

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA  
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

**ALEXANDRE FIGUEIREDO CARVALHO  
LUCAS MARTINS MILLÉO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA A  
PARTIR DE UM SENSOR DE EFEITO HALL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**ALEXANDRE FIGUEIREDO CARVALHO  
LUCAS MARTINS MILLÉO**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA A  
PARTIR DE UM SENSOR EFEITO HALL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção de título de Tecnólogo em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro

**PONTA GROSSA**

**2017**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Ponta Grossa  
DAELE – Departamento de Eletrônica



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE UM SENSOR DE EFEITO HALL

Desenvolvido por:

ALEXANDRE FIGUEIREDO CARVALHO  
LUCAS MARTINS MILLÉO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 12 de dezembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial. Os candidatos foram arguidos pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Dr. Marcio Mendes Casaro  
Professor Orientador

---

Dr. Frederic Conrad Janzen  
Membro titular

---

Ms. Felipe Mezzadri  
Membro titular

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na Secretaria Acadêmica -

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus, por nos proporcionar a experiência da vida, por ser essencial em nossos passos, apoio e referência nos momentos de dúvida, e às nossas famílias.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro a Deus, razão da nossa existência. Aos nossos pais, e filhos pelo amor, incentivo e apoio incondicional. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade do aprendizado durante a realização do curso. Ao professor Márcio Mendes Casaro, pela orientação, apoio e confiança.

“Os Momentos difíceis são oportunidades de crescimento, as provações enaltecem as virtudes do forte, as mais altas conquistas são para os bravos e tenazes.”  
(CARVALHO, Alexandre, 2017)

## RESUMO

CARVALHO, Alexandre F.; MILLÉO, Lucas M. **Desenvolvimento de sensor de corrente elétrica a partir de um sensor de Efeito Hall**. 2017. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnólogo em Automação Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Neste trabalho, desenvolveu-se um sensor de corrente, galvanicamente isolado. Através de uma bobina enrolada em um núcleo toroidal, com entreferro de dois milímetros. Uma corrente monitorada produz um campo magnético que excita um sensor de Efeito Hall linear. No pino de saída deste sensor de Efeito Hall, obtém-se uma tensão de 0 a 5V que reflete a corrente monitorada. Foram analisadas as leis de Ampère e de Faraday, o que permitiu o desenvolvimento de um procedimento de projeto do elemento magnético. Um protótipo para monitoramento de correntes de até 10A foi elaborado. Resultados práticos demonstraram a precisão dos cálculos.

**Palavras-chave:** Sensor de Corrente. Efeito Hall.

## ABSTRACT

CARVALHO, Alexandre F.; MILLÉO, Lucas M. ***Development of an electric current sensor from a Hall effect sensor.*** 2017. 39 p. *Course Conclusion Paper in Industrial Automation, Technologist's Degree - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.* Ponta Grossa, 2017.

*In this project, a galvanically isolated sensor was developed. Through a coil wound on a toroidal core, with a gap of two millimeters. A monitored current produces a field that excites a linear Hall-Effect sensor. At the output pin of this Hall-effect sensor, a voltage of 0 to 5V is obtained which reflects the monitored current. The Laws of Ampère and Faraday were analyzed, what allowed developing a project procedure of the magnetic element. A prototype for current monitoring up to 10A was elaborated. Practical results demonstrated the calculations accuracy.*

**Keywords:** *Current sensor. Hall Effect.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio do Efeito Hall.....	18
Figura 2 - Sensor linear de Efeito Hall A1302 .....	20
Figura 3 - Circuito físico.....	30
Figura 4 - Tensão do sensor de Efeito Hall sem campo magnético. ....	31
Figura 5 - Entreferro do núcleo toroidal.....	32
Figura 6 - Enrolamento das espiras no núcleo toroidal. ....	33
Figura 7 - Esquemático elétrico do circuito final. ....	33
Figura 8 - Circuito físico final.....	34
Figura 9 - Valor de tensão na saída do sensor X corrente na bobina .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do sensor linear de Efeito Hall A1302.....	20
Tabela 2– Comparativo entre núcleos.....	23

## LISTA DE SIGLAS

HP	<i>Horse-Power</i>
DCCT	<i>Direct-Current Current Transformer</i>
CT	<i>Current Transformer</i>
DDP	Diferença de Potencial
BW	<i>Output Bandwidth</i>
VCC	Tensão de corrente contínua
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
FMM	Força Magnetomotriz
$I_p$	Corrente de pico
$V_p$	Tensão de pico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i$	Corrente
$B$	Campo Magnético
$p_n$	Número de cargas carregadas por volume
$q$	Magnitude de carga
$t$	Largura do condutor
$\text{kHz}$	Kilohertz – mil hertz. Hertz é unidade de frequência
$\text{mV/G}$	Milivolt por Gauss. Volt é unidade de tensão elétrica
$\Delta\phi$	Variação do fluxo magnético
$\Delta t$	Variação do tempo
$E$	Força eletromotriz
$N$	Número de espiras

$\Pi$	Constante matemática
$\mu_0$	Permeabilidade no vácuo
MHz	MegaHertz – Um milhão de hertz
Ae	Área efetiva
$\emptyset$	Fluxo magnético
T	Tesla
G	Gauss
$\mu$	Permeabilidade do meio
$\mu_r$	Permeabilidade relativa
H	Intensidade magnética
Hg	Intensidade magnética no entreferro
Oe	Oersted
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro-quadrado – Unidade de área
A	Ampère
Hz	Hertz. Unidade de frequência
le	Comprimento efetivo
lg	Comprimento do entreferro
Ag	Área do entreferro
Bg	Campo magnético no entreferro
$\emptyset_g$	Fluxo magnético no entreferro
Rm	Relutância do material
Rg	Relutância do entreferro
$\Omega$	Ohm. Unidade de resistência elétrica
k $\Omega$	Kiloohm – Mil ohms
$\mu$ F	Microfarad – um milionésimo de farad. Farad é a unidade de capacitância elétrica

k	kilo
V	Volt. Unidade de tensão elétrica
mA	Miliampère – um milésimo de ampère

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 TEMA .....	15
1.1.1 Delimitação do tema .....	15
1.2 PROBLEMA .....	15
1.3 HIPÓTESE .....	16
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.4.1 Objetivo Geral .....	16
1.4.2 Objetivos Específicos .....	16
1.5 JUSTIFICATIVA .....	17
<b>2 EFEITO HALL</b> .....	<b>18</b>
2.1 SENSOR LINEAR DE CORRENTE DE EFEITO HALL .....	19
2.1.1 Sensor Linear de Corrente de Efeito Hall A1302KUA-T .....	19
2.2 LEI DE FARADAY .....	21
2.3 LEI DE LENZ .....	21
2.4 LEI DE AMPÈRE .....	21
2.5 NÚCLEOS MAGNÉTICOS .....	22
2.6 NÚCLEO TOROIDAL .....	23
<b>3 PROCEDIMENTO DO PROJETO</b> .....	<b>26</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
4.1 TESTE DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE EFEITO HALL .....	30
4.2 ABERTURA DO ENTREFERRO DO NÚCLEO TOROIDAL .....	31
4.3 ENROLAMENTO DAS ESPIRAS NO NÚCLEO TOROIDAL .....	32
4.4 CIRCUITO FINAL .....	33
<b>5 ANÁLISES DOS RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria e em vários projetos, o monitoramento de equipamentos e componentes é quase sempre necessário. Para isso, grande quantidade de sensores é utilizada para a coleta de dados e monitoramento constante.

Para atender esta demanda, é importante a utilização da eletrônica de potência, pois, esta converge e combina os circuitos de potência e controle em um só sistema.

Assim:

A eletrônica de potência encontra aplicações em qualquer campo que requeira conversão e controle de potência elétrica. Os sistemas de eletrônica de potência são, portanto, encontrados em uma grande quantidade de equipamentos industriais ou eletrodomésticos – de motores pequenos com menos de 1 HP, usados em eletrodomésticos, a acionadores industriais com centenas de HP. (AHMED, 2000)

Na eletrônica de potência, circuitos de potência são recorrentes e utilizam níveis de energia que componentes eletrônicos e de controle não suportariam. Desta forma, foram desenvolvidos sensores a fim de assegurar que estes circuitos com componentes sensíveis às altas tensões e correntes não fossem danificados. Além disso, é utilizada para o desenvolvimento de controle de malhas, como por exemplo, as fontes de tensão chaveadas com suas saídas reguladas, que só são possíveis devido à malha de controle alimentada por sensores isolados.

Na área das medições, o desenvolvimento de diferentes tipos de sensores de corrente é fundamental devido as suas isolações galvânicas, ou seja, não possuem interação física entre o componente a ser medido e o sensor.

Os sensores de corrente de alta precisão são bastante utilizados na eletrônica de potência tendo em vista a precisão e o isolamento do circuito de comando com o de potência. Alguns dos sensores utilizados são os DCCTs, de Efeito Hall, CTs e Rogowsky e o de efeito magnético por transformador de corrente, cada um com características distintas, e a tipo do sensor é decidido pela necessidade do projeto, como range, saída, precisão, etc.

O sensor linear de corrente baseado no Efeito Hall é o foco deste trabalho, por ser utilizado em sensores de corrente com grande dificuldade de acesso e elevado preço no mercado, sendo comercializado nacionalmente com características limitadas por algumas empresas.

Desta forma, este trabalho propõe analisar o modo de operação do sensor de corrente a partir de um sensor de Efeito Hall a fim de resolver o problema de acessibilidade e preço.

## 1.1 TEMA

Desenvolvimento de um sensor de corrente contínua e alternada a partir de um sensor de Efeito Hall, isolado galvanicamente.

### 1.1.1 Delimitação do tema

O trabalho centraliza-se na área de eletrônica de potência e o desenvolvimento de um sensor de corrente contínua e alternada a partir de um sensor de Efeito Hall operando com sinais analógicos.

## 1.2 PROBLEMA

Os sensores de corrente isolados galvanicamente, estão sendo cada vez mais utilizados em projetos que requerem isolamento do circuito de comando/eletrônico com o de potência devido à sensibilidade destes componentes às altas tensões e correntes.

Os sensores de corrente de Efeito Hall são exemplos de sensores que se encaixam perfeitamente nesta situação. Porém, são sensores difíceis de encontrar em território brasileiro, tendo em vista, serem fabricados em sua maioria, por empresas estrangeiras que não possuem unidades no Brasil. Isto faz com que os sensores enviados ao Brasil não sejam de todos os modelos disponíveis; além da demora do envio de modelos novos, as taxas e tributações adicionadas ao produto na chegada ao território brasileiro acabam encarecendo o valor do respectivo produto.

Algumas empresas brasileiras situadas em capitais como Porto Alegre e São Paulo produzem esses tipos de sensores. Contudo, possuem poucos modelos e características limitadas, não alcançando os níveis de precisão e range máximo de corrente almejados, além disso a maior parte destas empresas vendem apenas em grandes quantidades e somente às empresas, excluindo assim pesquisadores, professores, alunos ou qualquer outra pessoa que tenha interesse em seus sensores.

### 1.3 HIPÓTESE

Propõe-se ao final deste trabalho produzir um sensor de corrente contínua e alternada a partir de um sensor de Efeito Hall isolado galvanicamente.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um sensor de corrente contínua e alternada a partir de um sensor de Efeito Hall.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver saídas de tensão e corrente;
2. Desenvolver isolamento galvânico;
3. Monitorar correntes contínuas e alternadas



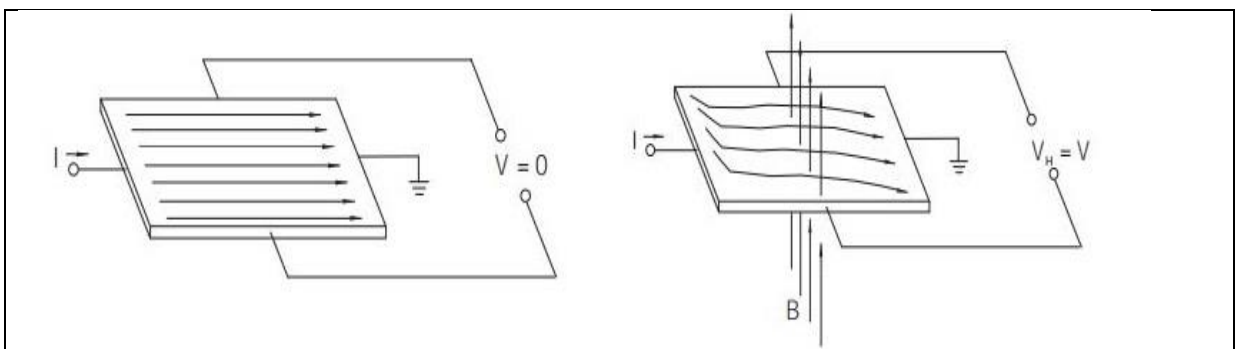
## 1.5 JUSTIFICATIVA

Criar um sensor de preço acessível a qualquer pessoa, pesquisadores ou instituições educacionais que tenham interesse em estudar/pesquisar o domínio da tecnologia e que necessitem de medições de corrente de um dispositivo isolado galvanicamente.

## 2 EFEITO HALL

Honeywell (2016) explica que o Efeito Hall, é o princípio no qual um condutor retangular com um fluxo de corrente é atravessado por um campo magnético perpendicular, os elétrons desviados para as extremidades do condutor são perpendiculares ao sentido da corrente, gerando assim, uma tensão nestas extremidades conhecida como Tensão de Hall, conforme a ilustração abaixo:

Figura 1 – Princípio do Efeito Hall



Autoria: Honeywell (2016)

Isto ocorre devido a força de Lorentz que atua sobre os elétrons em transporte pelo condutor, onde uma carga  $Q$ , com velocidade  $V$ , dentro de um campo magnético  $B$ , sofrerá uma força  $F$ , assim essa força causará um distúrbio na distribuição dos elétrons de modo que esses se desloquem para uma das extremidades do condutor, de acordo com a regra da mão esquerda. (Honeywell, 2016). Essa tensão gerada é resultante da equação (1):

$$V_H = \frac{I \times B_{\perp}}{p_n \times q \times t} \quad (1)$$

Onde  $V_H$  é a tensão de Hall;  $I$  é a corrente que flui pelo condutor;  $B$  é o campo magnético;  $p_n$  é o número de cargas carregadas por volume;  $q$  é a magnitude das cargas e  $t$  é a largura do condutor.

## 2.1 SENSOR LINEAR DE CORRENTE DE EFEITO HALL

Os sensores lineares de corrente baseados no Efeito Hall são dispositivos capazes de monitorar correntes contínuas e alternadas sem a necessidade de interação física entre o circuito de monitoramento e o circuito de força a ser monitorado, denominado isolamento galvânico. Alguns destes sensores são capazes de monitorar correntes em circuitos de frequência de 0 até 100kHz, sem haver qualquer tipo de desgaste por atrito mecânico, além de ser imune a contaminantes ambientais devido ao seu isolamento galvânico, sua construção de estado sólido e seu encapsulamento, vedando-o totalmente do ambiente externo.

A sua tensão de saída é proporcional ao campo magnético ao qual o sensor está exposto. Esta tensão poderá ser positiva ou negativa de acordo com o deslocamento no espaço do gerador do campo magnético ou o sentido da corrente, caso esta seja o gerador do campo magnético.

Shaun Milano (2017), da Allegro MicroSystem LCC, fabricante do sensor de Efeito Hall, que será utilizado como modelo de referência neste trabalho, relata que seus sensores possuem sua estrutura construída com substratos de silício, sendo dopados com diferentes materiais para criar regiões tipo *N* e tipo *P*, compondo os componentes ativos e passivos do circuito integrado e os conectando eletricamente através de depósitos de metal nas geometrias descritas.

### 2.1.1 Sensor Linear de Corrente de Efeito Hall A1302KUA-T

O sensor linear de Efeito Hall A1302KUA-T foi escolhido para ser usado no trabalho por possuir um baixo custo e as características necessárias para o projeto. Conforme o *Datasheet*, do seu fabricante a Allegro MicroSystem LCC, este sensor provê uma saída de tensão em estado de repouso (sem exposição a qualquer campo magnético) de 50% da tensão de alimentação, a sensibilidade de tensão de saída é de 1,3mV/G quando exposto ao campo, e largura máxima de banda de saída de 20kHz. (MILANO, Shaun, 2017).

Integrado ao seu circuito estão o elemento Hall, um amplificador linear e uma estrutura de saída CMOS Classe A. Além de suportar temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $125^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 2 - Sensor linear de Efeito Hall A1302**



**Autoria: Allegro MicroSystem LCC (2017)**

A Tabela 1 mostra as principais características do sensor linear de Efeito Hall A1302:

**Tabela 1 – Características do sensor linear de Efeito Hall A1302**

Características	Símbolo	Condições de Teste	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
<b>Características Elétricas</b>						
Tensão de Alimentação	VCC	Rodando, $T_j < 165^{\circ}\text{C}$	4.5	-	6	V
Corrente de Alimentação	Icc	Saída aberta	-	-	11	mA
Tensão de Saída	Vout (Alto)	Isource = -1mA, Sens = Normal	4.65	4.7	-	V
	Vout (Baixo)	I <sub>sink</sub> =1mA, Sens = normal	-	0.2	0.25	V
Largura de Banda de Saída	BW		-	20	-	KHz
Resistência de Saída	Rout	I <sub>sink</sub> ≤ 1mA, I <sub>source</sub> ≥ -1mA	-	2	5	Ω
<b>Características Magnéticas</b>						
Tensão de Saída em Repouso	Voutq	B = 0G; Ta = 25°C	2.4	2.5	2.6	V
Sensibilidade Magnética	Sens		1.0	1.3	1.6	mV/G

**Autoria: Adaptado de Allegro MicroSystem, LCC (2017).**

## 2.2 LEI DE FARADAY

De acordo com SILVA (2017), a lei de Faraday demonstra a relação entre a variação de um fluxo magnético entre os instantes do tempo  $t_0$  e  $t_1$  com a DDP induzida em uma espira, e pode ser modelada matematicamente como mostra a equação (2):

$$\varepsilon = \frac{-\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde  $\varepsilon$  = força eletromotriz;  $\Delta\phi$ = variação do fluxo magnético e;  $\Delta t$  = variação do tempo.

Nota-se que a Lei de Faraday não determina o sentido da corrente elétrica, mas sim apenas calcula a força eletromotriz induzida, que no sistema internacional é dada em Volts (V).

## 2.3 LEI DE LENZ

SILVA (2017) diz que Lenz solucionou a questão da falta de definição do sentido da corrente elétrica induzida na Lei de Faraday. Ao realizar estudos e experimentos, Lenz descobriu que ao aproximar-se um campo magnético de uma bobina, surge nesta, uma corrente elétrica induzida, que por vez cria um campo magnético que se opõe a variação do fluxo. Simplificando, caso haja uma diminuição do fluxo magnético, será criado um campo magnético com o mesmo sentido do fluxo, caso contrário, o campo magnético criado terá o sentido oposto ao fluxo magnético.

## 2.4 LEI DE AMPÈRE

Segundo SILVA (2017), depois que Hans Cristian Orsted comprovou a existência de um campo magnético em volta de um condutor conduzindo uma corrente elétrica, André Marie Ampère foi o primeiro a deduzir matematicamente esta descoberta, originando assim a Lei de Ampère. Suas experiências mostraram que a circulação de  $\vec{B}$  ao longo de uma curva C é proporcional a intensidade de corrente I

que atravessa a curva (também denominada circuito amperiano). A Lei de Ampère, na forma integral, pode ser escrita de acordo com a equação (3):

$$\oint_C B \times dl = \mu_0 \times I \quad (3)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo, B é o campo magnético, I é a corrente.

Com esta lei, aplicações onde a simetria permite, são possíveis de ser calculadas. Para o cálculo de um campo magnético de um núcleo toroidal, foco desta seção, deve-se levar em conta que o campo magnético seja tangente à circunferência e que a integral  $\oint B \times dl = B(2\pi r)$ . Além disto, a corrente interior total delimitada pelo caminho é  $I_e = N \times I$ , onde N é o número total de espiras no núcleo toroidal.

Assim, têm-se:

$$B(2\pi r) = \mu_0 \times N \times I \quad (4)$$

Isolando a indução magnética B na equação (5), resulta-se:

$$B = \frac{\mu_0 \times N \times I}{2\pi r} \quad (5)$$

## 2.5 NÚCLEOS MAGNÉTICOS

Os núcleos magnéticos são utilizados em qualquer projeto de um componente eletrônico devido suas propriedades magnéticas.

A função de um núcleo magnético é de concentrar as linhas de forças do campo magnético. (BRAGA, 2015). Suas estruturas evitam que as linhas de força “escapem” no espaço, assim aumentando a indutância no circuito.

Existem diversos tipos de núcleos magnéticos como os POT, E, EC, ETD, EER, EP e toróide, e cada um com suas características próprias, conforme demonstra a tabela 2:

**Tabela 2– Comparativo entre núcleos**

NÚCLEO						
	POT	E	EC,ETD e EER	PQ	EP	TORÓIDE
Custo do Núcleo	Alto	Baixo	Médio	Alto	Médio	Baixo
Custo da bobina	Baixo	Baixo	Médio	Alto	Alto	Baixo
Custo do processo de enrolamento	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
Flexibilidade ao enrolar	Alta	Alta	Alta	Média	Média	-
Montagem	Fácil	Médio	Médio	Fácil	Fácil	Fácil
Dissipação de calor	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Média
Blindagem	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média

**Autoria: Adaptado de Newton C. Braga (2015)**

Para cada tipo de aplicação deve ser usado o material apropriado. Existe uma grande variedade de tipos, cujas composições vão determinar as suas características magnéticas. Apesar de haver uma padronização quanto a designação, muitos fabricantes podem adotar nomes próprios para designar seus materiais. (BRAGA, 2015). Existem os núcleos de Ferrite Macia, Manganês-Zinco, Ferro-Silício, Ferro-Cobalto, Ferro-Níquel ou Ferro em Pó.

Conforme explica (BRAGA, 2015), outros tipos de materiais são usados para a fabricação dos núcleos classificados no grupo dos “ferrites”, podendo ser citados o MPP, contendo 81% níquel, 2% de molibdênio e 17% ferro, sendo muito utilizado para a fabricação de núcleos toroidais, o Hi-Flux composto de 50% níquel e 50% de ferro, utilizados para armazenamento de energia e por fim o Super MSS, popular na fabricação para filtro EMI.

## 2.6 NÚCLEO TOROIDAL

Os núcleos toroidais são utilizados principalmente em indutores e transformadores devido aos seus rendimentos e tamanhos. Algumas vantagens do núcleo toroidal, são:

1. Alta indutância;
2. Largura de banda de 20kHz a 3MHz;
3. Variada gama de permeabilidade;
4. Diversos tamanhos e características;
5. Baixo custo;
6. Montagem facilitada.

Porém, tem como desvantagens a indutância que não pode ser variada e uma certa sensibilidade térmica.

Na prática encontramos indutores e transformadores com núcleos toroidais que vão desde pequenos indutores de alguns milímetros de diâmetro, usados em filtros e circuitos de altas frequências, até transformadores pesados de vários quilogramas usados em fontes de alimentação de alta potência. (BRAGA, 2015)

Suas aplicações vão depender do material que os compõem. Por exemplo, os núcleos toroidais de ferrites são ideais para circuitos de banda larga devido sua alta permeabilidade, ou seja, possuir uma indutância mais alta com um menor número de espiras.

O núcleo toroidal possui uma área na sua seção transversal que é dada por  $A_e$ , que é uma abreviação de área efetiva do núcleo magnético por onde passa o fluxo  $\Phi$ . A relação entre o fluxo magnético e esta área define a indução magnética ou densidade de fluxo,  $B$ . A partir da equação (7):

$$B = \frac{\Phi}{A_e} \quad (7)$$

Uma relação conhecida é dada pela equação (8)

$$B = \mu \times H \quad (8)$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio. Normalmente, se utiliza a permeabilidade magnética relativa, que corresponde à permeabilidade do meio em relação à permeabilidade do vácuo:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (9)$$

Sendo a permeabilidade do vácuo:



$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$$

Deste modo, isolando o  $\mu$  na equação (9) e substituindo-o na equação (8), pode-se obter:

$$B = \mu_r \times \mu_0 \times H \quad (10)$$

### 3 PROCEDIMENTO DO PROJETO

O sensor de Efeito Hall mede o campo magnético produzido pela corrente monitorada. Deve-se projetar o sensor de corrente para que a curva de magnetização B x H do núcleo toroidal opere numa região linear, longe da saturação.

Sabemos que o sensor de Efeito Hall A1302KUA-T possui sensibilidade magnética de 1,3mV para 1 Gauss. Sabemos também que a tensão de alimentação será feita em 5V e que o sensor sob um campo magnético possui uma tensão de saída igual a 50% da tensão de alimentação. Deste modo, a indução necessária para levar a saída do sensor a variação máxima (0 a 5V) é dada por uma simples regra de três:

$$\frac{1G - 1,3mV}{X - 2,5V}$$

Resolvendo esta regra de três simples, encontramos o resultado de:

$$X = \frac{1 \times 2,5}{0,0013} = 1923G$$

Pela curva B x H do fabricante do núcleo toroidal Thornton, o núcleo atinge essa indução (ou densidade de fluxo) com cerca de 0,5Oe. Essa intensidade de campo magnético (H) no sistema MKS é dada por:

$$\frac{1A/m - 1,257 \times 10^{-7} Oe}{X - 0,5 Oe}$$

$$X = \frac{1 \times 0,5}{1,257 \times 10^{-7}} = 40A/m$$

Definido o sensor magnético de Efeito Hall, chega-se ao valor da densidade de fluxo necessária no entreferro para a sua operação. As dimensões do sensor de Efeito Hall servirão para especificar o comprimento necessário do entreferro (lg).

A amplitude máxima e a frequência máxima da corrente que se pretende monitorar corresponde aos dados principais para a caracterização do sensor.

Observa-se que a frequência máxima da corrente está limitada à largura de faixa de saída BW [Hz], à qual o sensor responde.

A máxima corrente eficaz resulta na área necessária de cobre para suportá-la. Mais de um fio em paralelo pode ser necessário na confecção do condutor, levando-se em conta o efeito pelicular.

O diâmetro máximo que um fio deve ter é dado por:

$$d = \frac{15}{\sqrt{f}} [cm] \quad (11)$$

Onde  $f$  é a frequência máxima da largura de banda de saída do Efeito Hall.

Para se evitar o aquecimento no cobre, pode-se adotar a máxima densidade de corrente em:

$$J = 250 \text{ A/cm}^2$$

Para este projeto, foi adotada a corrente alternada de pico ( $I_p$ ) igual a 10A, e o sensor de Efeito Hall A1302KUA-T com uma frequência máxima de largura de banda de saída (BW) de 20 kHz. A densidade do fluxo para o adequado funcionamento do sensor de Efeito Hall ( $B_g$ ) deve ser igual a 0,2T para que se utilize o range total do sensor, que é de 0 a 5V.

Para a área do condutor, a bitola mínima deverá ser:

$$A_c = \frac{I_p}{J} = \frac{10}{250} = 0,04 \text{ cm}^2 \quad (12)$$

Utilizando a equação (11), descobrimos que o diâmetro máximo do condutor deverá ser:

$$d = \frac{15}{\sqrt{20 \times 10^3}} = 0,106 \text{ cm}$$

Então:

$$A_{fio} = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cong 0,00823 \text{ cm}^2 \quad (13)$$

Deste modo, como  $A_c > A_{fio}$ , serão necessários fios em paralelo para compor o condutor. O fio 18AWG apresenta diâmetro de 0,102cm e área da seção transversal de cobre de 0,00823cm<sup>2</sup>. Assim, esse é o fio que será adotado para compor o condutor. A quantidade de fios em paralelo é dada por:

$$nf = \frac{Ac}{AWG18} = \frac{0,04}{0,008231} \cong 4,9 \quad (14)$$

São adotados 5 fios em paralelo para compor o condutor. Após isto, abre-se um entreferro de 2mm no núcleo toroidal, para acomodar o sensor de Efeito Hall.

Para se calcular o número de espiras, deve-se lembrar da Lei de Ampère, e aplicá-la no núcleo toroidal com o entreferro, assim:

$$H \times le + Hg \times lg = N \times i \quad (15)$$

Sabe-se que o campo magnético no núcleo toroidal é igual ao produto da permeabilidade do núcleo [ $\mu$ ] pela intensidade do campo magnético [H]. Assim acontece com o entreferro, porém, substituindo a permeabilidade do núcleo para a permeabilidade do vácuo e a intensidade do campo magnético no entreferro. Para o fluxo magnético, seu valor será igual tanto para o núcleo quanto para o entreferro. (BRAGA, 20-?). Assim:

$$B = \mu \times H \quad (16)$$

Isolando o H e Hg das equações (15) e (16) e substituindo o resultado na equação desenvolvida, tem-se:

$$\frac{B}{\mu} \times le + \frac{Bg}{\mu_0} \times lg = N \times i \quad (17)$$

Reescrevendo o B e Bg da equação (17) como  $\frac{\phi}{Ae}$  e  $\frac{\phi}{Ag}$ , respectivamente, obtêm-se:

$$\frac{\phi \times le}{Ae \times \mu} + \frac{\phi \times lg}{Ag \times \mu_0} = N \times i \quad (18)$$

Percebe-se que  $\frac{le}{Ae \times \mu} + \frac{lg}{Ag \times \mu_0}$  é a relutância magnética do circuito, como medida de oposição a concentração das linhas de forças do campo magnético atuante. Isolando o  $\phi$ , está equação pode ser reescrita como:

$$\phi \times (Rm + Rg) = N \times i \quad (19)$$

Os núcleos de ferrite da Thorton, construídos com material IP12, apresentam permeabilidade  $\mu$  de pelo menos 2000 vezes maior que a permeabilidade do entreferro, onde  $\mu \cong \mu_0$ . Assim, embora  $Lg \ll le$ , a relutância do entreferro resulta muito superior à relutância do ferrite. Portanto, pode-se escrever:

$$\emptyset \times Rg = N \times i \quad (20)$$

Reescrevendo novamente a relutância como a área efetiva no entreferro dividida pela permeabilidade do vácuo e multiplicada pela área do entreferro, e o  $\emptyset$  como o campo magnético no entreferro ( $Bg$ ) sobre a área e isolando o número de espiras enroladas no núcleo toroidal, obtêm-se:

$$N = \frac{lg \times Bg}{\mu_0 \times i} \quad (21)$$

Substituindo os valores da equação pelos valores já conhecidos, pode-se encontrar:

$$N = \frac{2 \times 10^{-3} \times 0,2}{4\pi \times 10^{-7} \times 10} \approx 32 \text{ espiras}$$

## 4 RESULTADOS

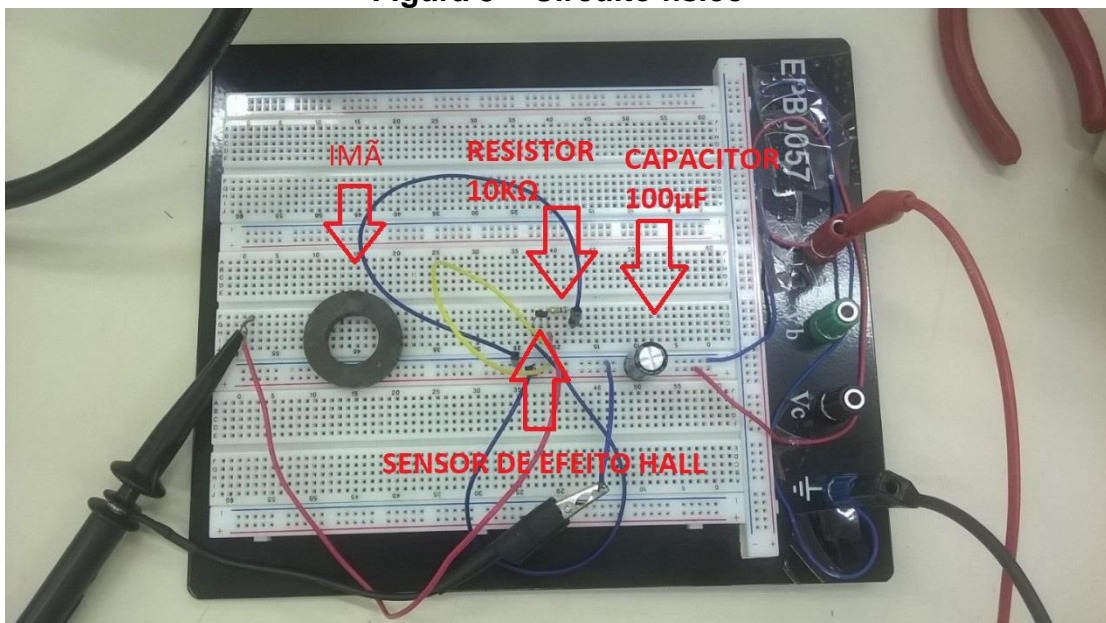
### 4.1 TESTE DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE EFEITO HALL

Teste realizado para verificar se o sensor de Efeito Hall A1302KUA-T realmente apresenta tensão de saída igual a 50% do valor da tensão de alimentação ( $V_{cc}$ ), sem estar submetido a um campo magnético.

O material utilizado para este teste foi o sensor de Efeito Hall A1302-T, um capacitor de  $100\mu F$ , uma fonte de tensão  $V_{cc}$  regulada em 5V modelo PS-5000, um resistor de  $10k\Omega$ , um *protoboard* EPB0057, um osciloscópio Teltronix, fios condutores para conexão no *protoboard* e um ímã comum com seu campo magnético gerado desconhecido.

Os materiais mencionados acima foram dispostos em um circuito elétrico conforme a Figura 3:

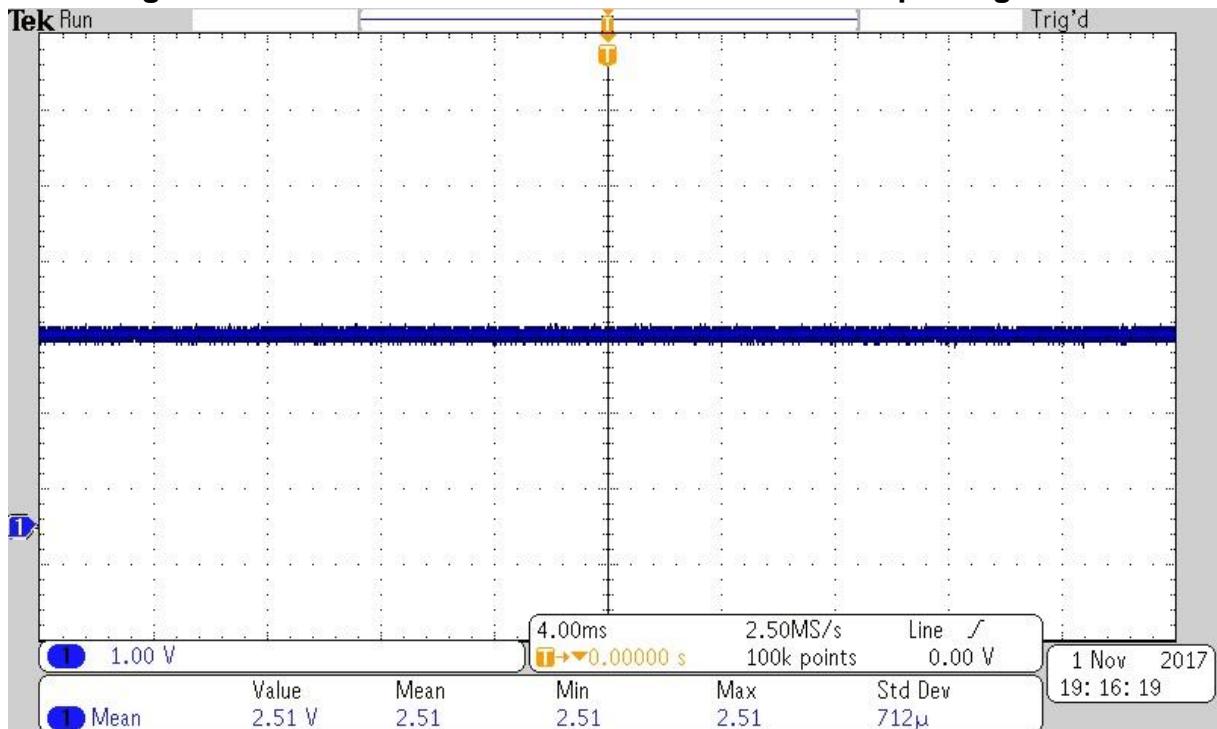
**Figura 3 – Circuito físico**



**Autoria: Autoria própria.**

Após conectado o circuito à fonte  $V_{cc}$  em 5V, foi medida a tensão de saída do sensor através do osciloscópio e verificou-se um valor de 2,51V, comprovando as informações do *datasheet* do sensor de Efeito Hall onde especifica uma tensão de 50% da tensão de alimentação do circuito sem a ação de um campo magnético.

**Figura 4 - Tensão do sensor de Efeito Hall sem campo magnético.**



**Fonte: Autoria própria**

Ao aproximar-se o ímã do sensor, verificou-se uma mudança no módulo do valor desta tensão conforme o polo magnético do ímã aplicado, comprovando assim o funcionamento do sensor de Efeito Hall.

## 4.2 ABERTURA DO ENTREFERRO DO NÚCLEO TOROIDAL

Devido às dificuldades em encontrar núcleos toroidais de ferrite com o entreferro no mercado nacional, foi necessária a abertura manual do mesmo. Para isso, primeiramente, buscou-se cortar o núcleo com uma serra manual, mas sem sucesso, pois, o núcleo partiu-se quando submetido ao esforço.

Como segunda alternativa, procurou-se realizar o corte através do processo de eletroerosão, porém, não foi possível devido as propriedades elétricas do ferrite não serem adequadas para tal processo, sendo o ferrite um péssimo condutor elétrico.

Por fim, com a ajuda de um funcionário da instituição, o corte do entreferro foi realizado com um disco de corte diamantado de espessura de 0,8mm no laboratório de mecânica da instituição UTFPR. Porém, o corte de 0,8mm realizado pelo disco não foi suficiente para a inserção do sensor de Efeito Hall devido a sua espessura

de 1,5mm. Deste modo, realizou-se o desgaste de forma manual com uma lixa de granulação 100, até ser atingida a espessura maior do que a do sensor, deixando as superfícies do entreferro não paralelas devido a forma artesanal de execução.

**Figura 5 - Entreferro do núcleo toroidal.**



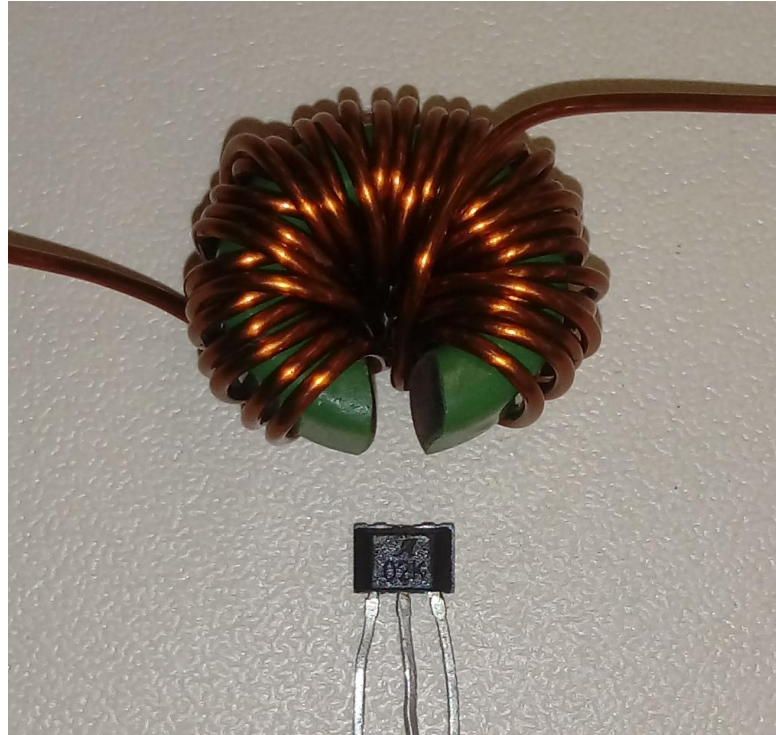
**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3 ENROLAMENTO DAS ESPIRAS NO NÚCLEO TOROIDAL

O enrolamento foi feito de forma manual, utilizando o fio 18 AWG conforme os cálculos realizados no procedimento do projeto citado na seção 3 deste trabalho. Devido ao perímetro do toróide ser pequeno e a espessura do fio um tanto larga para a situação, algumas espiras ficaram com diâmetro maior do que outras.



**Figura 6 - Enrolamento das espiras no núcleo toroidal.**

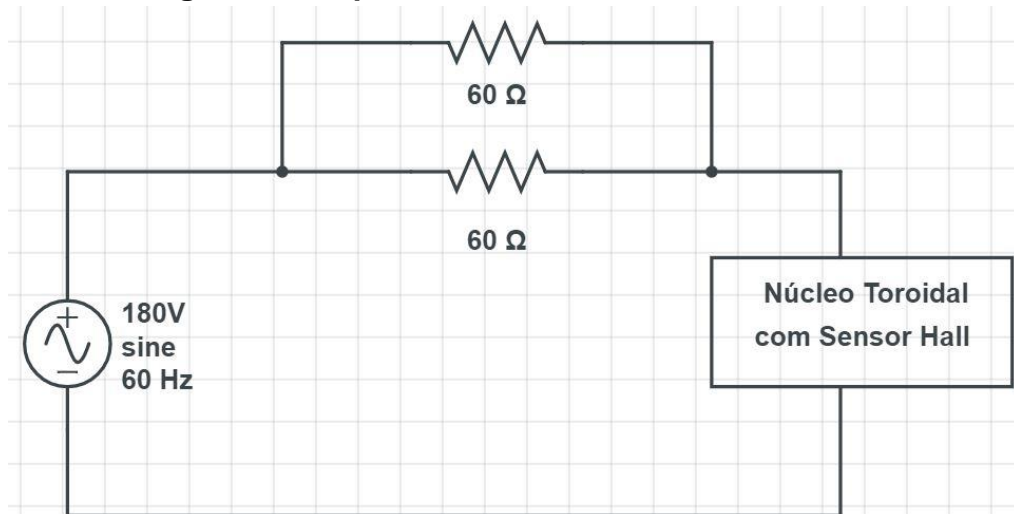


**Fonte: Autoria própria**

#### 4.4 CIRCUITO FINAL

Para o circuito final, seria necessário adicionar um resistor de 18 ohms para limitar a corrente de pico ( $I_p$ ) em 10A. Contudo, pela falta deste resistor no laboratório onde estava-se elaborando o projeto, foi necessário utilizar dois resistores de 60 ohms cada para atingir a corrente de pico supracitada. Deste modo, o esquema elétrico do circuito do projeto ficou como ilustrado na figura abaixo:

**Figura 7 - Esquemático elétrico do circuito final.**



**Fonte: Autoria própria**

Onde a fonte de alimentação de tensão ilustrada na figura acima é a própria rede elétrica da instituição, sendo utilizado a tomada para realizar a conexão.

**Figura 8 - Circuito físico final.**



**Fonte: Autoria própria**

## 5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Durante o teste prático, percebeu-se que com a abertura do entreferro, seria necessário um FMM muito maior para obter a mesma indução de 0,2T. Neste caso, um sensor de tensão seria inviável com o sensor de Efeito Hall A1302KUA-T, pois a corrente  $I_p$  seria limitada em torno de 1mA em um resistor em série com a bobina. Assim, para alcançar a densidade de fluxo desejada, seriam necessários milhares de espiras.

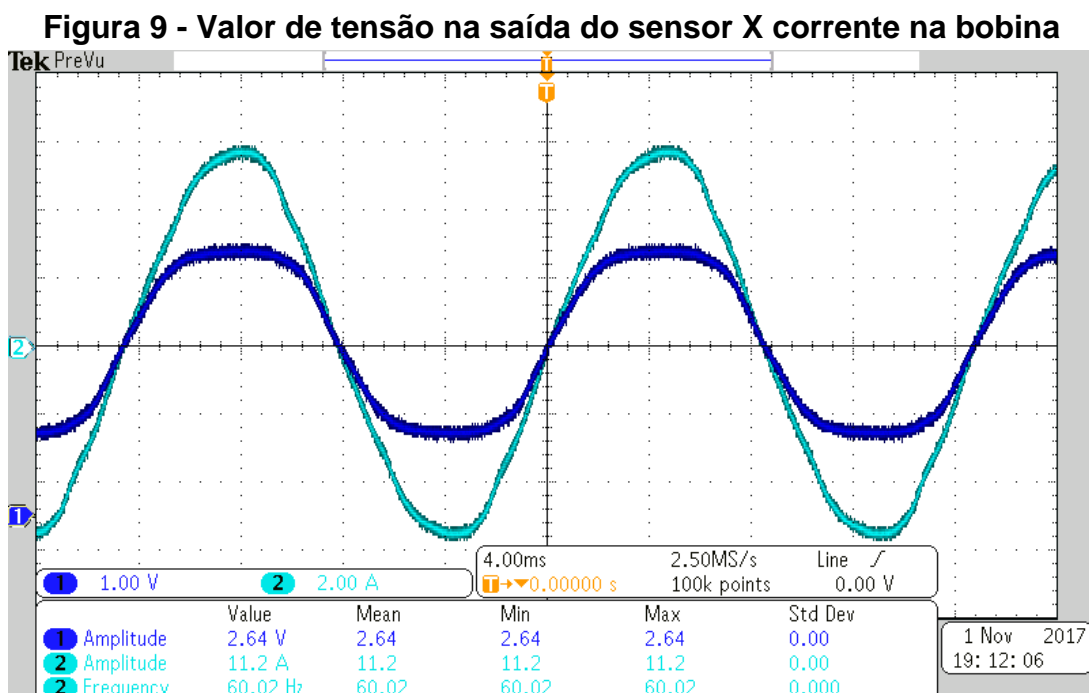
Deste modo, foi reduzida a corrente  $I_p$  para 5,6A e realizado o cálculo da máxima indução magnética. Tendo como resultado:

$$\frac{32 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5,6}{2 \times 10^{-3}} = 0,118T$$

Assim, de acordo com a sensibilidade do sensor de 1,3mV/G:

$$\begin{aligned} 1G &= 1,3mV \\ 0,118 \times 10^4 &= X \end{aligned}$$

Chegou-se ao valor de  $X = 1,43Vp$ . Como a ondulação da corrente foi medida em 11,2A de pico a pico, a modulação da tensão na saída do sensor deveria ser de 2,86V pico a pico, porém, o que se obteve na prática foi 2,64V como mostra a figura abaixo:



Fonte: Autoria própria

O que resulta em uma diferença percentual dada por,  $DP = \frac{(2,86-2,64)}{2,86} \times 100 = 7,7\%$  do valor calculado.

## 6 CONCLUSÃO

Houve uma discrepância entre o resultado medido e o resultado dos cálculos devido à realização da abertura e a ampliação artesanal do entreferro, além do enrolamento manual das espiras no núcleo, justificada pelas razões comentadas nas seções 4.1.2 e 4.1.3 deste trabalho. Outro aspecto que influenciou para a diferença do resultado foi causado pela área do sensor de efeito hall em relação a área do núcleo toroidal, onde a do sensor é menor, deste modo, não recebendo todas as linhas de força que atravessam o entreferro do núcleo toroidal. Além disto, a abertura manual do entreferro fez com que as superfícies ficassem irregulares, causando assim o espraiamento das linhas de força, diminuindo ainda mais o campo induzido que atravessa o sensor de efeito hall.

Para um monitoramento de correntes acima de 10A, a substituição do sensor A1302 pelo A1309 do mesmo fabricante, supracitado, seria uma opção, pois, este possui uma sensibilidade magnética de 9mV/G, maior do que a sensibilidade magnética daquele.

Deste modo, a construção do sensor foi um sucesso, apesar das dificuldades enfrentadas, com um custo total de R\$ 25,50 (vinte e cinco reais e cinquenta centavos). Contudo, não foram encontrados sensores com características semelhantes para comparações de custo e precisão.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. [S. l.]: Pearson Education do Brasil, 2000. 479 p.

HONEYWELL (Illinois). **Hall Effect Sensing and Application**. Freeport: Honeywell Inc., 2016. 121 p. Disponível em: <[sensing.honeywell.com/Hallbook.pdf](http://sensing.honeywell.com/Hallbook.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2017.

CLARK, Richard. **Air gapped magnetic cores**. Disponível em: <<http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/gap/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

BRAGA, Instituto Newton C. **Como funcionam os sensores de Efeito Hall**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-Hall-art1050>>. Acesso em: 02 mar. 2017.

ELETRONIC TUTORIALS. **HallEffect Sensor**. Disponível em: <<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/Hall-effect.html>>. Acesso em: 15 mar. 2017

BRAGA, Instituto Newton C. **Como funcionam os toroides**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4097-art560>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

BRAGA, Instituto Newton C.. **Conheça os núcleos magnéticos**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/5348-art703>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

THORNTON. **MATERIAIS IP12R**. Disponível em: <[http://www.thornton.com.br/materiais\\_ip12r.htm](http://www.thornton.com.br/materiais_ip12r.htm)>. Acesso em: 26 set. 2017.

THORNTON. **Produtos**. Disponível em:  
<<http://www.thornton.com.br/produtos/nt.htm>>. Acesso em: 26 set. 2017.

MILANO, Shaun. **Allegro Hall-Effect Sensor ICs**. Disponível em:  
<<http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Allegro-Hall-Effect-Sensor-ICs.aspx>>. Acesso em: 02 out. 2017.

NEIS, Paulo. **Sensores de Corrente por Efeito Hall**. Disponível em:  
<<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/neis/index.html>>. Acesso em: 17 out. 2017.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Lei de Ampère**. Disponível em:  
<<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/lei-ampere.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Lei de Faraday**. Disponível em:  
<<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/lei-faraday.htm>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

SÓFÍSICA. **Lei de Lenz**. Disponível em:  
<<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/InducaoMagnetica/leidelenz.php>>. Acesso em: 10 nov. 2017.