou mais fontes de energia, sendo essa fonte ambiental ou de algum outro tipo, acumulando e transformando essa

energia para energia elétrica utilizável.

EH é uma técnica muito atrativa para sistemas que necessitam de baixas quantidades de energia como sensores sem fio, implantes biomédicos, instrumentação embarcada à estrutura, entre outros (HARB, 2011). Aplicações mais comuns de EH são em dispositivos vestíveis, como relógios e pulseiras inteligentes além de aplicações de IoT em geral e em dispositivos médicos de baixa potência como mostram Delong, Chen e Volakis (2015).

Apresenta-se no Tabela 1 a densidade de potência de várias fontes energéticas comuns e de fontes de harvesting. É possível observar que as fontes de harvesting ainda não têm a mesma capacidade energética. Porém, para baixas potências não é necessária uma área muito grande e então as fontes de harvesting são mais competitivas.

Tabela 1 – Fontes de energia e suas densidades de potência

Fontes de Energia	Capacidade Energética
Variação de temperatura	$10 \mu W/cm^3$
RF do ambiente	$1 \mu W/cm^3$
Luz ambiente	$100 mW/cm^3$ (luz solar direta) $100 \mu W/cm^3$ (escritório iluminado)
Termoelétrica	$60 mW/cm^2$
Vibração (microgerador)	$4 \mu W/cm^3$ (movimento humano -Hz) $800 \mu W/cm^3$ (máquinas - kHz)
Vibração (piezoelétrico)	$200 \mu W/cm^3$
Fluxo de ar	$1 \mu W/cm^3$

Fonte: Yildiz (2009).

Um outro motivo para o uso de harvesting de energia é a substituição das pilhas e baterias. Segundo a Agência de Proteção Ambiental (Estados Unidos) (2009), nos Estados Unidos são descartados aproximadamente 3 bilhões de pilhas. Isso acarreta em grandes quantidades de lixo tóxico devido ao material das pilhas e alto custo de substituição para manter o funcionamento de todos os dispositivos que utilizam estas fontes de energia.

2.4.2 Transmissão de Energia Sem Fio

Devido à tendência de dispositivos eletrônicos portáteis eliminarem o uso de baterias, a transferência sem fio de energia através do acoplamento indutivo está se tornando comum (MATIAS; CUNHA; MARTINS, 2013).

Bhutada, Singh e Warty (2015) apresentam que sistemas de transmissão sem fio de potência são considerados uma alternativa sofisticada para transmissão de potência com fio nos dias de hoje. Entrega de energia sem fio baseado na ressonância é uma tecnologia eficiente para transmitir energia a distâncias relativamente longas

sendo comumente aplicados no dia-a-dia em carregadores de celular sem fio. Uma vez que motores elétricos já funcionam através da indução de energia sem fio, desenvolver um acoplamento para captação de parte dessa energia se torna viável.

As aplicações de transferência sem fio de energia estão crescendo rapidamente. Se faz necessário o desenvolvimento de retificadores eficientes para converter sinais de tensão CA para tensão CC para ser aplicado à carga. Na transferência sem fio de energia, a retificação é uma das partes mais importantes (TASNEEM; SURI; MAHBUB, 2018).

2.5 PROCESSAMENTO DE MICROENERGIA

A faixa de energia fornecida pelas fontes de EH vai de algumas unidades de μW até dezenas de mW nas aplicações mais comuns. Essa quantidade de energia se traduz em níveis de tensão e corrente extremamente baixos que não atingem os níveis necessários para alimentar circuitos eletrônicos.

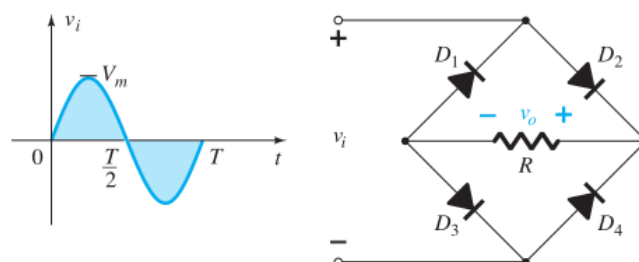
É preciso então, a utilização de circuitos aplicados em eletrônica de potência com modificações para pequenas potências, para que essa energia seja manipulada a níveis aproveitáveis.

2.5.1 Retificadores

Um retificador serve para transformar uma entrada CA em uma saída puramente CC, ou então em uma forma específica de onda de corrente ou tensão com uma componente CC especificada (HART, 2011).

Caso a fonte de EH gere tensão na forma alternada, é necessário o uso de um retificador de tensão para transformar em contínua. O circuito mais comumente empregado para realizar tal função é mostrado na Figura 5 com seus quatro diodos em uma configuração em ponte.

Figura 5 – Ponte Retificadora



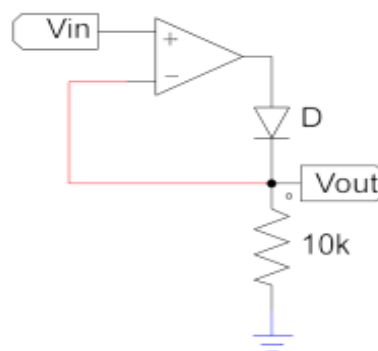
Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p. 66)

Durante o período que vai de $t = 0$ até $T/2$, a polaridade da tensão de entrada é positiva. Os diodos D_2 e D_3 estão conduzindo, enquanto D_1 e D_4 estão no estado

“desligado”. Para a região negativa da entrada, os diodos D_1 e D_4 estão conduzindo. Logo o sistema possui apenas valores de tensão positiva na saída (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Porém a retificação de sinais menores que a queda de tensão provocada pelo diodo durante sua condução não pode ser realizada apenas com a combinação de diodos e resistores. Nestes casos se faz uso de um amplificador operacional com um diodo na malha de realimentação no que fica conhecido como retificador ativo (HOROWITZ; HILL, 2017). A Figura 6 apresenta o circuito desse tipo de retificador.

Figura 6 – Retificador Ativo



Fonte: adaptado de Hill e Horowitz (2015, p. 238)

Enquanto que a ponte retificadora é um retificador de onda completa, ou seja, realiza a retificação do sinal durante a polarização direta e inversa da fonte de entrada, o retificador ativo, também conhecido como super diodo, retifica apenas durante a polarização direta da fonte. Existem retificadores ativos de onda completa, mas essa topologia não será abordada neste trabalho.

Embora retificadores transformem tensão alternada em tensão contínua, eles não alteram os níveis de tensão do circuito. Idealmente, a tensão na saída do circuito será uma fração do valor de pico da tensão de entrada.

2.5.2 Conversores CC-CC

Rashid (2014) descreve as funções dos conversores CC-CC como:

- converter um sinal CC de entrada V_s em um sinal CC de saída V_o ;
- regular a tensão de saída independente da carga e ondulação;
- reduzir a ondulação da tensão de saída a níveis abaixo dos requeridos;
- prover isolamento entre a fonte de entrada e a carga (nem sempre é necessário);
- proteger o sistema alimentado e a fonte de entrada de interferência

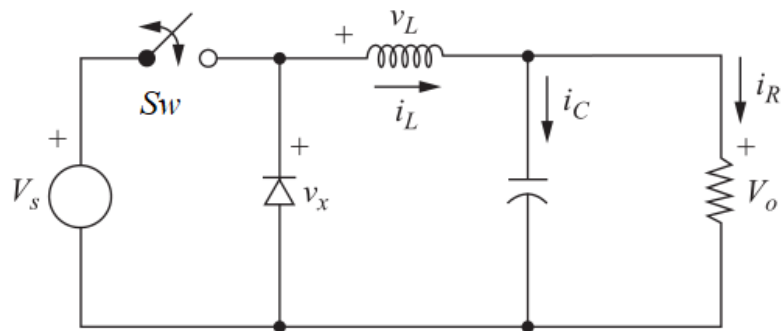
eletromagnética;

- satisfazer diversos padrões internacionais e nacionais de segurança.

Os conversores podem ser do tipo isolados ou não isolados. Os não isolados tem como seus modelos mais comuns o Buck, Boost, Buck-Boost e o Cuk. Já os isolados têm como topologias mais utilizadas o Flyback, Forward e Push-Pull.

A Figura 7 mostra um conversor chaveado do tipo Buck que serve para reduzir os níveis de tensão obtidos na entrada.

Figura 7 – Topologia do conversor Buck

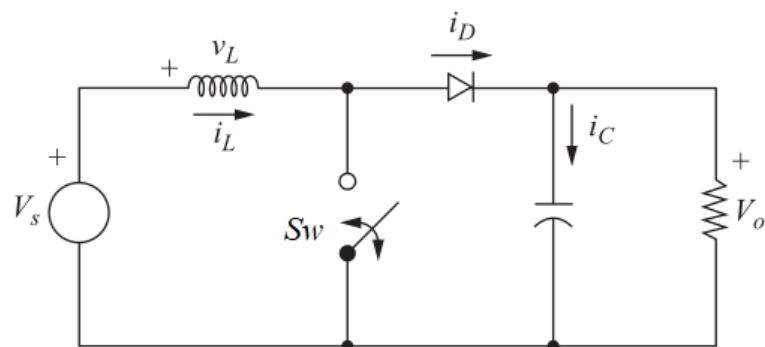


Fonte: Hart (2011, p. 199)

A partir da comutação de uma chave de potência (S_w), que pode ser um transistor de junção bipolar (BJT), um transistor de efeito de campo de óxido de metal semicondutor (MOSFET) ou um transistor bipolar de porta isolada (IGBT), estes circuitos conseguem controlar a quantidade de energia disponível na fonte de entrada que é repassada à saída em cada instante de tempo (HART, 2011).

Assim é possível reduzir o nível de tensão de entrada (Buck), aumentá-lo (Boost), ou modular a entrada à um valor constante independente de valores de entrada acima ou abaixo (Buck-Boost). Os conversores isolados fazem o mesmo que os chaveados, porém com isolamento do circuito de saída utilizando um transformador.

Figura 8 – Topologia do conversor Boost

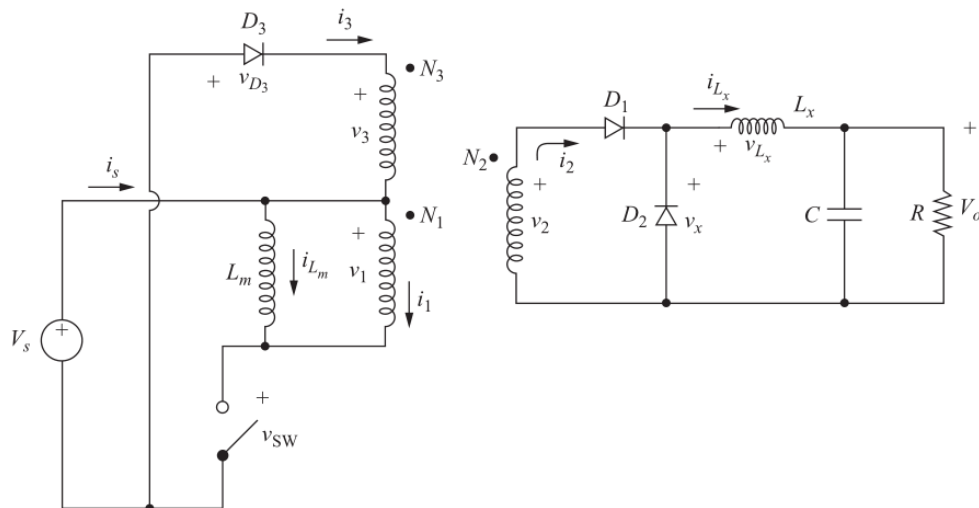


Fonte: Hart (2011, p. 212)

A Figura 8 mostra o conversor Boost, que consegue elevar os níveis de tensão da entrada através do indutor presente antes da chave.

Um exemplo de conversor isolado é apresentado na Figura 9. A topologia Forward seria a equivalente à topologia Boost, porém isolada.

Figura 9 – Topologia do conversor Forward



Fonte: Hart (2011, p. 278)

A utilização de diodos, chaves de potência, entre outros elementos fazem com que os conversores CC-CC possuam pequenas perdas. Porém, como esse tipo de circuito é mais utilizado para processamento de grandes quantidades de energia, as perdas são, em geral, desprezadas.

O ganho dos conversores depende sempre do tempo que a chave fica fechada em relação ao período de repetição do processo. Essa razão é conhecida como razão cíclica (D) e tem seu valor variando entre 0 e 1. Porém, nenhum conversor consegue trabalhar de forma eficiente para valores muito próximos dos extremos.

Em aplicações de harvesting o ganho necessário é muito alto. Se somente um conversor Boost for utilizado, D deve ter um valor muito alto, já que o ganho nesse conversor é representado pela Equação 3. V_o é a tensão na saída e V_s é a tensão de entrada do conversor.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (3)$$

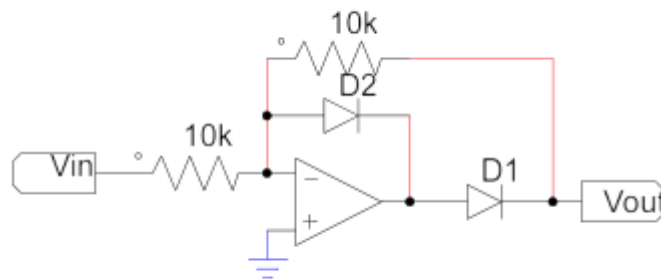
2.6 PROBLEMAS NO USO DE RETIFICADORES E CONVERSORES

Os retificadores ativos têm problema no seu funcionamento quando o sinal tem uma frequência de comutação alta. Um amplificador operacional não consegue comutar sua saída em uma velocidade infinita, portanto a recuperação reversa do diodo

demanda um tempo determinado durante o qual a saída é incorreta (HOROWITZ; HILL, 2017).

A velocidade máxima com que um amplificador consegue variar sua saída é dado pela sua taxa de inclinação em volts por microssegundo ($V/\mu s$) (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Uma modificação no circuito do retificador ativo permite corrigir esse problema conforme apresentado na Figura 10.

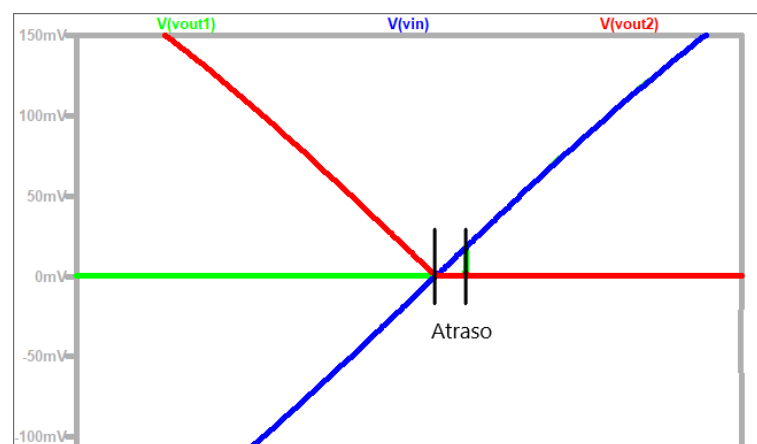
Figura 10 – Retificador ativo meia-onda melhorado



Fonte: adaptado de Hill e Horowitz (2015, p. 239)

O diodo D_1 faz com que o circuito seja um inversor de ganho unitário para entradas negativas, enquanto que para entradas positivas o diodo D_2 faz com que o valor de saída do amp-op seja fixado em $-0,7$ V (queda de tensão do diodo) fazendo com que D_1 seja polarizado inversamente e a saída fique estável em 0 V. A falha de cruzamento no zero para esse circuito é reduzida em 10 vezes (HOROWITZ; HILL, 2017).

Figura 11 – Simulação de funcionamento de retificadores ativos: vin é a tensão de entrada, vout1 saída do retificador e vout2 saída do retificador ativo melhorado



Fonte: O autor (2020)

A Figura 11 mostra a simulação dos dois circuitos. Em verde é apresentado o formato de onda da fonte de entrada, em azul o retificador ativo e em vermelho o retificador ativo melhorado. Ao cruzar o 0 V, o retificador ativo possui um atraso até voltar a acompanhar o valor da fonte de entrada, enquanto que o retificador ativo incrementado mantém seu funcionamento muito próximo do desejado.

2.6.1 Requisitos do processamento de energia para Harvesting

Os conversores têm seu circuito baseado no uso de elementos não passivos como diodos e chaves. Esses elementos possuem uma queda de tensão quando entram em atividade o que pode dificultar o uso destes em aplicações de harvesting (MACHADO et al., 2014).

Conversores CC-CC são tradicionais no campo da eletrônica de potência, majoritariamente utilizados em fontes de energia. Aplicações típicas buscam a geração de uma saída de tensão estável na carga partindo de uma tensão fixa na entrada. Para isso, a saída deve ser realimentada para o controlador do conversor compensar os desvios da referência (MASOUDINEJAD et al., 2018).

Entretanto, aplicações de EH têm requisitos diferentes de funcionamento sendo eles (MASOUDINEJAD et al., 2018):

1. O sinal a ser controlado deve ser o da entrada, para encontrar o ponto de máxima transferência de potência
2. O valor de referência não é fixo, e se altera de acordo com a condição ambiental
3. A tensão de saída se altera dinamicamente de acordo com o estado de armazenamento que se altera de acordo com a demanda

Neste caso, empresas como a Texas Instruments e a Linear Technology fornecem uma gama de conversores em variadas topologias para fins de aplicações distintas. Para harvesting de energia estes conversores são apresentados como circuitos integrados (CIs) de ultra baixa potência (ULP) (MARTINS, 2019).

2.7 CIRCUITOS INTEGRADOS ULP

Taylor (2013) afirma que técnicas de projeto para circuitos integrados de baixa potência existem há um bom tempo, embora nem sempre fosse necessário utilizá-las. Motivados pelo crescimento de aplicações portáteis que demandam hardwares de ultra baixa potência para maximizar o tempo de vida da bateria, a conversão CC-CC de alta eficiência e baixa tensão mostra-se uma tecnologia chave (STRATAKOS, 1998).

Com o uso de harvesting de energia, a conversão de alta eficiência ainda é necessária uma vez que essa forma de geração de energia substitui o uso de baterias. A maneira mais efetiva de reduzir a dissipação de potência no chaveamento de um

conversor seria a utilização de chaves de potência com a menor tensão de alimentação possível e compensar o decréscimo do desempenho com otimizações na arquitetura, circuitaria e outras tecnologias (STRATAKOS, 1998).

As técnicas de projeto de circuitos de ultra baixa potência foram inicialmente aplicadas em circuitos analógicos produzidos pela indústria suíça de relógios. Hoje, com o uso de funções disparadas por eventos no domínio digital, pode-se melhorar a manutenção de energia otimizando os recursos para serem utilizados somente quando solicitados (TAYLOR, 2013).

Taylor (2013) apresenta que o desenvolvimento de aplicações digitais de baixa potência devem abordar o seguinte:

- Representação eficiente da abstração de alto nível para o nível de porta lógica;
- Implantação de limites multi nível;
- Fonte de clock com múltiplas frequências;
- Novas técnicas de redução de lógica;
- Células personalizadas de mudança de nível;
- Domínios de tensão otimizados;
- Manutenção de potência (ciclagem de potência, chaveamento de clock);

Com o avanço da tecnologia, os circuitos integrados de ultra baixa potência tornaram-se comerciais e hoje grandes empresas do mercado de componentes eletrônicos tem linhas de produtos voltados exclusivamente para este seguimento. Martins (2019) apresenta uma comparação entre três modelos de conversores de micropotência: LTC3108, LTC3109 e BQ25570.

Tabela 2 – Principais características de conversores de micropotência

Modelo	Polaridade	Cold Start	Entrada Mínima	Saída Máxima	Eficiência Máxima
LTC3108	Unipolar	20mV	20mV	5V	39%
LTC3109	Bipolar	30mV	30mV	5V	28%
BQ25570	Unipolar	600mV	100mV	5.5V	91%

Fonte: Martins (2013, p.35).

As características apresentadas na Tabela 2 são as ideais a serem revisadas em um sistema de harvesting de energia. A polaridade do conversor diz respeito ao sinal de entrada. Conversores unipolares apenas aceitam valores de entrada positivos em relação a referência, já bipolares aceitam qualquer polaridade de tensão.

A tensão de cold start é o nível mínimo de tensão para iniciar o direcionamento de energia à saída de armazenamento do conversor. Em outras palavras, é a tensão mínima que o conversor precisa receber para que além de prover a saída de tensão controlada também direcione energia à uma saída normalmente acoplada à um banco

de capacitores para armazenamento de energia.

A entrada mínima diz respeito ao nível mínimo de tensão para que o circuito comece a funcionar. Já a saída máxima se refere ao nível máximo de tensão que o conversor consegue entregar. A eficiência dos conversores é apresentada em relação à aplicação do nível mínimo de entrada aceitável. Para valores de entrada maiores a eficiência dos conversores aumenta. O valor discrepante da eficiência do conversor BQ25570 se dá devido à utilização de um circuito de detecção de ponto de máximo transferência de potência no conversor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando realizar os objetivos propostos neste trabalho, apresenta-se neste capítulo a sequência de etapas no desenvolvimento deste projeto. Na seção 3.1, apresenta-se os requisitos de projeto definidos como premissa de funcionamento do sistema e necessidades para um bom desempenho.

Em seguida, discorre-se sobre os softwares utilizados para simulação de circuitos visando atender estes requisitos. Na seção posterior são descritos os componentes escolhidos para concepção de um protótipo além da arquitetura de funcionamento.

Na seção 3.4 apresenta-se o software de projeto de placas de circuito impresso, necessárias para realização de testes do sistema. Por fim, apresenta-se a aplicação de testes e como ela foi estruturada.

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

A construção de um sistema de captação e tratamento de energia eletromagnética proveniente do campo disperso por um motor elétrico possui algumas necessidades e premissas pontuadas a seguir:

1. Uma bobina realiza o acoplamento magnético entre um motor e o sistema;
2. A tensão induzida na bobina deve ser retificada;
3. Após a retificação o sistema deve aplicar um ganho nos valores de tensão;
4. A tensão de saída do sistema deve possuir valores entre 3,3V e 5V para alimentar um nó IoT microprocessado;
5. O sistema deve ser alimentado exclusivamente pela energia obtida do acoplamento eletromagnético;
6. O nó IoT funcionará apenas em parte do tempo, enquanto que no restante do período o sistema armazena a energia captada;
7. Funcionamento ligar e usar;
8. Tamanho reduzido para fácil utilização;
9. Custo reduzido possibilitando replicação;

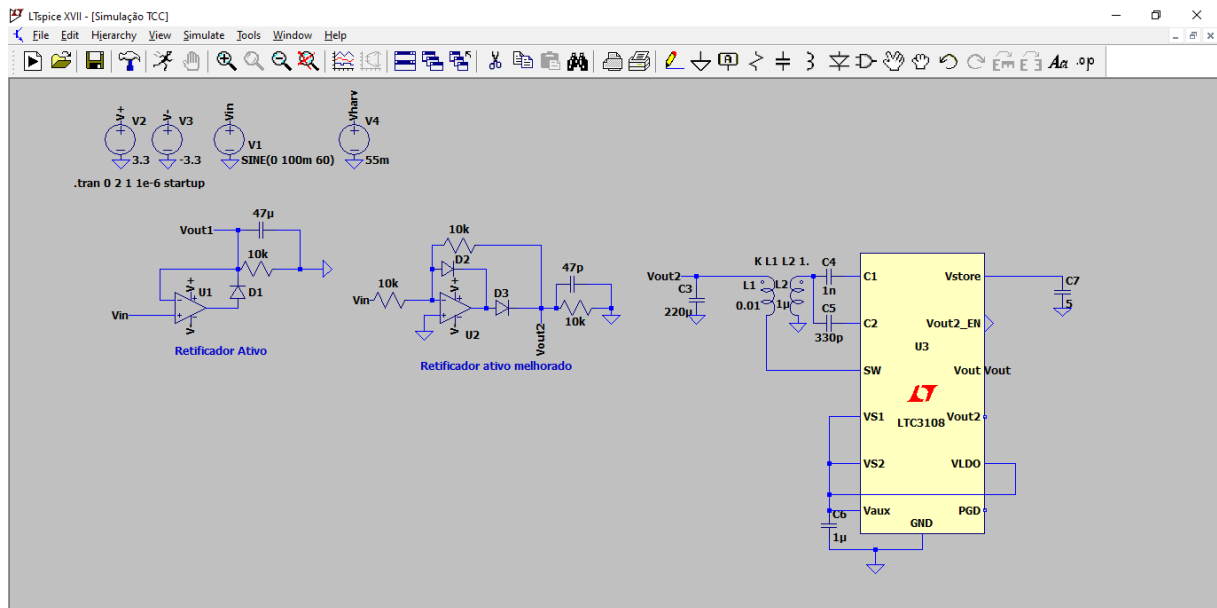
3.2 SOFTWARES E SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações dos circuitos componentes do sistema utilizou-se dois softwares: PSIM e LT Spice. O software PSIM permite a simulação com componentes ideais. Já o software LT Spice permite a simulação com o uso

de componentes reais, possuindo uma biblioteca de itens para simulação do mesmo fabricante de seu desenvolvedor: Linear Technologies.

Esse software se torna interessante por possuir o modelo de simulação de alguns circuitos integrados de ultra baixa potência como o LTC3108 e LTC3109. Isso permite uma maior assertividade na escolha de componentes. A Figura 12 apresenta a tela do simulador com o modelo de simulação do componente LTC3108.

Figura 12 – Simulador LT Spice



Fonte: O Autor(2020)

Ao realizar as simulações foi possível obter os valores, empiricamente, de resistência para a carga do retificador e capacitor para filtro de altas frequências. Também foi possível observar o efeito da utilização do retificador ativo melhorado em relação ao retificador ativo.

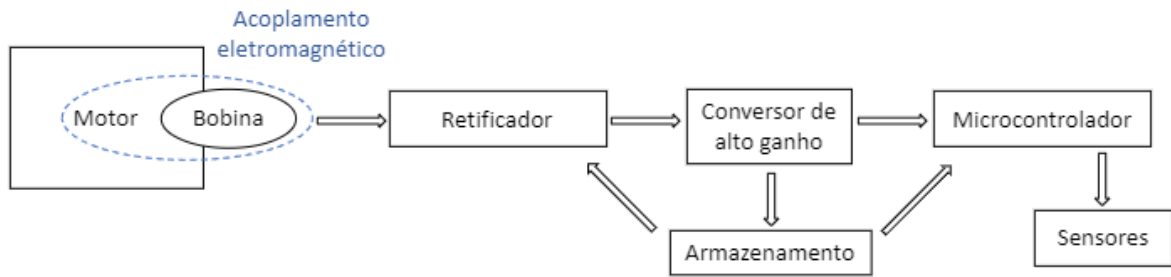
3.3 DEFINIÇÃO DE ARQUITETURA E COMPONENTES

Os requisitos de projeto apresentados resultaram na seguinte topologia da Figura 13.

A topologia se aproxima muito da apresentada por Sunita e Shavet (2017), sendo a diferença principal a inclusão da conexão entre o armazenamento de energia e o sistema de manutenção desta. Uma vez que objetiva-se um módulo auto suficiente, a utilização da energia armazenada para suprir a alimentação quando o motor não estiver em funcionamento se faz necessária.

O módulo de harvesting de energia pode então ser dividido em quatro subsistemas: sistema de acoplamento magnético, sistema de retificação, sistema de manutenção de energia e sistema de IoT. Cada um dos sistemas tem sua construção e

Figura 13 – Topologia do sistema desenvolvido



Fonte: O Autor (2020)

simulação separados para somente na construção final comporem o sistema completo.

3.3.1 Acoplamento magnético

O acoplamento entre o módulo de harvesting de energia e o motor é baseado no princípio da indução eletromagnética. Uma vez que o campo eletromagnético do motor se propaga até o infinito, ao se posicionar uma bobina do lado de fora do motor, devido à variação do campo produzido é induzida uma corrente na bobina. Esse fenômeno é justificado pela Lei de Biot-Savart e pela Lei de Faraday (Equação 1).

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{I}}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad [T] \quad (4)$$

A Equação 4 mostra que o fluxo de uma corrente constante \vec{I} em um elemento linear $d\vec{l}$ a uma distância r gera uma densidade de fluxo magnético \vec{B} . A variação dessa densidade de fluxo magnético no tempo gera um campo elétrico. μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo nesse caso e \vec{r} é um vetor unitário na direção r .

A Equação 2 mostra que quanto maior a quantidade de espiras de uma bobina, maior a tensão induzida. Entretanto, para uma maior quantidade de espiras, aumenta-se também as perdas no fio pela Lei de Ohm, que mostra que a queda de tensão provocada por um condutor é diretamente proporcional ao comprimento do mesmo.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad [\Omega] \quad (5)$$

R é a resistência do fio, ρ é a resistividade do material, l o comprimento do elemento e A sua área transversal. Logo, existe uma relação entre os ganhos provocados pelo aumento do número de espiras e o aumento das perdas no condutor. Essa relação não será abordada profundamente, apenas testada empiricamente.

3.3.2 Retificador

O circuito de retificação é responsável por transformar a tensão CA induzida na bobina em CC, reduzindo as perdas uma vez que os valores de entrada possuem amplitude de no máximo centenas de milivolts.

Por se tratarem de valores baixos de tensão de entrada, não é possível utilizar retificadores comuns. Utiliza-se então o retificador ativo, que promove a retificação sem qualquer perda notável. Entretanto, para a utilização desse circuito é necessário o uso de um amplificador operacional de instrumentação, que possibilite a entrada de sinais de baixíssima amplitude sem propagar o erro para a saída.

O amplificador também deve possuir alimentação única. Como os valores de saída são todos positivos, não há necessidade de alimentação simétrica. Além disso, a alimentação simétrica do amplificador necessitaria de um circuito dedicado para que funcionasse em conjunto com o resto dos componentes, enquanto que a alimentação simples pode ser feita diretamente do módulo de armazenamento de energia.

Para estabilidade dos valores de saída do retificador, utiliza-se um capacitor, que além de filtrar os ruídos de alta frequência também ajuda a tensão retificada a permanecer com um perfil linear.

3.3.3 Manutenção de Energia

O componente de manutenção de energia é o mais importante do conjunto, uma vez que permite controlar o armazenamento e uso da energia obtida pelo sistema para melhor aproveitá-la. Essa parte do circuito é composta por um conversor elevador e dois supercapacitores.

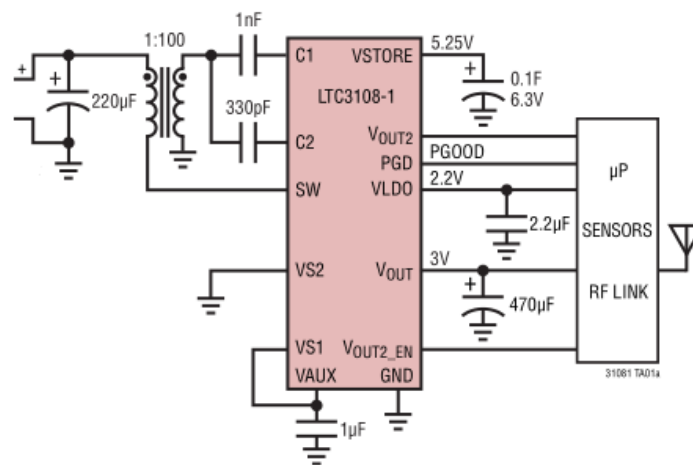
O conversor é responsável por receber os valores de saída do retificador e transformá-los em valores operáveis para alimentação de um módulo IoT. Isso acontece através do uso de um transformador elevador e de um CI de ULP. A saída de armazenamento do circuito integrada está conectada aos dois supercapacitores, que são utilizados como fonte de energia para o resto dos circuitos.

A Figura 14 apresenta o circuito sugerido no datasheet do CI LTC3108 para utilização do dispositivo como regulador de tensões de entrada a partir de 20mV para valores de saída de até 5V. A versão final do sistema desenvolvido foi baseada neste circuito.

3.3.4 Módulo de IoT

Toda a energia obtida serve para eventualmente alimentar um sistema de IoT. Esse sistema deve possuir baixo consumo, permitindo que quando entre em operação não esgote a energia armazenada pelo sistema de colheita antes de completar a tarefa a ser executada.

Figura 14 – Circuito de Manutenção



Fonte: Linear Technology (2010)

O sistema funciona periodicamente realizando as medições dos sensores acoplados e quando possível enviando as informações coletadas. Enquanto não é possível realizar as atividades designadas ou enquanto espera o próximo ciclo de execução, o sistema fica em modo de hibernação, consumindo o mínimo de energia.

O período de funcionamento do sistema varia de acordo com a captação de energia, sendo de no mínimo uma hora. De acordo com as saídas do módulo de manutenção de energia o sistema deve ser alimentado, devendo aceitar tensões de entrada de 2.5V a 5V.

O módulo é composto então por um controlador e um conjunto de sensores. A comunicação com os sensores deverá ser através de protocolo serial de circuito inter-integrado (I²C). Esse protocolo é composto por um mestre e um escravo e o tráfego de informações só ocorre quando há solicitação por parte do mestre, neste caso o controlador. Além disso, o conjunto de sensores será alimentado por uma das saídas de propósito geral do controlador, fazendo com que durante o período de espera os sensores não consumam energia do sistema.

Para envio das informações, idealmente o sistema deverá utilizar comunicação sem fio como Bluetooth, Wi-Fi ou outros semelhantes. O envio das informações por um destes protocolos de comunicação é o processo de maior consumo do sistema e por isso deve ser utilizado estrategicamente.

3.3.5 Lista de componentes

Para a execução dos testes, visando atender os requisitos de projeto foram utilizados os componentes apresentados na Tabela 3 contendo seus custos aproximados.

Para a confecção da bobina de acoplamento utilizou-se fio de cobre esmaltado

Tabela 3 – Componentes do projeto e custos

Componente	Custo de compra aproximado
Fio de cobre esmaltado AWG 35	R\$ 35,00 por 100g
INA118	R\$ 3,18 un.
OPA2227	R\$ 5,46 un.
Placa de desenvolvimento LTC3108	R\$ 20,91 un.
LPR6235-752SMR_	R\$ 6,07 un.
Supercapacitor 5.5V 4F	R\$ 3,06 un.
Módulo Lua ESP8266	R\$ 12,24 un.
Módulo GY-521 (Acelerômetro e Giroscópio)	R\$ 3,60 un.
Outros componetes (Bornes, resistores, etc.)	R\$ 15,00 un.
Total	R\$ 74,58

Fonte: O Autor (2020).

AWG 35. Para o circuito do retificador ativo, utilizou-se os amplificadores de instrumentação INA118 e OPA2227. A placa de desenvolvimento LTC3108 foi utilizada como circuito de manutenção da energia coletada da bobina. Esta placa contém um CI LTC3108 como conversor de alto ganho e possui os elementos passivos necessários para o correto funcionamento deste circuito integrado.

O circuito de manutenção de energia exige o uso de um transformador, sendo utilizado neste caso o LPR6235 com proporção de 1:100 nas espiras. A energia é armazenada em um par de supercapacitores. Para a aplicação de IoT utilizou-se um Módulo Lua ESP8266 com conexão Wi-Fi para exportação dos dados e o módulo de sensores GY-521, que contém um acelerômetro e giroscópio de 3 eixos além de um sensor de temperatura. Outros componentes como diodos, resistores, bornes, etc. foram utilizados para construção dos circuitos de teste.

Figura 15 – Componentes utilizados



Fonte: O Autor (2020)

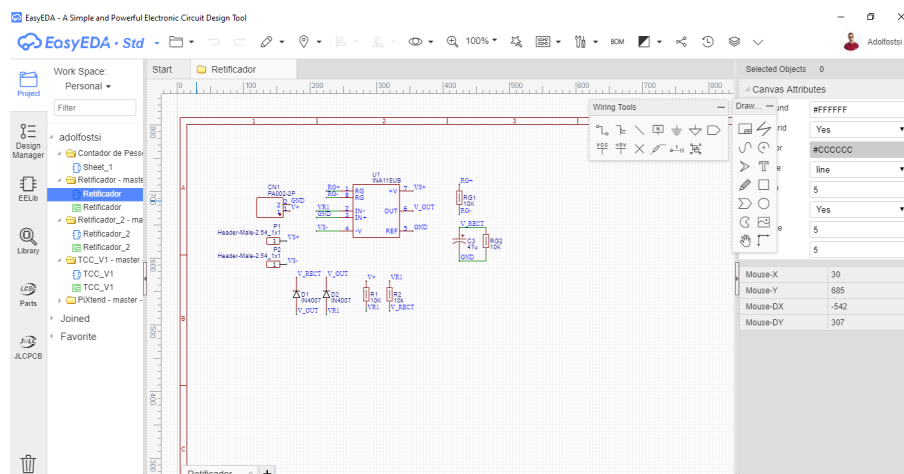
Todos os materiais descritos são apresentados na Figura 15.

3.4 DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Uma vez que o subsistemas foram simulados, existira a necessidade de comprovação de funcionamento através de testes práticos. Para isso, tornou-se necessário a confecção de placas de circuito impresso (PCB) de modo a organizar os componentes e realizar as conexões necessárias entre eles.

Para efetuar o desenvolvimento destas placas, utilizou-se o software EasyEDA. Este software é gratuito e possui integração com diversas bibliotecas de esquemáticos, permitindo o rápido desenvolvimento da placa.

Figura 16 – Software EasyEDA



Fonte: O Autor (2020)

A Figura 16 apresenta o software na tela de desenvolvimento de esquemático. Uma vez finalizado o esquema elétrico e conexões, o circuito é compilado e direcionado à tela de geração de PCB onde é selecionado a posição de cada componente na área disponível além de permitir desenhar as trilhas de conexão entre os pinos.

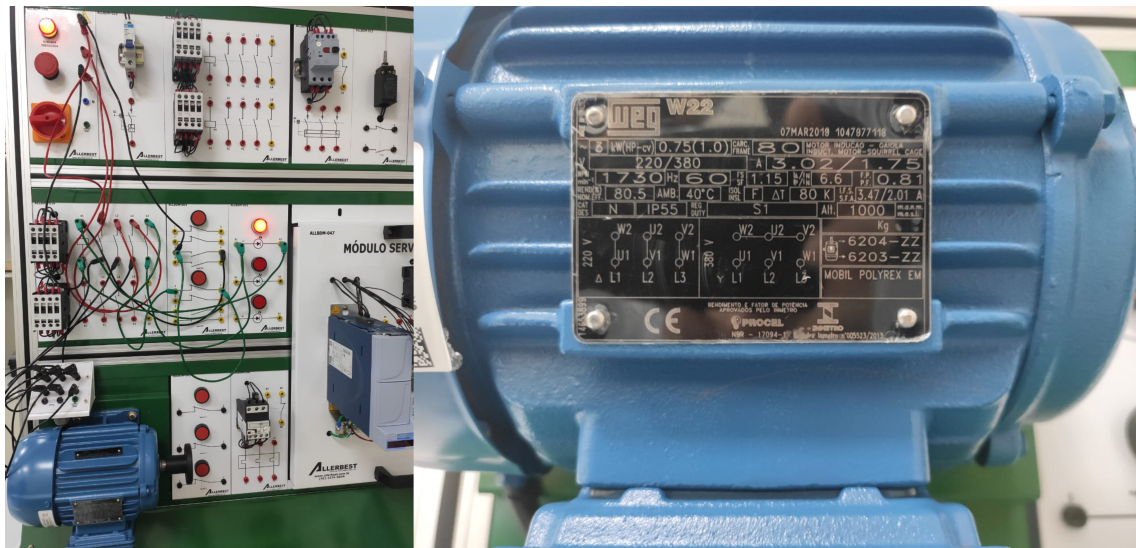
3.5 APLICAÇÃO DE TESTE

A aplicação de teste foi desenvolvida na bancada de trabalho do laboratório GREEN do campus da UFSC de Joinville. Utilizou-se um motor de indução trifásico, onde acoplou-se o sistema desenvolvido. A bancada é apresentada na Figura 17.

O motor utilizado é de 1 HP, construção em gaiola de esquilo. A velocidade nominal é de 1730 rpm, a 60 Hz. O rendimento nominal do motor é de 80,5%, a temperatura de operação é de 40 °C. Realizou-se a conexão do motor em 220V e não foi acoplado nenhuma carga na saída.

Além disso, para auxílio nos testes foram utilizados osciloscópios para

Figura 17 – Bancada de trabalho e motor utilizados



Fonte: O Autor (2020)

armazenamento de todas as formas de onda obtidas, geradores de função que pudessem emular o comportamento da tensão induzida pelo motor visando facilitar os testes, fontes de alimentação reguláveis para simulação de sinais entre outros materiais para simulação de condições.

4 TESTES E RESULTADOS

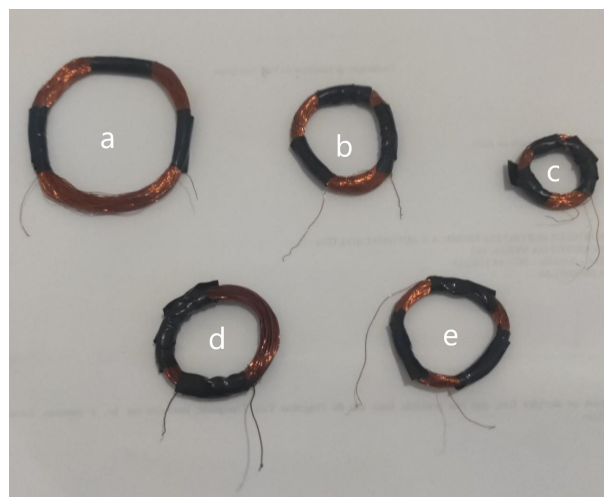
Neste capítulo são apresentados os testes realizados no sistema desenvolvido bem como os resultados. Na primeira seção são relatados os testes desenvolvidos no sistema de acoplamento magnético. Em seguida são apresentados os testes no sistema de retificação.

Na terceira seção são apresentados os testes no sistema de harvesting e por último os testes do sistema completo bem como as comparações com as simulações realizadas.

4.1 ACOMPLAMENTO MAGNÉTICO

Os testes com o sistema de acoplamento magnético foram realizados fabricando-se diversas bobinas de cobre com diferentes diâmetros, utilizando espessuras diferentes de fio para um mesmo diâmetro e alterando a quantidade de espiras para um mesmo tamanho de bobina. Abaixo, na Figura 18, é possível observar todas as bobinas utilizadas nos testes.

Figura 18 – Bobinas construídas



Fonte: O Autor (2020)

Nos testes as bobinas foram posicionadas próximas a extremidade do motor, onde existe uma concentração maior de linhas de campo conforme apresentado por Lecointe et al. (2012). Para medição da tensão obtida utilizou-se um osciloscópio acoplado as ponteiras da bobina. Observou-se níveis altos de ruído nos primeiros testes, que foram atenuados aumentando a compactação das espiras na bobina.

O primeiro teste realizado foi a alteração da espessura do fio para avaliar o ganho provocado. Fabricou-se duas bobinas de 200 espiras e 3 cm de diâmetro com

duas espessuras diferentes de fio: AWG 30 e AWG 35 utilizando fios esmaltados. Enquanto o fio AWG 30 possui seção circular de $0,0491 \text{ mm}^2$, o fio AWG 35 possui $0,0154 \text{ mm}^2$. Isso representa uma redução de quase 70% na área de condução de corrente elétrica. Entretanto, por se tratar de um material mais fino, precisa-se de um comprimento menor de fio para chegar na mesma quantidade de espiras.

Os valores da tensão de pico obtidos com essas bobinas foram de 39mV para o fio AWG 35 e de 41mV para o fio AWG 30. Pela proximidade dos dois valores, optou-se em seguir com a utilização de fios AWG 35 pela facilidade na manipulação deste.

Em seguida, observou-se as vantagens do aumento do número de espiras na bobina. Utilizando a mesma bobina de 200 espiras anterior com fio AWG 35 e comparando-a com uma bobina de 300 espiras, igual material e diâmetro, observou-se que obteve-se um ganho de aproximadamente 50% nos valores de tensão. Fazendo com que o ganho com o aumento de espiras seja praticamente linear.

Por último, realizou-se o teste da mudança de diâmetro da bobina avaliando-se a relação entre a utilização de material e a área de interação com o campo magnético do motor. Neste teste, utilizou-se o fio AWG 35, 300 espiras e uma variação entre três diâmetros, sendo eles: 2, 3 e 4 cm. As bobinas entregaram uma tensão de pico na saída de 35 mV, 65 mV e 95mV, respectivamente.

As áreas de interação com o campo magnético do motor cresceram 125% e 78% das bobinas de 2 para 3 cm e de 3 para 4 cm, respectivamente. Simultaneamente, o comprimento do fio utilizado cresceu 50% nas duas ocasiões. Chega-se a conclusão de que quanto maior a bobina, dentre as testadas, melhor a obtenção de energia para o motor analisado.

Wheeler (1928) apresenta o cálculo da indutância L de uma bobina de múltiplas camadas com núcleo de ar como sendo proporcional ao quadrado do número de espiras, N , e ao quadrado do raio médio, R_m , da bobina e inversamente proporcional à espessura, e , ao comprimento longitudinal, l , e também ao raio médio cada um destes multiplicado por um fator inteiro. Em sua publicação, Wheeler utiliza os valores em polegadas e o valor final do cálculo é dado em microhenries. Realizando as conversões para o sistema internacional, é possível calcular a indutância L , em Henries, aproximada de cada uma das bobinas testadas utilizando a fórmula abaixo, considerando todas as variáveis dimensionais em metros.

$$L = \frac{31,5N^2R_m^2}{6R_m + 9l + 10e} \quad (6)$$

Essa fórmula considera que o material do enrolamento possui alta condutividade elétrica. Entretanto, o fator do material de construção da bobina não está presente na fórmula, fazendo com que o cálculo da indutância de materiais diferentes podem resultar em um valor próximo se a construção for semelhante.

Através de uma ponte RLC, foi possível obter o valor da indutância das bobinas

experimentalmente, medindo assim a grandeza com interferência do material de fabricação da bobina e sua condutividade. Realizou-se a medição ajustada à 1kHz. Uma foto da ponte RLC utilizada pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Ponte RLC ajustada em medição a 1kHz



Fonte: O Autor (2020)

A Tabela 4 resume todas as bobinas testadas e as tensões de pico obtidas. Como estas bobinas foram acopladas à um motor conectado à rede elétrica, a frequência da onda de tensão obtida foi de aproximadamente 60Hz. A Figura 20 mostra a forma de onda de maior amplitude obtida.

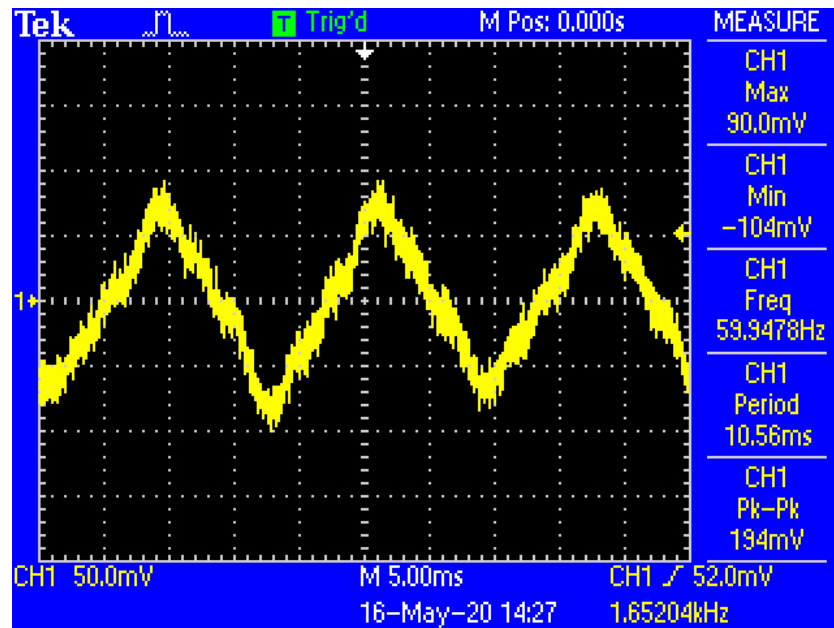
Tabela 4 – Comparação entre bobinas testadas

Bobina (qtd. espiras, material, diâmetro)	Tensão de pico	Indutância Calculada	Indutância Experimentalada
(a) AWG 35 / 4 cm / 300	95 mV	6,79 mH	8,02 mH
(b) AWG 35 / 3 cm / 300	65 mV	4,92 mH	4,14 mH
(c) AWG 35 / 2 cm / 300	35 mV	2,78 mH	2,15 mH
(d) AWG 30 / 3 cm / 200	39 mV	1,99 mH	431,3 μ H
(e) AWG 35 / 3 cm / 200	41 mV	2.19 mH	2,13 mH

Fonte: O Autor (2020).

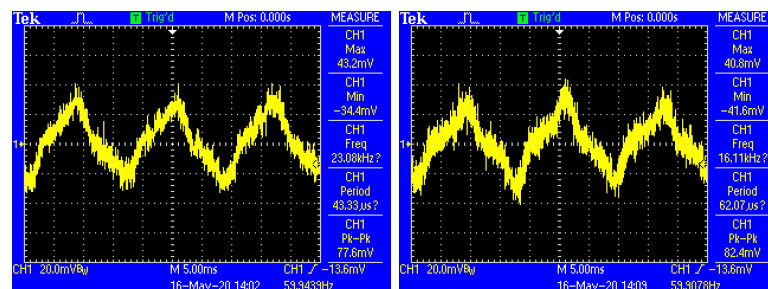
Na Figura 21 é possível observar as outras formas de onda obtidas com as bobinas testadas.

Figura 20 – Forma de onda obtida com bobina de 4cm de diâmetro



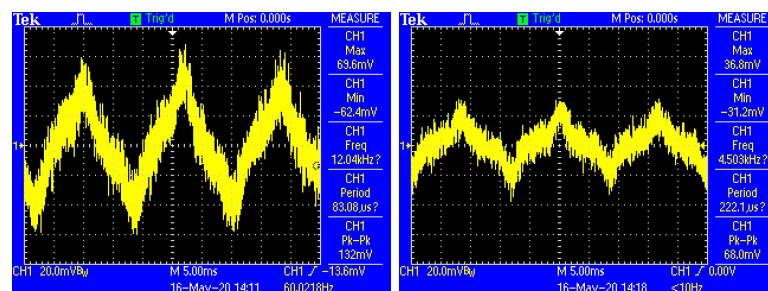
Fonte: O Autor (2020)

Figura 21 – Formas de onda obtidas com as bobinas (d), (e), (c) e (b)



(a) Bobina (d)

(b) Bobina (e)



(c) Bobina (c)

(d) Bobina (b)

Fonte: O Autor (2020)

4.2 RETIFICADORES

O teste do retificador do sistema se dividiu em duas partes. Primeiramente realizou-se os testes do retificador ativo melhorado conectado à bobina acoplada ao

motor. Então comparou-se esses valores com as simulações. Em seguida, avaliou-se os ganhos provocados pela utilização do retificador ativo melhorado em relação ao retificador ativo e também comparou-se com as simulações. Uma vez que o sistema de retificação foi testado em conjunto com a bobina, decidiu-se por simular o efeito da bobina com equipamentos de geração de ondas para sequência dos testes.

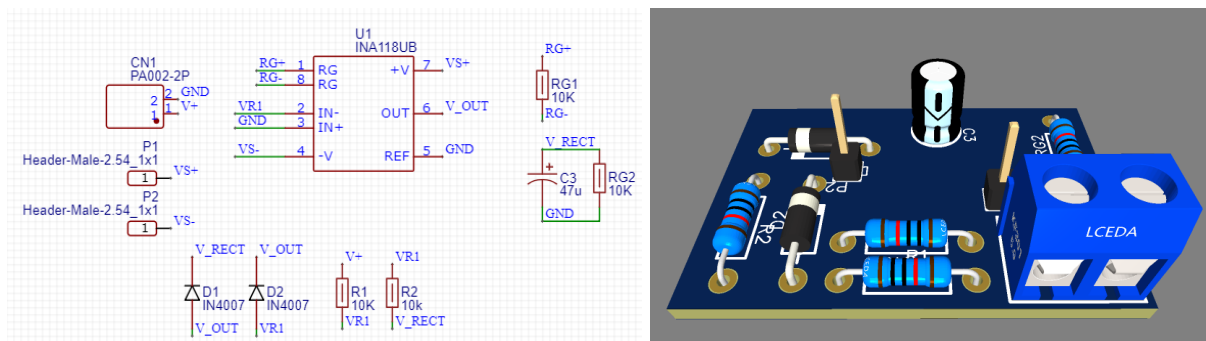
4.2.1 Retificador ativo

Para realização do teste com o retificador ativo melhorado, primeiramente simulou-se seu funcionamento com auxílio de softwares de simulação de circuitos elétricos. Pelas simulações, foi possível observar que o uso de um amplificador operacional de alimentação simples possibilita o correto funcionamento do retificador. Assim, utilizou-se um amplificador operacional com alimentação de 0V e 3.3V, tendo como entrada uma onda senoidal de 60Hz e 100mV de pico, produzindo uma tensão contínua de 95mV na saída.

Para testes práticos, gerou-se uma placa de circuito impresso. O esquemático da placa bem como o desenho 3D da PCB podem ser observados na Figura 22. Para confecção da placa, utilizou-se o amplificador operacional INA118U. Esse amplificador possui alimentação dual. Desta forma, foi necessário realizar a alimentação do amp-op através de fontes externas ao circuito. Utilizou-se alimentação simétrica de $\pm 3.3V$. Na Figura 23 é possível observar a configuração de teste realizada.

Nestes testes pode-se confirmar o funcionamento do retificador conforme nas simulações. O retificador ativo melhorado retifica os valores negativos de tensão na entrada. O capacitor na saída estabiliza os valores de tensão, funcionando como uma reserva de energia para a carga resistiva quando a onda de entrada é positiva fazendo assim com que a saída do amplificador seja nula.

Figura 22 – Esquemático e PCB do circuito de retificação



Fonte: O Autor (2020)

Figura 23 – Configuração de testes



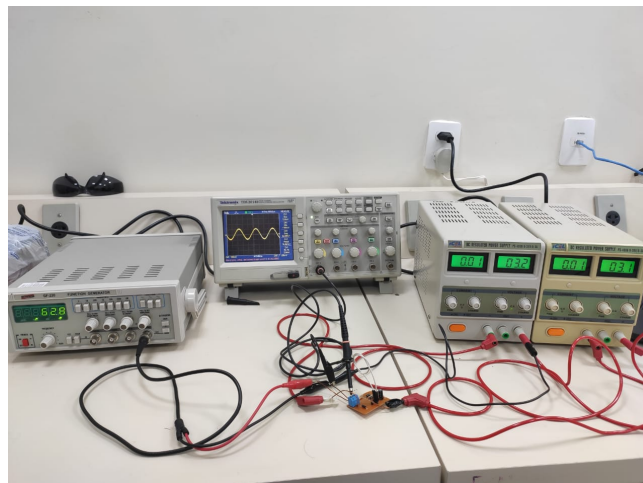
Fonte: O Autor (2020)

4.2.2 Retificador ativo melhorado

Uma vez confirmado que os valores de tensão e corrente gerados pela bobina são suficientes para funcionamento do retificador, realizou-se um segundo teste para avaliar as diferenças práticas entre o retificador ativo e o retificador ativo melhorado.

Assim, realizou-se uma segunda versão de placa de circuito impresso, contendo os dois retificadores, direcionando a saída de cada um deles para a carga através do uso de uma conexão. Para esse teste, a bobina foi simulada utilizando um gerador de sinal. A Figura 24 apresenta a configuração de testes utilizando os dispositivos de bancada.

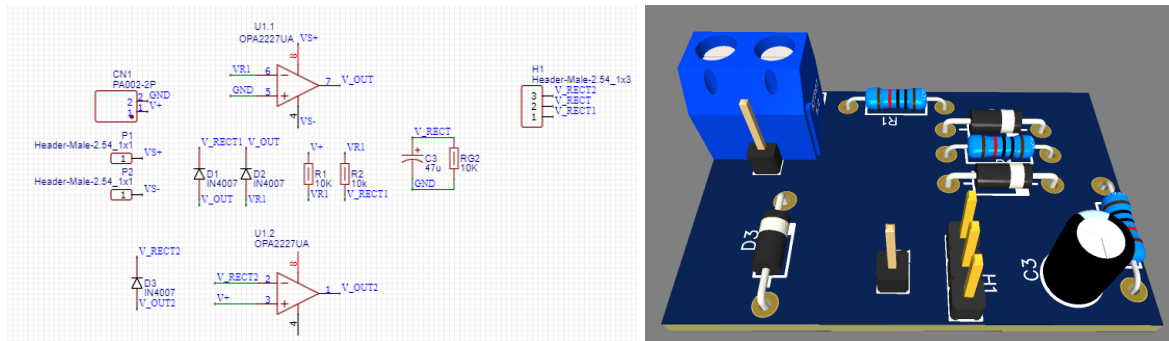
Figura 24 – Teste comparativo dos retificadores



Fonte: O Autor (2020)

Utilizou-se como amplificador operacional para construção da placa o circuito integrado OPA2227. Esse CI possui dois amp-ops no mesmo encapsulamento e possibilita a construção dessa PCB. O CI OPA2227 também possui alimentação simétrica.

Figura 25 – Esquemático e PCB do circuito de retificação atualizado



Fonte: O Autor (2020)

A Figura 25 apresenta o esquemático e o desenho 3D da PCB manufaturada para testes comparativos entre os dois circuitos de retificação. Nos testes foi possível observar que os dois retificadores se assemelham muito no funcionamento, mesmo com o problema de o slew rate finito do amplificador fazer com que o sinal de saída tenha uma certa demora em acompanhar o sinal de entrada. Os valores de saída chegam nos mesmos patamares, tornando possível a utilização de qualquer um dos dois circuitos.

4.3 SISTEMA DE MANUTENÇÃO DE ENERGIA

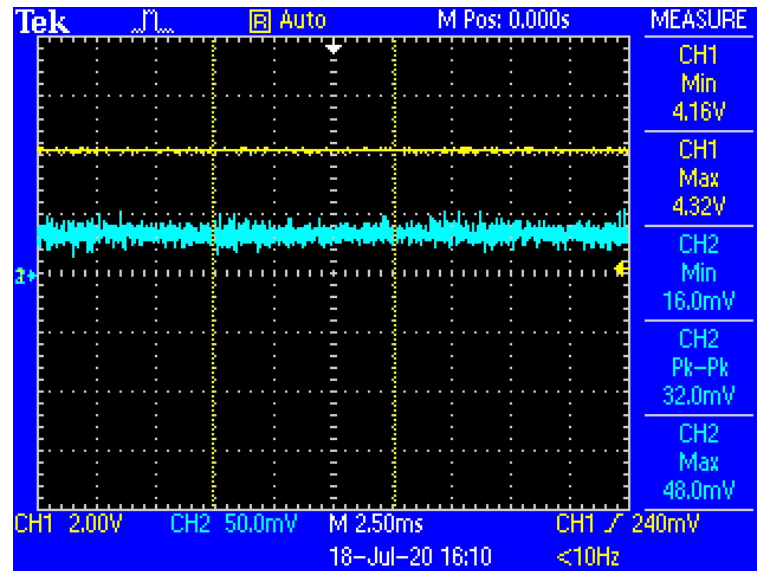
O sistema de manutenção de energia composto pela placa de desenvolvimento LTC3108 e pelo transformador LPR6235 é planejado para ter seu funcionamento a partir de níveis de entrada de 20mV. Uma vez que os níveis de tensão da saída do retificador atingem o mínimo necessário para o sistema de manutenção de energia, é possível obter um nível de tensão na saída para alimentar o nó microprocessado.

Realizou-se o teste do sistema de manutenção utilizando uma fonte chaveada ajustável de bancada, simulando a entrada de sinal vinda do retificador, com o objetivo de verificar o correto funcionamento do sistema.

Observou-se o comportamento do circuito que a partir de valores de entrada de aproximadamente 23mV (conforme aferido com multímetro), obteve-se valores de saída de 2.35V a 5V, obedecendo as configurações apresentadas em Linear Technology (2010). A corrente de entrada aferida do circuito foi de aproximadamente 10mA ao utilizar uma carga resistiva na saída sem a presença de meios de armazenamento de energia.

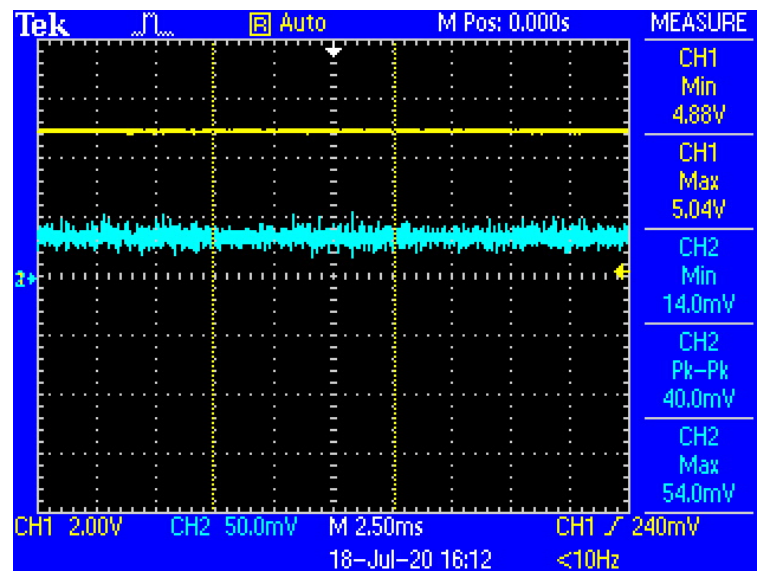
As Figuras 26 e 27 apresentam as tensões de saída do circuito de manutenção de energia, em amarelo, aplicando uma mesma entrada, em azul, com a fonte chaveada ajustável. Altera-se apenas a configuração do circuito através de conexões entre os pinos do CI fazendo com que os níveis de tensão sejam modificados.

Figura 26 – Resposta do circuito de manutenção com saída programada para 3.7V



Fonte: O Autor (2020)

Figura 27 – Resposta do circuito de manutenção com saída programada para 4.5V



Fonte: O Autor (2020)

É possível observar que as tensões nos dois exemplos ultrapassam os limites indicados na ficha de dados do conversor LTC3108. Isso se dá devido ao fato da não utilização de uma carga conectada à saída de armazenamento do circuito integrado, fazendo com que toda a potência seja direcionada a saída, atingindo assim os valores nominais de funcionamento. Ao conectar-se um capacitor, por exemplo, à saída de

armazenamento, os valores de saída do circuito de manutenção são reduzidos, uma vez que parte da energia está sendo armazenada.

Uma vez que o circuito teve seu funcionamento comprovado, decidiu-se por utilizar a tensão de 3.7V para a saída, uma vez que atinge os valores obtidos como pré-requisito para o sistema. Além disso, esse valor pode ser alcançado com uma potência menor na entrada do sistema, o que colabora para um bom funcionamento.

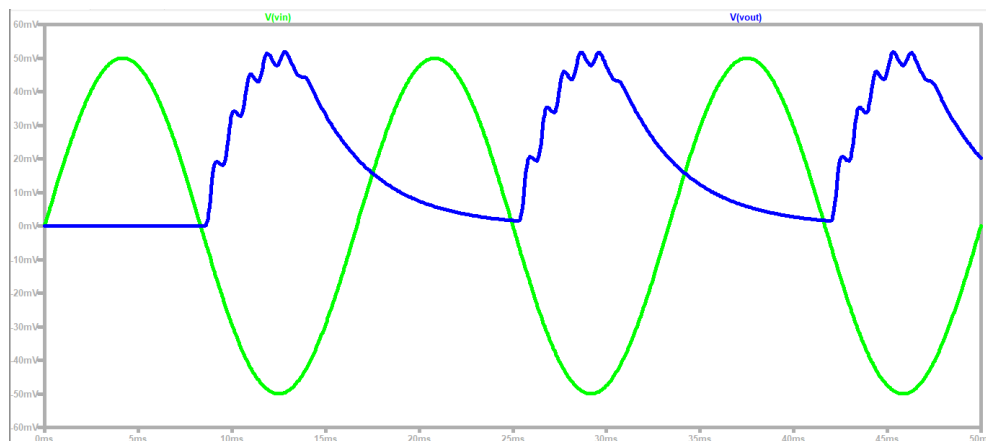
4.3.1 Integração com retificador

Ainda com o objetivo de obter o funcionamento correto do sistema parte a parte, realizou-se a integração do circuito de manutenção de energia com o retificador desenvolvido.

Inicialmente realizou-se a simulação da integração do retificador ativo melhorado com o circuito integrado LTC3108 disponível no software LT Spice, seguindo as instruções do datasheet de utilização conforme a Figura 14. Na Figura 12 é possível observar como ficou a versão final da simulação.

Analisando a forma de onda de saída do retificador ativo melhorado quando conectado ao sistema de manutenção de energia, conforme a Figura 28, é possível observar que devido ao consumo do circuito de manutenção existe uma queda na tensão de saída do retificador. A tensão de entrada está apresentada em verde e a saída do retificador em azul.

Figura 28 – Simulação da saída do circuito de retificação conectado ao circuito de manutenção de energia



Fonte: O Autor (2020)

Como o retificador trabalha somente durante metade do período da onda senoidal, existe uma queda de tensão esperada que é minimizada com o uso de um capacitor para filtrar altas frequências na saída. Entretanto, ao se aplicar a carga do CI LTC3108, é possível observar que o capacitor não tem o mesmo desempenho do que a vazio.

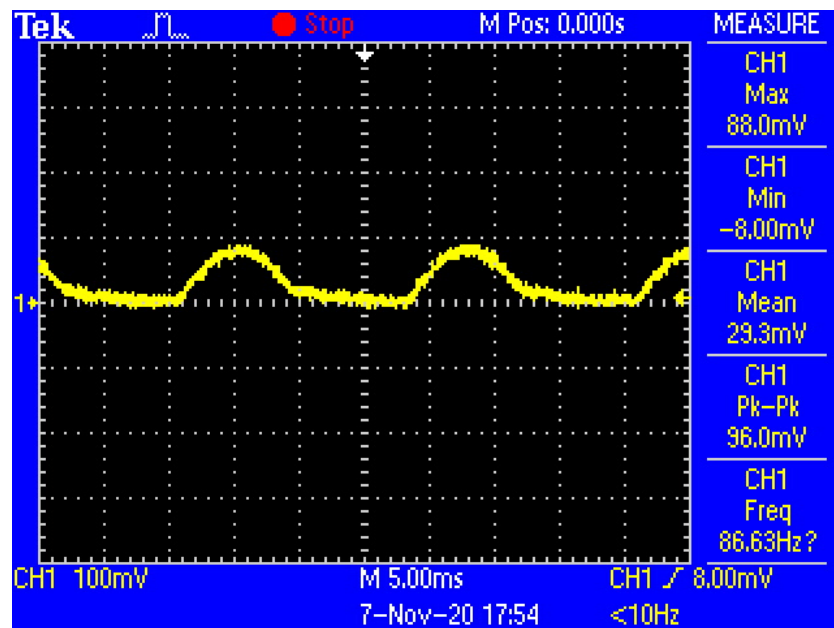
Rashid (2014) apresenta a tensão média de saída de um retificador de meia-onda sendo descrito pela Equação 7.

$$\begin{aligned}\bar{v}_{out}(t) &= \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\pi/2}^{\pi/2} V_{pico} \cos \theta d\theta + \int_{\pi/2}^{3\pi/2} 0 d\theta \right) \\ &= \frac{V_{pico}}{\pi}\end{aligned}\quad (7)$$

Assim sendo, considerando que a tensão de pico gerada pela bobina é de 95mV, a tensão média gerada é de aproximadamente 30,2mV, atingindo assim o limiar inferior de 20mV do circuito integrado LTC3108.

Uma vez simulado, realizou-se o teste do sistema utilizando os circuitos desenvolvidos acoplando-os e simulando o sinal de entrada via gerador de função. Através dos testes pode-se observar o mesmo comportamento da simulação no sinal de saída do retificador, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Saída do circuito de retificação conectado ao circuito de manutenção de energia

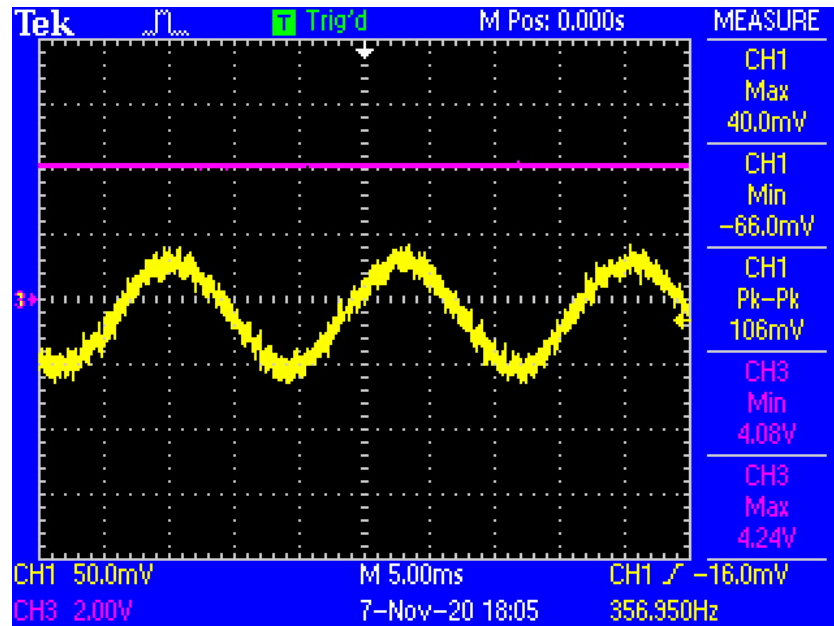


Fonte: O Autor (2020)

O saída do circuito de manutenção, em rosa, bem como a entrada aplicada ao circuito construído, em amarelo, podem ser observadas na Figura 30.

Ainda com todo o circuito integrado, fez-se a cronometragem de tempo para que a saída do circuito de manutenção de energia atingisse os níveis suficientes para alimentação do microcontrolador a partir da aplicação do sinal senoidal na entrada e também do tempo de duração da saída em níveis suficientes para funcionamento da aplicação quando o sinal de entrada do circuito é desativado.

Figura 30 – Resultado da integração do sistema de retificação e manutenção



Fonte: O Autor (2020)

Com o sistema totalmente descarregado, passa-se aproximadamente 2 segundos até que a saída ultrapasse os 3V e se mantenha assim, bastando para iniciar o microcontrolador. Quando ela se encontra estável no valor configurado de 4,1V, leva 53 segundos para atingir a tensão mínima de alimentação do microcontrolador sem qualquer carga conectada.

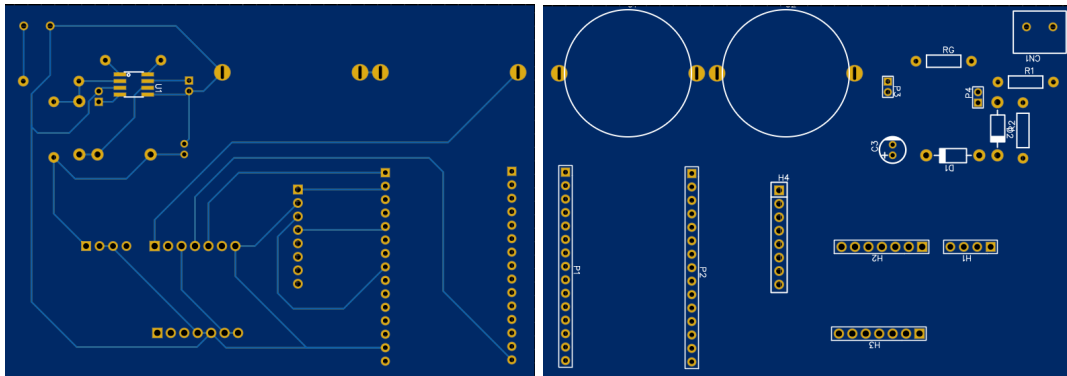
4.4 PROJETO FINAL

Uma vez confirmado o funcionamento de todo o sistema em suas partes, criou-se então o projeto de placa de circuito impresso que aporta todos os subsistemas do conjunto. Planejou-se a placa para receber os capacitores de armazenamento, a placa de desenvolvimento do LTC3108, o módulo Lua ESP8266, o módulo GY-521 com os sensores, o circuito de retificação e a entrada do sistema é feita para receber as pontas da bobina.

O projeto da PCB pode ser visto na Figura 31 em suas duas faces. Devido a complexidade de diversos componentes da placa, não foi possível realizar a corrosão da mesma de forma manual, entretanto a fabricação desta placa será realizada para continuação do trabalho. O esquemático da placa pode ser encontrado no Apêndice A.

Devido à utilização de um amplificador operacional de alimentação simétrica pela disponibilidade, a placa desenvolvida também possui dois pontos para alimentação positiva e negativa do amplificador. Uma vez desenvolvido todo o sistema em uma placa, é possível realizar os testes com maior facilidade, devido a possibilidade de

Figura 31 – PCB do projeto completo - 100x70x20mm



Fonte: O Autor (2020)

acoplar a placa na própria carcaça do motor.

A lista de materiais(BOM) utilizados no protótipo pode ser encontrada no Apêndice B.

4.4.1 Avaliação de consumo energético

De forma a avaliar a capacidade do sistema desenvolvido em alimentar um nó IoT micro-controlado, fez-se a avaliação de consumo dos componentes do sistema baseado nos dados de datasheet de cada um dos componentes. A placa de desenvolvimento LTC3108 tem sua corrente típica de 3mA quando suas saídas estão carregadas e $0,4\mu A$ de corrente quiescente. Já o amplificador OPA2227 tem 3,7mA de corrente quiescente por amplificador.

O módulo Lua ESP8266 tem seu consumo dividido em duas partes: em modo de transmissão de dados via Wi-Fi e em modo de hibernação. Para transmissão de dados o módulo exige tipicamente 170mA em seu máximo e em hibernação o módulo necessita de 0,9mA. O módulo GY-521 contendo os sensores exige tipicamente 3,9 mA quando ligado.

Assim, em transmissão, o sistema demanda aproximadamente 185mA, em coleta de dados demanda cerca de 16mA, enquanto que em hibernação demanda aproximadamente 10mA. Isso faz com que o módulo de harvesting de energia precise gerar 66mW para manter o sistema funcionando e 760mW para suprir o gasto do envio de dados.

Uma vez que o sistema utiliza dois supercapacitores para auxiliar na manutenção da carga de saída, essa corrente de saída é facilmente alcançada, utilizando-se assim o sistema de harvesting para recarregar os capacitores. Como os capacitores estão ligados em paralelo com a saída, sua capacitância resultante de 2F carregados com os 3,7V do circuito de manutenção de energia, permite a descarga de corrente de 185mA por 40s, tempo mais que suficiente para realizar a transmissão de

dados.

Visando otimizar o consumo do sistema, é possível ainda realizar múltiplas aquisições com os sensores e enviar os dados em pacotes, de até 1024 bytes. Considerando que serão enviados 4 dados pelo nó (temperatura e vibração de três eixos), cada um desses dados sendo um número real, representado por 4 bytes, é possível enviar 64 aquisições por pacote.

Comparando o sistema com o WEG Motor Scan, dispositivo semelhante vendido no mercado, que tem expectativa de duração de sua bateria de 3 anos para 24 medições por dia (WEG, 2020), o sistema apresentado neste trabalho teria duração inestimada enquanto o motor permanecesse funcionando e poderia se manter por 12 minutos em hibernação sem qualquer fonte de energia.

5 CONCLUSÕES

O crescimento exponencial de dispositivos sem fio ao mesmo tempo que gera praticidade em sua utilização, traz preocupações a respeito das possibilidades de alimentação de todos os sistemas sem grandes prejuízos ao meio ambiente.

Objetivando aplicar os conceitos de harvesting de energia em nós IoT, implementou-se um sistema para captura e tratamento de energia proveniente do campo eletromagnético produzido por um motor de indução trifásico possibilitando a alimentação de um módulo de sensoriamento micro-controlado com possibilidade de envio dos dados medidos através de comunicação sem fio.

Através da contextualização do desenvolvimento atual do mercado e das indústrias apresentando a importância do uso de máquinas elétricas, definiram-se os requisitos de projeto para construção do sistema de harvesting. Os requisitos puderam ser atingidos em sua grande maioria no protótipo desenvolvido, conforme apresentado na seção 3.1, com exceção do requisito do sistema ser alimentado somente pela energia obtida do acoplamento eletromagnético.

Isso aconteceu pela indisponibilidade, no momento, de um amplificador operacional com fonte de alimentação simples para construção do protótipo. Entretanto, para a construção de um dispositivo final, é possível atingir esse requisito também, uma vez que existem diversos amplificadores operacionais de características semelhantes às utilizadas funcionando a partir de uma fonte de alimentação simples.

Os dados de simulações se aproximaram muito dos dados obtidos nos testes práticos, o que possibilitou que as possíveis falhas percebidas nas simulações pudessem ser corrigidas nos testes laboratoriais.

Comparando o sistema desenvolvido com outras formas de alimentação para dispositivos sem fio, pôde-se construir um dispositivo muito mais leve, com praticidade de funcionamento e de baixo custo (cerca de R\$50,00). Agregando-se o microcontrolador e o módulo de sensores, o sistema completo custa menos de R\$65,00.

Em relação ao WEG Motor Scan, que tem duração prevista de 3 anos, avalia-se que o dispositivo proposto pode ter maior durabilidade, uma vez que depende do funcionamento do motor para funcionar e da vida útil dos componentes. A desvantagem do sistema desenvolvido em relação ao dispositivo da WEG é o tamanho: enquanto que o Motor Scan possui 25x44x38mm, o protótipo deste trabalho possui 100x70x20mm sem conter a bobina nesse volume.

O sistema desenvolvido se apresentou como uma boa alternativa de forma de alimentação para dispositivos sem fio quando existe a presença de um campo

eletromagnético, entretanto surgem alguns pontos de melhoria e continuação do trabalho, conforme listados a seguir:

- Desenvolvimento de software para utilização no microcontrolador ESP8266 realizando coleta e envio de informações periodicamente,
- Replanejamento de materiais para utilização de um amplificador com fonte de alimentação simples,
- Reestruturação da PCB visando reduzir dimensões,
- Utilização de plataforma web para dispor dados coletados com o sistema e
- Estudo aprofundado para fabricação das bobinas visando otimizar seu funcionamento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Agenda brasileira para a indústria 4.0**. 2020. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil>. Acesso em: 2 abr. 2020.

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (ESTADOS UNIDOS). **Sustainable materials management**. 2009. Disponível em: <https://www.epa.gov/smm>. Acesso em: 20 jun. 2018.

BAKER, J. **Internet of Everything: the IoT market is projected to expand 12x from 2017-2023**. 2017. Disponível em: <https://medium.com/hackernoon/internet-of-everything-the-iot-market-is-projected-to-expand-12x-from-2017-2023-175f845c2bcf>. Acesso em: 18 nov. 2018.

BHUTADA, M.; SINGH, V.; WARTY, C. Transmission of wireless power in two-coil and four-coil systems using coupled mode theory. In: **2015 IEEE Aerospace Conference**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8.

BOYLESTAD, R. **Introdução a análise de circuitos**. 12. ed. [S.l.: s.n.], 2011. 976 p.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria decircuitos**. 11. ed. [S.l.]: Pearson Universidades, 2013.

BULGARELLI, R. Motores eficientes na indústria. **Revista controle e instrumentação**, Editora Valete, v. 211, p. 42–45, 2015.

CARLI, L. de et al. Maximizing the power conversion efficiency of ultra-low-voltage CMOS multi-stage rectifiers. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 4, p. 967–975, apr 2015.

DELONG, B.; CHEN, C. C.; VOLAKIS, J. L. Wireless energy harvesting for medical applications. In: **IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION & USNC/URSI NATIONAL RADIO SCIENCE MEETING**. Vancouver: [s.n.], 2015. p. 1.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2019**. 2019. 254 p.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C. **Máquinas elétricas**. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2006. 648 p.

GARG, N.; GARG, R. Energy harvesting in iot devices: A survey. In: **2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SUSTAINABLE SYSTEMS(ICISS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 127–131.

HARB, A. Energy harvesting: state-of-the-art. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, out. 2011.

HART, D. **Eletrônica de Potência**. [S.l.: s.n.], 2011. 496 p.

HOROWITZ, H.; HILL, W. **A arte da eletrônica: circuitos eletrônicos e microeletrônica**. 3. ed. Porto Alegre: Cambridge University Press, 2017. 1160 p.

INSTITUTE OF PHYSICS. **Energy harvesting**:: what is energy harvesting? 2011. Disponível em: <http://www.iop.org/resources/energy/index.html#2>. Acesso em: 18 set. 2018.

KITAIN, L. **Digital Twin**:: the new age of manufacturing. 2018. Disponível em: <https://medium.com/datadriveninvestor/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313>. Acesso em: 30 mar. 2020.

LECOINTE, J. et al. Energy harvesting from the external magnetic flux generated by ac electrical rotating machines. In: **Przegląd Elektrotechniczny**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 94–97.

LEONI, A. et al. A combined 90/900 mhz ic architecture for smart tag application. **Journal of Communications Software and Systems**, v. 14, p. 27–32, 03 2018.

LINEAR TECHNOLOGY. **Ultra-low voltage step-up converter and power manager**. [S.l.], 2010.

MACHADO, M. B. et al. 10 mv – 1v step-up converter for energy harvesting applications. In: **2014 27th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)**. Aracaju: [s.n.], 2014. p. 1–5.

MARTINS, T. **Desenvolvimento do payload de harvesting de energiatermoelétrica para microssatélites**. 75 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MASOUDINEJAD, M. et al. Average modelling of state-of-the-art ultra-low power energy harvesting converter ic. In: **2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 99–104.

MATIAS, R.; CUNHA, B.; MARTINS, R. Modeling inductive coupling for wireless power transfer to integrated circuits. In: **2013 IEE WIRELESSPOWER TRANSFER**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 198–201.

PRUDENTE, M. et al. Voltage multiplier cells applied to non-isolated dc–dc converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 2, p. 871–887, 2008.

RANI, S.; SHARMA, S. A novel method for solar energy harvesting method based on optimization. **International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology**, v. 3, p. 415–422, 2017.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2014. 880 p.

STRATAKOS, A. J. **High-efficiency low-voltage DC-DC conversion for portable applications**. 1998. 245 p.

SUNITA, R.; SHAVET, S. A novel method for solar energy harvesting method based on optimization. **International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology**, v. 3, p. 415–422, 2017.

TASNEEM, N. T.; SURI, S. R.; MAHBUB, I. A low-power cmos voltage boosting rectifier for wireless power transfer applications. In: **2018 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

TAYLOR, C. **Understanding low-power IC design techniques**. 2013. Disponível em: <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21798160/understanding-lowpower-ic-design-techniques>. Acesso em: 8 jul. 2020.

WEG. **Por que o motor elétrico é tão importante?** 2018. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/por-que-o-motor-eletrico-e-tao-importante/>. Acesso em: 31 mar. 2020.

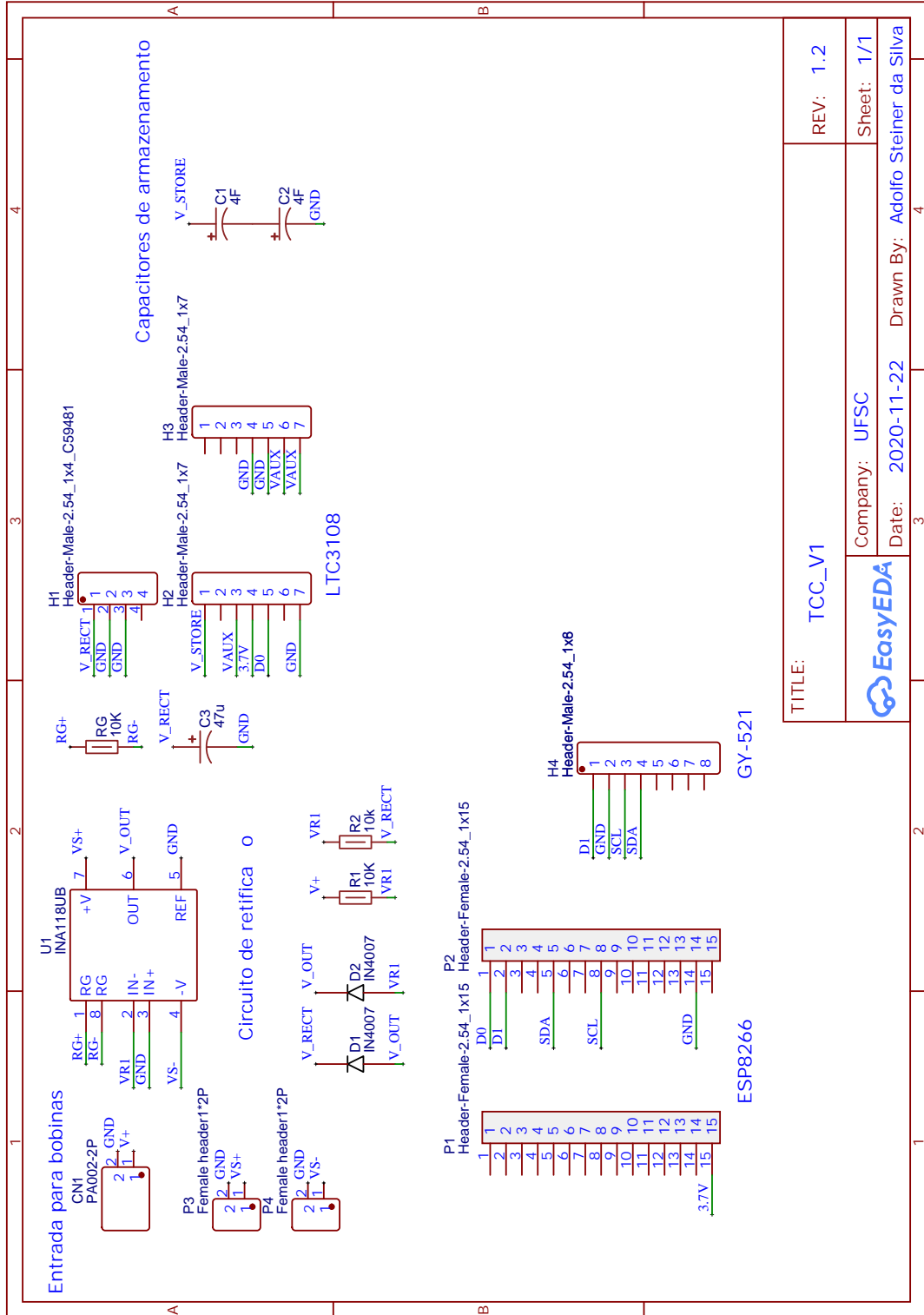
WEG. **Indústria 4.0 pode mudar o cenário do consumo de energia no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/08/05/industria-4-0-pode-mudar-o-cenario-do-consumo-de-energia-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 1 abr. 2020.


WEG. **WEG Motor Scan**: pronto para a indústria 4.0. Jaraguá do Sul, 2020.

WHEELER, H. A. Simple inductance formulas for radio coils. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 16, n. 10, p. 1398–1400, 1928.

YILDIZ, F. **Potential ambient energy-harvesting sources and techniques**. 2009.

APÊNDICE A - ESQUEMÁTICO DA PCB DO SISTEMA COMPLETO



TITLE: TCC_V1	REV: 1.2
 EasyEDA	Company: UFSC
Date: 2020-11-22	Sheet: 1/1
Drawn By: Adolfo Steiner da Silva	

APÊNDICE B - BOM DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Part	Package	Description	Cost (R\$)
CN1	Terminal	Screw Terminal	1,20
U1	SOIC8	Operational Amplifier INA118UB	3,18
U2	Header Female 2.54 2x7 1x4	MCU-3108	20,91
U3	Header Male 2.54 2x15	Módulo Lua ESP8266	12,24
U4	MIL-STD-202	LPR6235-752SMR	6,07
U5	Header Male 2.54 1x8	GY-521	3,60
C1	CAP-TH-26mm	Supercap 4F 5,5V	3,06
C2	CAP-TH-26mm	Supercap 4F 5,5V	3,06
C3	CAP-TH-2mm	Capacitor 47 μF	1,50
RG	RES-TH-10.5mm	Resistor 10k Ω	0,10
R1	RES-TH-10.5mm	Resistor 10k Ω	0,10
R2	RES-TH-10.5mm	Resistor 10k Ω	0,10
D1	RES-TH-10.5mm	Diodo IN4007	0,10
D2	RES-TH-10.5mm	Diodo IN4007	0,10
H1	Header Male 2.54 1x4	Header Male 4 pinos 2,54mm	0,20
H2	Header Male 2.54 1x7	Header Male 7 pinos 2,54mm	0,30
H3	Header Male 2.54 1x7	Header Male 7 pinos 2,54mm	0,30
H4	Header Male 2.54 1x8	Header Male 8 pinos 2,54mm	0,35
P1	Header Female 2.54 1x15	Header Female 15 pinos 2,54mm	0,50
P2	Header Female 2.54 1x15	Header Female 15 pinos 2,54mm	0,50
P3	Header Female 2.54 1x2	Header Female 2 pinos 2,54mm	0,05
P4	Header Female 2.54 1x2	Header Female 2 pinos 2,54mm	0,05
Wire	Wire	Copper Wire AWG 35	5,00

APÊNDICE C - ALGORÍTMO UTILIZADO PARA CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS

```

1 %Calculo indutancia de bobina nucleo ar
2
3 clear all;
4 clc;
5
6 display('Calculo de indutancia das bobinas de teste')
7 display('Informacoes das bobinas')
8
9 fprintf('Bobina\tBitola do Fio\tRaio Interno\tRaio Externo\tNumero de
      Espiras\tComprimento\n');
10 fprintf('(a)\tAWG 35\t\t20mm\t\t22.5mm\t\t300\t\t\t4mm\n');
11 fprintf('(b)\tAWG 35\t\t15mm\t\t17mm\t\t300\t\t\t3.5mm\n');
12 fprintf('(c)\tAWG 35\t\t10mm\t\t12.5mm\t\t300\t\t\t4mm\n');
13 fprintf('(d)\tAWG 30\t\t15mm\t\t17.5mm\t\t200\t\t\t5mm\n');
14 fprintf('(e)\tAWG 35\t\t15mm\t\t17mm\t\t200\t\t\t3.5mm\n');
15
16 function Lw = L_calc(bobina)
17     rm = (bobina(2)+bobina(3))/2;
18     Lw = (31.5*bobina(1)^2*rm^2)/(6*rm+9*bobina(4)+10*(bobina(3)-bobina
      (2)));
19 endfunction
20 bobina_a = [300 20E-3 22.5E-3 4E-3];
21 bobina_b = [300 15E-3 17E-3 3.5E-3];
22 bobina_c = [300 10E-3 12.5E-3 4E-3];
23 bobina_d = [200 15E-3 17.5E-3 5E-3];
24 bobina_e = [200 15E-3 17E-3 3.5E-3];
25
26 display('Valores de indutancia calculados')
27 fprintf('Indutancia (a): %f microhenries\n',L_calc(bobina_a))
28 fprintf('Indutancia (b): %f microhenries\n',L_calc(bobina_b))
29 fprintf('Indutancia (c): %f microhenries\n',L_calc(bobina_c))
30 fprintf('Indutancia (d): %f microhenries\n',L_calc(bobina_d))
31 fprintf('Indutancia (e): %f microhenries\n',L_calc(bobina_e))

```