

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Eric Spat Schwingel

**TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA DE UM  
INDUTOR EM CIRCUITOS INTEGRADOS**

Santa Maria, RS  
2022

**Eric Spat Schwingel**

**TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM UM INDUTOR EM  
CIRCUITOS INTEGRADOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Aita

Santa Maria, RS  
2022

**Eric Spat Schwingel**

**TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM UM INDUTOR EM  
CIRCUITOS INTEGRADOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

**Aprovado em 25 de fevereiro de 2022:**

---

**André Luiz Aita, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Cristiane Cauduro Gastaldini, Dra. (UFSM)**

---

**Fabio Ecke Bisogno, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## RESUMO

### TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM UM INDUTOR EM CIRCUITOS INTEGRADOS

AUTOR: Eric Spat Schwingel  
ORIENTADOR: André Luiz Aita

A medição acurada de corrente elétrica é, cada vez mais, um requisito em uma variada gama de circuitos e dispositivos. Seja em uma aplicação de microeletrônica ou eletrônica de potência, seja com a finalidade de monitoramento, proteção ou otimização, a aferição correta da corrente elétrica, principalmente a de pequenos valores, representa não apenas uma solução, mas também um desafio, visto que em algumas aplicações não é uma possibilidade a utilização de equipamento próprio para medição como, por exemplo, amperímetros ou multímetros.

Este trabalho busca trazer uma breve apresentação de alguns dos principais métodos utilizados para medição de corrente. Listar seus pontos fortes e seus pontos fracos, bem como casos de aplicação. Comentar de maneira mais detalhada o método do resistor em série e, por fim, apresentar e analisar os dados obtidos em laboratório de um experimento prático onde foi utilizado o amplificador de instrumentação INA118P para amplificar, em múltiplos valores de ganho, o sinal de diferentes níveis de tensão em um resistor *shunt* com o intuito de calcular a corrente elétrica que o percorre.

**Palavras-chave:** Amplificador de Instrumentação. Medição de corrente. Método de medição de corrente. Resistor em série.

## ABSTRACT

### TECHNIQUES FOR CURRENT SENSING IN AN INDUCTOR

AUTOR: Eric Spat Schwingel  
ORIENTADOR: André Luiz Aita

The accurate measurement of electrical current is widely required in many circuits and applications. Whether in microelectronics or power electronics applications, either for monitoring, protection, or optimization purposes, the correct measurement of electric current, especially those of small values, represents not only a solution, but also a challenge, since in some applications it is not possible to use proper measurement equipment.

This work seeks to bring a brief presentation of some of the main methods used for current measurement. List their strengths and weaknesses, as well as application cases. This work will address in more detail the series sense resistor method and, finally, present and analyze the data of a practical experiment obtained in the electronics laboratory where the instrumentation amplifier INA118P was used to amplify, in multiple gain values, the signal of different levels of voltage across a shunt resistor in order to calculate the electric current flowing through it.

**Keywords:** Instrumentation Amplifier. Current Sensing Techniques. Current Sensing. Series Resistor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sensor de efeito Hall desenvolve uma tensão a partir do desvio da corrente causada por um campo magnético.....	14
Figura 2 - Esquema de funcionamento do medidor de corrente por efeito Hall que normalmente requer um amplificador .....	15
Figura 3 - Concentrador de campo magnético para um sensor de efeito Hall.....	17
Figura 4 - Utilização de MOSFET para medição de corrente. ....	18
Figura 5 - Bobina de Rogowski. ....	20
Figura 6 - Esquema construtivo do transformador de corrente. ....	21
Figura 7 - Esquema de funcionamento do método do resistor em série. A tensão $V_{RES}$ é proporcional à corrente $I$ .....	23
Figura 8 - Configuração de pinos do CI INA118P .....	28
Figura 9 - Topologia do CI INA118P, da fabricante Texas Instruments.....	28
Figura 10 - Circuito utilizado no experimento prático. A corrente $I$ que circula por $R_s$ produz uma tensão $V_S$ que é observada pelo amplificador.....	29
Figura 11 - Medição dos resistores .....	30
Figura 12 – Comparação $V_{OUT}$ x $i_{in}$ para valores de ganho teórico e valores medidos em laboratório.....	33

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Comparação de largura de banda entre sensores de corrente de efeito Hall disponíveis comercialmente. ....	16
Tabela 2- Comparação dos métodos de medição de corrente.....	24
Tabela 3 - Dados obtidos no experimento prático com o amplificador de instrumentação na 118p .....	32
Tabela 4 - Valores obtidos para os ganhos de 89,92 e 1075,57.....	34

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
CI	Circuito Integrado
IoT	Internet of Things
DC	Direct Current
AC	Alternating Currente
$R_S$	Resistor <i>Shunt</i>
$R_G$	Resistor de Ganho
ppm	Partes por milhão
PCI	Placa de circuito impresso
$V_H$	Tensão Hall
$R_{DS}$	Resistência (dreno à fonte)
$V_G$	Tensão de Gate
nMOS	nFET Metal Oxide Silicon
$V_{GS}$	Tensão (gate à fonte)
$I_D$	Corrente de dreno



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	10
1.2	OBJETIVOS .....	11
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
<b>2</b>	<b>MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE.....</b>	<b>13</b>
2.1	MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR CAMPO MAGNÉTICO .....	13
<b>2.1.1</b>	<b>Sensor de Corrente de Efeito Hall .....</b>	<b>13</b>
2.2	MEDIÇÃO DE CORRENTE UTILIZANDO UM MOSFET .....	17
2.3	MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR BOBINA DE ROGOWSKI .....	19
2.4	TRANSFORMADOR DE CORRENTE .....	20
<b>3</b>	<b>MÉTODO DO RESISTOR EM SÉRIE.....</b>	<b>23</b>
3.1	RESISTOR SHUNT .....	25
3.2	MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE UTILIZANDO RESISTÊNCIA DE COBRE .....	25
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTO PRÁTICO UTILIZANDO O AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO INA118P .....</b>	<b>27</b>
4.1	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO .....	27
4.2	METODOLOGIA .....	29
<b>4.2.1</b>	<b>Metodologia das Medições.....</b>	<b>30</b>
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	31
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante o breve período de tempo em que conhecemos e estudamos a microeletrônica, os avanços desta área são visíveis nas últimas décadas. Como o próprio nome sugere, esta ramificação da eletrônica tem como objetivo a integração miniaturizada de circuitos eletrônicos. Recentemente esta tendência à miniaturização de componentes eletrônicos atingiu a grande façanha da produção de um transistor com apenas 2 nanômetros de comprimento. Este processo de diminuição do tamanho de componentes e circuitos têm como principal objetivo a redução da necessidade de espaço físico para a acomodação de um determinado dispositivo eletrônico. Esta aparentemente perpétua tendência a tamanhos microscópicos ocasiona, também, novos desafios na medição de parâmetros importantes em um circuito eletrônico. Se desejamos, por exemplo, determinar tensão em um certo componente presente em um circuito elétrico habitual, basta a utilização de um multímetro com as ponteiros inseridas nos terminais de tal componente e teremos a leitura da diferença de potencial. Muito diferente é a situação em um circuito microscópico, onde a tentativa de medição de tensão utilizando um multímetro convencional é simplesmente impraticável e, poderia inclusive, danificar o circuito.

Para contornar tais dificuldades é necessário que novos métodos e tecnologias de medição avancem de maneira tão rápida quanto os outros tantos ramos da microeletrônica. Medir de maneira precisa informações como tensão e corrente de componentes específicos de circuitos microscópicos é, além de desafiador, necessário para a manutenção, funcionamento e otimização destes circuitos.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Como já foi evidenciado, desde o surgimento da área da microeletrônica, há um processo constante de diminuição do tamanho dos componentes e circuitos eletrônicos. É almejado que este processo continue e que no futuro, talvez muito próximo, possamos desfrutar de tecnologia e dispositivos hoje inconcebíveis. Para que isso ocorra constitui uma parte fundamental desse processo que, junto com o avanço da miniaturização de componentes, o avanço na tecnologia de medição de grandezas elétricas, como por exemplo a corrente elétrica, a ser empregada nestes circuitos cada vez menores, avance junto. Tecnologias de medição de corrente elétrica são uma peça-chave importante para a criação de sistemas de controle de precisão presentes nos mais variados circuitos, como aplicações biomédicas, dispositivos pessoais, como *smartwatches* e *smartphones*, aplicações em IoT (internet of things). Não há

como se obter precisão sem realizar uma medição e, sem precisão, não há como projetar um circuito eficiente.

“Ao longo das últimas cinco décadas, a microeletrônica revolucionou nossas vidas. Há alguns anos, telefones celulares, câmeras digitais, computadores portáteis e muitos outros produtos eletrônicos estavam além do reino das possibilidades; hoje, fazem parte de nossa vida cotidiana.

Aprender microeletrônica pode ser divertido. À medida que aprendemos como cada dispositivo funciona, como os dispositivos contêm circuitos que executam funções interessantes e úteis, e como os circuitos formam sistemas sofisticados, começamos a ver a beleza da microeletrônica e a entender as razões de seu crescimento exponencial.” (RAZAVI, 2006, p 1).

## 1.2 OBJETIVOS

O trabalho realizado tem como objetivo apresentar alguns dos métodos existentes de medição de corrente. A intenção é, em um primeiro momento, pesquisar sobre os diferentes métodos disponíveis para realizar a medição de corrente elétrica em um indutor, preferencialmente inserido em um circuito integrado. Estudo prévio muito importante visto a escassez de material sobre o assunto presente na língua portuguesa. Fazer uma análise dos casos particulares onde a utilização de um determinado método de medição seja mais relevante em relação a outros métodos. Trazer de forma mais detalhada o método do resistor em série. Método que utiliza um resistor em série com um ou mais componentes dos quais se deseja saber o valor da corrente elétricas por eles percorrida.

Por último, o trabalho busca apresentar os resultados obtidos através de um experimento prático de medição de corrente. Utilizando-se um amplificador de instrumentação, neste caso o INA118P, para realizar a amplificação de pequenos valores de tensão em um resistor e então, mensurar o valor da corrente que passa por aquele resistor através da aplicação da Lei de Ohm, uma vez obtido o valor da tensão amplificada.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é segmentado em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo são apresentados a motivação do estudo realizado, os objetivos na realização de sua escrita e os resultados esperados. O segundo capítulo introduz uma revisão de alguns dos métodos existentes para medição de corrente e os seus conceitos fundamentais bem como como as vantagens e desvantagens de sua aplicação. O terceiro capítulo aborda de forma mais detalhada o método que será utilizado no experimento prático: o método do resistor em série. O quarto capítulo trará a metodologia utilizada em um experimento prático realizado no laboratório de eletrônica, os

desafios encontrados e os resultados obtidos. Também apresentará uma análise dos dados e o que eles representam. E, por fim, o último capítulo apresenta a conclusão dos resultados logrados durante a realização do trabalho.

## 2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE

### 2.1 MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR CAMPO MAGNÉTICO

Este método é baseado nas deduções matemáticas de campo eletromagnético da Lei de Ampère. De acordo com ela o campo magnético produzido por um condutor percorrido por corrente elétrica é proporcional a corrente que percorre aquele condutor. Utilizando um sensor magnético, como um sensor de efeito Hall, posicionado apropriadamente próximo ao condutor que se deseja medir a corrente, uma tensão é gerada através deste sensor. Essa tensão de saída é proporcional ao campo magnético emitido pelo condutor e captado pelo sensor. Este método permite uma medição de corrente pouco invasiva, uma vez que o circuito de medição não está diretamente ligado ao circuito que se deseja realizar a medição. Como não há uma conexão direta entre sistema medido e sistema medidor o sistema se mantém isolado, o que torna este tipo de medição uma excelente opção para tensões elevadas, por exemplo acima de 100 V. No passado este tipo de medição só era utilizado para medir correntes acima de 100 A, porém, com avanços tecnológicos na área, foi possível a criação de novos dispositivos que podem medir correntes menores em uma placa de circuito impresso, por exemplo. Mas no caso de micro-circuitos, sua aplicação é restrita.

Para a aplicação deste tipo de medidor de corrente, é importante saber a orientação das linhas de campo magnético. A direção do campo magnético é importante para sensores de corrente magnéticos, uma vez que esses dispositivos tem um eixo de sensibilidade particular. Se a direção do fluxo magnético não está passando por esse eixo sensível a corrente, eles não irão detectar o campo magnético (ou irão detectar mais fracamente), logo, não irão produzir uma tensão proporcional a corrente que se deseja medir. Por exemplo, dispositivos são normalmente sensíveis aos campos perpendiculares aos seus encapsulamentos. Diante disso, esses dispositivos não conseguem realizar a medição de corrente diretamente sobre um condutor de um circuito integrado, já que o campo magnético naquele local seria 0. Essa limitação espacial é um ponto negativo para a utilização deste tipo de medidor de corrente em algumas aplicações onde é necessário a maior otimização de espaço possível.

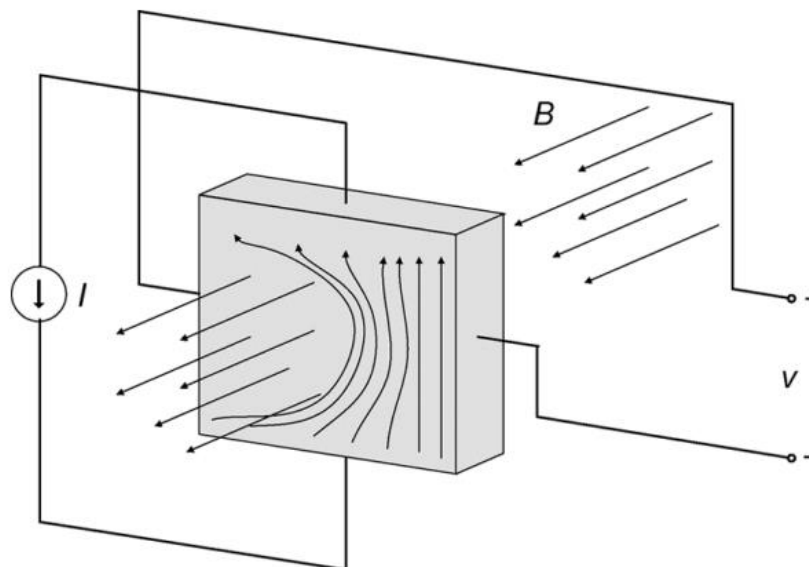
#### 2.1.1 Sensor de Corrente de Efeito Hall

Os sensores de corrente de efeito Hall, como o próprio nome já diz, tem seu princípio fundamental de funcionamento baseado no Efeito Hall. Esse efeito tem como característica gerar uma diferença de potencial, chamada de tensão de Hall, em um determinado condutor

percorrido por corrente quando este é perturbado por um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente. A amplitude da tensão gerada é proporcional à corrente que percorre o condutor e também à densidade de fluxo do campo magnético que o perturba.

A ilustração desse princípio é representada na figura 1. Podemos observar que a corrente  $I$ , que percorre o dispositivo de efeito Hall de baixo para cima, é desviada para a direita ao ser perturbada por um campo magnético  $B$ . Isso produz uma tensão induzida  $V$  no sensor. (MAMMANO, 1997).

Figura 1 - Sensor de efeito Hall desenvolve uma tensão a partir do desvio da corrente causada por um campo magnético.



Fonte: (ZIEGLER, 2009).

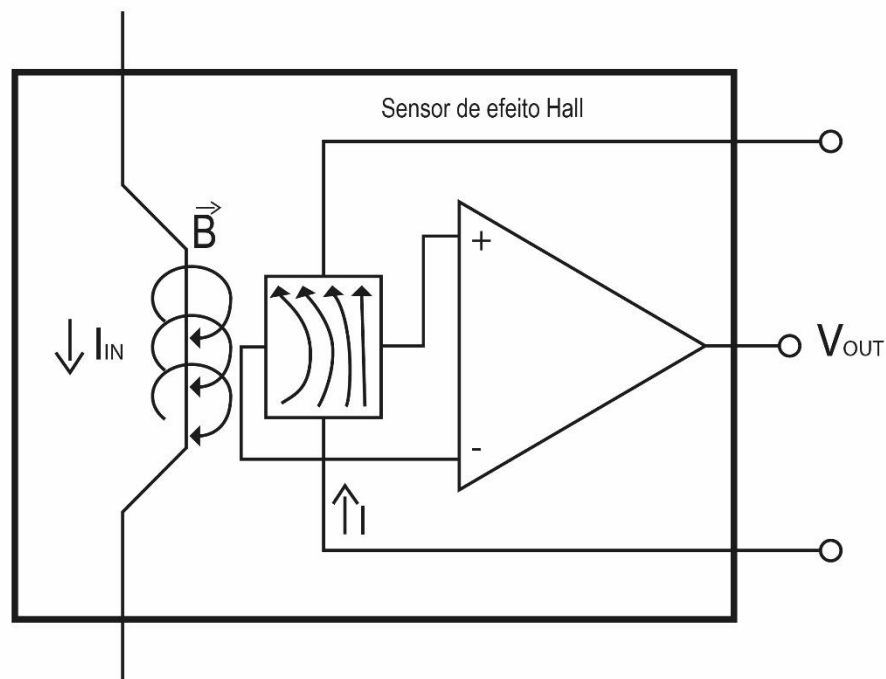
A equação básica que relaciona essas forças e descreve a tensão de saída  $V_H$  de um sensor de corrente de efeito Hall é dada por (1).

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \quad (1)$$

onde  $I$  é a corrente que percorre o sensor de efeito Hall,  $B$  é o fluxo magnético que perturba a corrente no dispositivo e  $K_H$  é o coeficiente (de proporcionalidade) que define a sensibilidade do sensor de corrente, o que inclui parâmetros como mobilidade e resistividade dos elétrons no material semiconductor e também sua geometria.

Como existe uma proporcionalidade entre a amplitude da tensão  $V_H$  gerada no sensor Hall e a densidade de fluxo do campo magnético aplicado ao sensor, é possível realizar a medição da corrente que origina o campo magnético através da tensão gerada no sensor Hall. Essa tensão é, normalmente, muito pequena, fazendo-se necessário a utilização de algum circuito amplificador para possibilitar a medição de corrente, como exibido na figura 2.

Figura 2 - Esquema de funcionamento do medidor de corrente por efeito Hall que normalmente requer um amplificador



Fonte: Autores.

Normalmente este é o método utilizado por osciloscópios para realizar medição de corrente em corrente contínua (FORGHANI-ZADEH, 2006, p 24). Uma das desvantagens do sensor de corrente que opera pelo efeito Hall é a suscetibilidade a interferências causadas por outros campos magnéticos, gerados pela passagem de corrente em um condutor que não se deseja medir a corrente, como por exemplo, algum fio da rede elétrica residencial. Outra desvantagem é a sensibilidade à temperatura do ambiente no qual estão inseridos, uma vez que as características dos materiais envolvidos na construção do sensor dependem da temperatura.

Atualmente já existem sensores de corrente Hall em circuitos integrados que permitem uma maior liberdade de aplicabilidade. Um grande problema é que, normalmente, a sensibilidade para campos magnéticos é baixa. Para corrigir essa situação os projetistas

precisam adicionar alguma forma de concentrar o campo magnético. Em circuitos integrados isso é feito adicionando um percurso em “U” para a corrente que desejamos medir. Em outros casos alguns sensores ainda dependem do uso de um concentrador de campo de núcleo ferromagnético, onde são inseridos em um entreferro para operar, conforme mostrado na figura 3. Essa solução resolve alguns problemas, mas cria outros. Em contrapartida dificulta seu uso em algumas aplicações que necessitam de um alto grau de miniaturização dos seus componentes.

Podem medir correntes alternadas e contínuas e são bastante utilizados para aplicações em conversores AC-DC ou DC-DC. A largura de banda em que estes sensores operam pode ser vista no trabalho recente de (CRESCENTINI, 2021) que traz uma comparação, exposta na tabela 1, entre alguns sensores de corrente de efeito Hall disponíveis comercialmente.

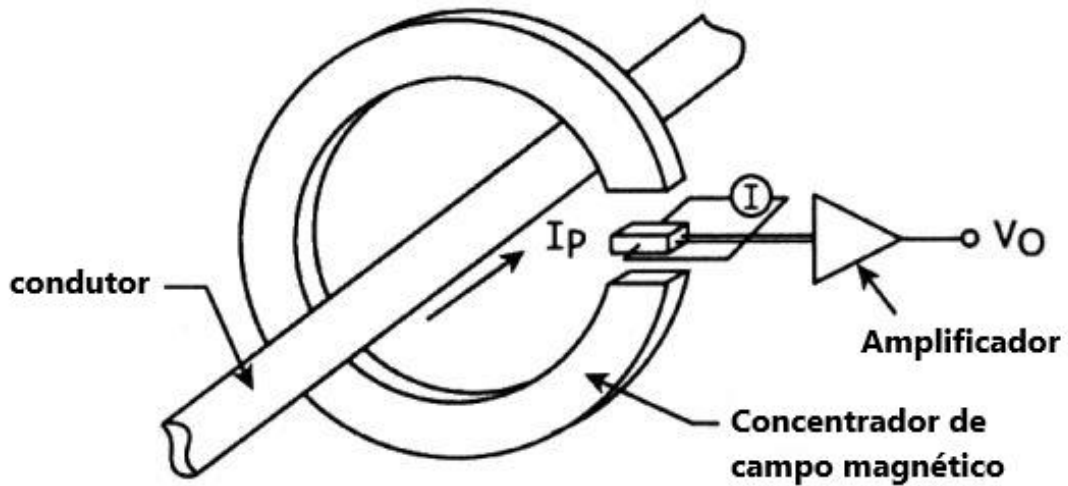
Tabela 1- Comparação de largura de banda entre sensores de corrente de efeito Hall disponíveis comercialmente.

	<b>LEM HO-NP 0100</b>	<b>Allegro ACS732 - 20AB</b>	<b>Melexis MLX 91208</b>	<b>TI TMCS 1100A1</b>
<b>Largura de Banda</b>	350 kHz	1000 kHz	250 kHz	80 kHz

Fonte: Adaptado de (CRESCENTINI, 2021).



Figura 3 - Concentrador de campo magnético para um sensor de efeito Hall.



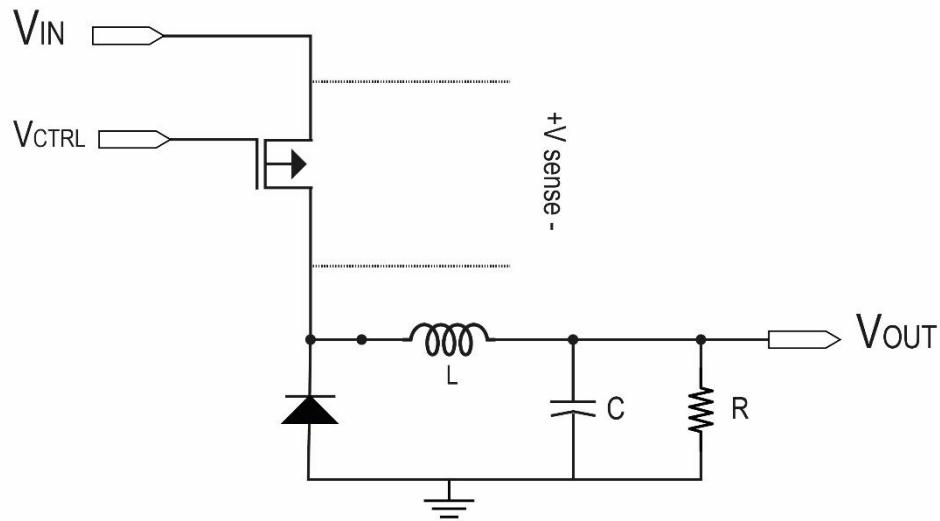
Fonte: Adaptado de (MAMMANO, 1997).

Medidores de corrente pelo efeito hall, por terem um baixo consumo de potência, tamanho compacto, fácil implementação em conversores e imunidade ao ruído elétrico, são muito utilizados na indústria e no meio acadêmico. Dentre suas características estão uma boa precisão, o erro máximo no modelo TMCS1100 da Texas Instruments é de  $\pm 0,9\%$ , largura de banda até 1MHz, porém há pouca variedade de sensores que atuam nessa faixa de frequência disponíveis comercialmente, e possibilidade de serem integrados. (BIGLARBEKIAN, 2016).

## 2.2 MEDIÇÃO DE CORRENTE UTILIZANDO UM MOSFET

Como podemos ver na figura 4, do trabalho de (FORGHANI-ZADEH; RINCÓN-MORA, 2003), é possível realizar a medição de corrente utilizando a resistência entre dreno e fonte de um MOSFET. O método em questão foi utilizado para um conversor DC-DC.

Figura 4 - Utilização de MOSFET para medição de corrente.



Fonte: (FORGHANI-ZADEH; RINCÓN-MORA, 2003).

Para realizar a medição de corrente, o MOSFET precisa estar polarizado para operar na região de trípode, ou região linear. Nesta região, a relação  $I_D \times V_{DS}$  é linear. Ao operar nesta região, o transistor é ligado e o canal criado possibilita o fluxo de corrente elétrica entre fonte e dreno. Quando isso ocorre, o MOSFET opera como um resistor controlado pela tensão de gate com respeito à fonte  $V_{GS}$ . A resistência do MOSFET  $R_{DS}$  é calculada por (2)

$$R_{DS} = \frac{1}{\mu C_{OX} \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_T)} \quad (2)$$

onde  $C_{OX}$  é a capacitância de área do óxido por unidade de área,  $\mu$  é a mobilidade de elétrons (no caso de um transistor nMOS),  $L$  é o comprimento de canal,  $W$  a largura do canal,  $V_{GS}$  é a tensão aplicada ao canal de controle e  $V_T$  a tensão de threshold. Com isso, a corrente vai ser medida a partir do valor da diferença de potencial aplicado entre o dreno e fonte do MOSFET.

Esse método, porém, possui precisão variável, consequência das características lineares da resistência entre dreno e fonte serem vulneráveis a mudanças de temperatura, podendo sofrer uma variação de resistência de 35% para uma variação de 27°C a 100°C (FORGHANI-ZADEH; RINCÓN-MORA, 2003).

### 2.3 MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR BOBINA DE ROGOWSKI

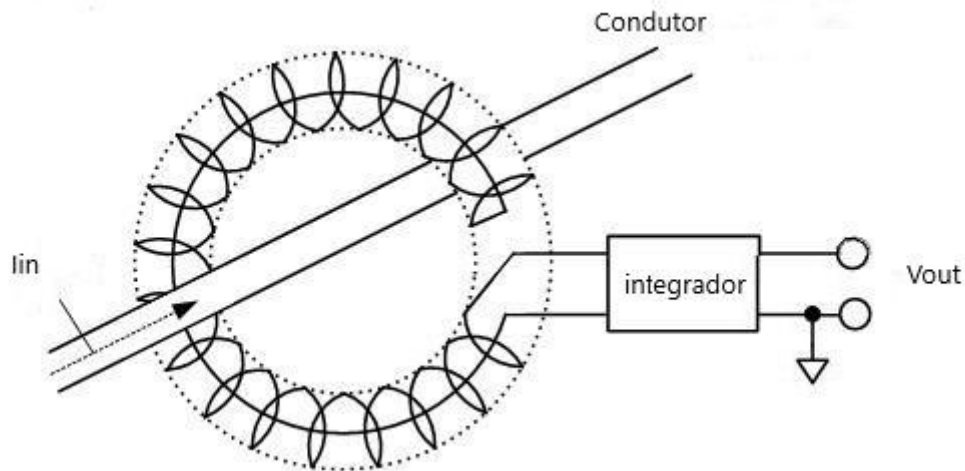
Este método de medição de corrente, baseado na Lei de Faraday, é exclusivo para corrente alternada, utiliza de um dispositivo elétrico chamado de bobina de Rogowski. Possui um formato helicoidal e é, basicamente, um condutor enrolado de maneira uniforme sobre um núcleo de material não magnético com uma das pontas dando a volta pelo centro desse material não condutor, mantendo os dois terminais da bobina no mesmo lado. Quando essa bobina é acoplada em torno de um condutor percorrido por corrente, uma tensão diretamente proporcional é induzida na bobina. Essa tensão gerada varia em relação a dois valores: um deles é a corrente que está percorrendo o condutor que passa pelo meio da bobina de Rogowski, e o outro, a frequência da corrente alternada. Sendo assim, a tensão induzida na bobina é, normalmente, conectada à um circuito eletrônico amplificador integrador, que realiza a soma infinitesimal dos sinais obtidos pela variação do sinal de entrada em um determinado intervalo de tempo. O sinal de saída  $V_{OUT}$  deste integrador é proporcional a corrente que percorre o condutor que está sendo medido.

A diferença de potencial induzida entre os terminais da bobina de Rogowski é dada por (3)

$$V = -N \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \frac{di_C}{dt} \quad (3)$$

onde  $\mu_0$  é a permissividade elétrica no vácuo.  $N$  é o número de espiras da bobina.  $S$  é a área da seção transversal da bobina e  $di_C/dt$  é a derivada da corrente que percorre o condutor a ser medido.

Figura 5 - Bobina de Rogowski.



Fonte: Adaptação de imagem do site da Hioki USA.

Segundo (XIAO, 2004) esse método possui características como:

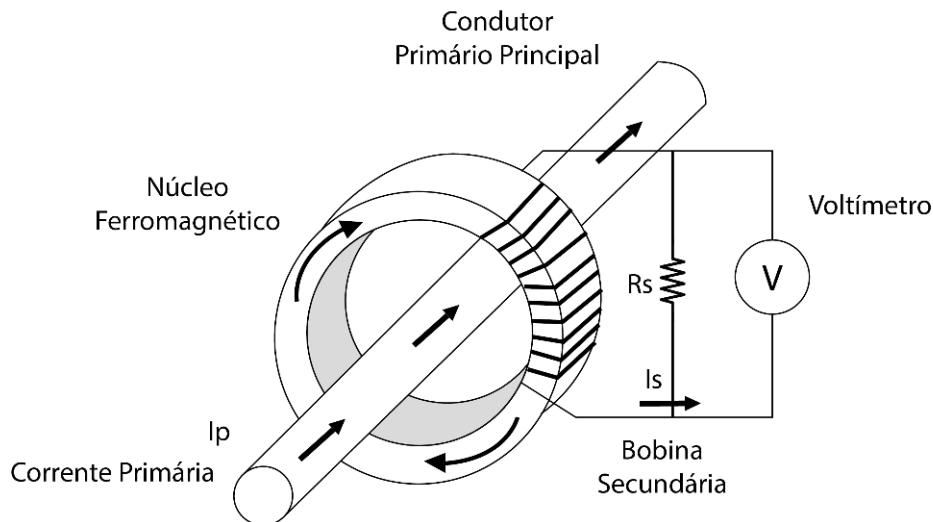
- Capacidade de medição de altas correntes. Uma bobina de mesmo tamanho pode medir correntes de 100A até 100kA;
- Já que seu núcleo não é ferromagnético a bobina de Rogowski pode medir valores elevados de corrente sem sofrer saturação magnética;
- Método de medição não invasivo;
- Fácil de usar e fabricação barata;
- Possui boa linearidade devido à ausência de núcleo ferromagnético;
- Não há aquecimento, saturação ou histerese causada por perda magnética.
- Não é eficaz para mensurar correntes abaixo de 10 A.

## 2.4 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Muito semelhante a bobina de Rogowski, e também utilizando a Lei de Faraday, esse dispositivo apresenta uma diferença simples, porém bastante significativa no método da medida. Diferente da bobina de Rogowski, que não apresenta preenchimento em seu núcleo, o transformador de corrente tem seu núcleo composto de um material ferromagnético que concentra o campo magnético produzido pelo condutor percorrido pela corrente primária  $I_P$ . O enrolamento primário do transformador é conectado em série com o componente cuja corrente se deseja medir. Esse enrolamento pode ser posicionado no centro do núcleo metálico, sem

entrar em contato com o mesmo, ou pode ser envolto nesse núcleo, enquanto o enrolamento secundário é envolvido no núcleo e tem seus terminais conectados a um resistor.

Figura 6 - Esquema construtivo do transformador de corrente.



Fonte: Autores.

Comercialmente os transformadores de corrente têm, como padrão, uma representação fracionária indicando o quanto a corrente do enrolamento primário será rebaixada. Nessa representação o numerador representa o enrolamento primário e o denominador representa o enrolamento secundário. Esse rebaixamento da corrente elétrica é uma característica importante do método de medição por transformador de corrente. Isso possibilita que correntes muito altas sejam medidas por equipamentos que não suportariam tais correntes.

O número de voltas do enrolamento secundário em relação ao enrolamento primário é o que dita a proporção em que a corrente mensurada é atenuada, conforme mostra (4)

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (4)$$

onde  $I_s$  e  $I_p$  são correntes no enrolamento secundário e no enrolamento primário, respectivamente. E  $N_p$  e  $N_s$  são o número de voltas em cada enrolamento.

A diferença de potencial medida nos terminais do segundo enrolamento é um resultado a aplicação da primeira Lei de Ohm e definida pelo resistor *shunt* utilizado. Ela é dada por (5)

$$V_{OUT} = R_S \cdot I_S = R_S \cdot \frac{N_P}{N_S} \cdot I_P \quad (5)$$

onde percebe-se que  $V_{OUT}$  é diretamente proporcional à  $I_P$ .

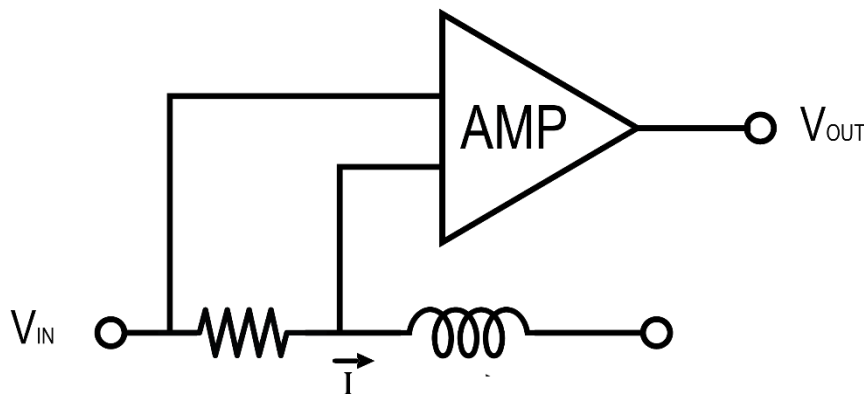
O transformador de corrente mostra-se uma ótima solução para aplicações onde não é possível abrir mão da eficiência energética. Esse método proporciona perdas por dissipação de potência muito menores que outros métodos mais invasivos, como por exemplo, associar um resistor em série. Assim como a bobina de Rogowski o transformador de corrente mede apenas correntes alternadas e, por apresentar um núcleo ferromagnético, sua capacidade de miniaturização fica restringida.

### 3 MÉTODO DO RESISTOR EM SÉRIE

Este é o mais convencional dos métodos de medição de corrente em circuitos integrados. Este método consiste em inserir um resistor em série, que leva o nome de resistor shunt, ou  $R_S$ , no caminho da corrente que percorre o indutor ou outro elemento onde desejamos saber o valor da corrente elétrica. Tendo conhecimento do valor de resistência do resistor shunt, só é necessário realizar a medição da diferença de potencial do mesmo e então extrair o valor da corrente elétrica através da aplicação da Lei de ohm, ou seja,  $V=R_S.I$ .

Como se trata de um método comumente utilizado em aplicações de eletrônica e microeletrônica, o sinal da tensão em  $R_S$  pode ser pequeno demais para ser verificado por aparelhos de medição convencionais. Para isso, utiliza-se um circuito amplificador. Este circuito vai realizar a amplificação da tensão no resistor *shunt*, permitindo uma verificação mais acessível do valor dessa tensão. O esquema básico do método do resistor em série pode ser visto na figura 7.

Figura 7 - Esquema de funcionamento do método do resistor em série. A tensão  $V_{RES}$  é proporcional à corrente  $I$ .



Fonte: Autores.

A utilização deste resistor em série com o indutor traz, inevitavelmente, uma dissipação de potência para o circuito, o que pode acarretar em uma menor eficiência do mesmo. Em uma aplicação do método em conversores DC-DC, onde os valores de corrente são relativamente altos (na ordem de amperes), mesmo um resistor de baixa resistência, como  $0,1\Omega$ , realizando a medição de uma corrente máxima de 1A, pode causar uma dissipação de potência significativa e reduzir a eficiência do circuito em 3,3% (FORGHANI-ZADEH, RINCON-MORA, 2003). A fim de preservar a eficiência é importante definir um resistor *shunt* que atenda às especificações

do projeto. Isto normalmente se reflete em valores de resistência de baixo valor, o que implica em valores de tensão também relativamente baixos, o que impõe a necessidade do amplificador.

Algumas das principais motivações para a utilização deste método são:

- Princípio de operação muito simples;
- Com uma grande largura de banda consegue operar em uma vasta gama de frequências;
- Baixo custo de implementação na maioria das aplicações;
- Realiza a medição de correntes contínuas e alternadas;

Abaixo, algumas das desvantagens de sua utilização:

- Afeta a eficiência do circuito com dissipação de potência que é proporcional ao quadrado da corrente que está sendo medida;
- Devido a essa proporcionalidade entre dissipação de potência e corrente medida torna-se difícil a utilização do método em aplicações com altos valores de corrente.

Referenciando o trabalho de (XIAO, 2004) sobre a integrabilidade de diferentes métodos de medição de corrente para aplicações em eletrônica de potência, os métodos que utilizam um resistor em série para medição de corrente são as melhores opções levando-se em conta o custo de aplicação e eficiência. A tabela 2 mostra um comparativo deste método com outros.

Tabela 2- Comparação dos métodos de medição de corrente.

<b>Método</b>	<b>Custo</b>	<b>Largura de banda</b>	<b>Mede corrente CC?</b>	<b>Linearidade</b>	<b>Integrabilidade</b>	<b>Tecnologia</b>
Shunt	Baixo	CC~10MHz	Sim	Ótima	Excelente	Simple
Rogowski	Baixo	0,1~100Mhz	Não	Ótima	Excelente	Simple
TC	Médio	0,1Hz~100MHz	Não	Boa	Boa	Simple
Hall	Alto	<1Mhz	Sim	Ruim	Boa	Complexa

Fonte: Adaptado de (XIAO, 2004).



### 3.1 RESISTOR SHUNT

Uma parte importante do método do resistor em série para medição de corrente é a definição dos parâmetros desse resistor. A primeira grande definição é, normalmente, o valor da resistência. O valor, em ohms, da resistência do *shunt* deve ser escolhido levando em consideração uma tensão máxima relacionada ao valor máximo da corrente esperada para o circuito em questão. Também é importante levar em conta na escolha do valor da resistência *shunt* a dissipação de potência. Quanto maior o valor do resistor, maior a potência dissipada para uma determinada corrente. Uma escolha incorreta pode levar a uma perda de eficiência energética de todo o circuito projetado, por isso o valor desse tipo de resistor é, quase sempre, bem baixo. Outro parâmetro importante na escolha do resistor *shunt* é a sua tolerância, uma concessão a imperfeições na fabricação do resistor. Por exemplo, para um resistor de  $1\Omega$  com  $\pm 1\%$  de tolerância significa que qualquer valor entre  $0,99\Omega$  e  $1,01\Omega$  é aceitável para o resistor projetado. Essa tolerância tem impacto direto na medição de corrente já que está diretamente relacionada à exatidão da medição da tensão do resistor. Deve-se avaliar, também, para o projeto do resistor o seu coeficiente de temperatura. Todos os materiais sofrem uma variação na sua resistividade quando afetados por uma mudança na temperatura. Essa mudança afeta cada material de uma maneira particular e, tipicamente, não-linear. Normalmente especificado em partes por milhão por grau Celsius (ppm/C°), essa característica define sua estabilidade em relação à temperatura. Um exemplo prático: um resistor de  $1k\Omega$  com um coeficiente de temperatura de  $10\text{ppm/C}^\circ$  terá uma variação de até  $\pm 0,01\Omega$  para uma mudança de  $1\text{C}^\circ$ . Característica importante, uma vez que, ao circular corrente pelo resistor, sua temperatura aumenta, aumentando a dissipação de potência.

### 3.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE UTILIZANDO RESISTÊNCIA DE COBRE

Este método é apenas uma variação do método do resistor em série. Ao invés de se utilizar um componente resistor onde será realizada a medição de tensão para então se obter o valor da corrente elétrica, utiliza-se apenas um condutor de cobre como um resistor de baixa resistência. Essa técnica permite uma diminuição na queda de tensão e, por conseguinte, uma diminuição na dissipação de potência, pode, inclusive, diminuir os custos de projeto associados ao resistor *shunt*.

A resistência de um condutor de cobre em uma placa de circuito impresso é dada pela equação (6)

$$R_T = S(T) \cdot \frac{C}{L \cdot E} \quad (6)$$

onde  $S(T)$  é a constante característica do material,  $C$  é o comprimento do fio,  $L$  sua largura e  $E$  sua espessura (as unidades referentes às dimensões do condutor podem estar em qualquer unidade, desde que estejam todas na mesma unidade). Segundo (MAMMANO, 1997), para o cobre mais utilizado na fabricação de PCIs o valor de  $S(T)$  para uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  é dada por (7)

$$S(T) = 1,7241 \cdot 10^{-6} [1 + 0,0039(T - 20)] \Omega cm \quad (7)$$

Uma ótima aplicação para algumas situações específicas, porém, há uma certa limitação de uso para este método devido ao cobre possuir uma resistência elétrica muito baixa. Essa baixa resistência leva a valores de tensão igualmente muito baixos, o que pode causar uma dificuldade na amplificação desta tensão. Além disso, a utilização do próprio condutor como resistência traz alguns desafios de projeto, uma vez que, ao excluir um componente se perde a possibilidade de modelagem de parâmetros importantes para o projeto, como coeficiente de temperatura e tolerância.

## 4 EXPERIMENTO PRÁTICO UTILIZANDO O AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO INA118P

Com o propósito de incluir no TCC uma atividade prática, realizou-se no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE) da UFSM um experimento prático de medição de corrente utilizando o método do resistor em série. A escolha desse método para a implementação prática se deu pela simplicidade da tecnologia. Esta simplicidade se apresenta tanto na utilização prática do método para realizar medições de corrente quanto na base teórica do mesmo.

Montou-se um circuito simples, onde se emprega o Amplificador de Instrumentação INA118P com o propósito de amplificar a tensão que passa por um resistor ( $R_S$ ). O valor de tensão na saída do INA118P é então dividido pelo valor de  $R_S$  e pelo ganho do amplificador para se obter o valor da corrente que passa pelo resistor  $R_S$ .

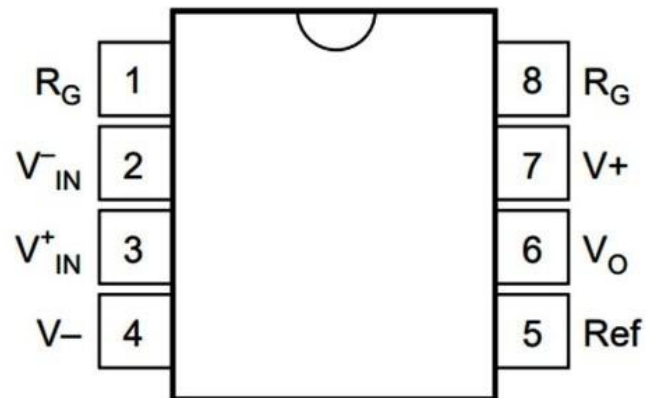
### 4.1 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

Amplificadores de Instrumentação são uma categoria específica de amplificadores que atendem a propósitos próprios. Possuem alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Tem, portanto, características próximas de um amplificador operacional ideal. Ofertam um ganho elevado, superior a um amplificador operacional convencional, que pode ser variado utilizando-se normalmente um único resistor externo ao CI.

O Amplificador de Instrumentação utilizado no experimento foi o INA118P, fabricado pela Texas Instruments. Um circuito integrado de 8 pinos, como está mostrado na figura 8. Oferece erros de ganho bastante baixo conforme o datasheet. Possui uma topologia típica de amplificadores de instrumentação que utiliza 3 amplificadores operacionais, observada na figura 9, oferece um ganho que pode variar de 1 até 10000. O controle dessa variação de ganho é feito utilizando diferentes resistores de ganho ( $R_G$ ), externos ao circuito integrado utilizado, de diferentes valores de resistência, entre os pinos de número 1 e 8. A equação que determina esse ganho é disponibilizada pelo fabricante na equação (8). Necessita de uma tensão de alimentação DC simétrica que, dependendo do valor da tensão resultante após a amplificação, deve estar entre  $\pm 1,35(V)$  e  $\pm 18(V)$ .

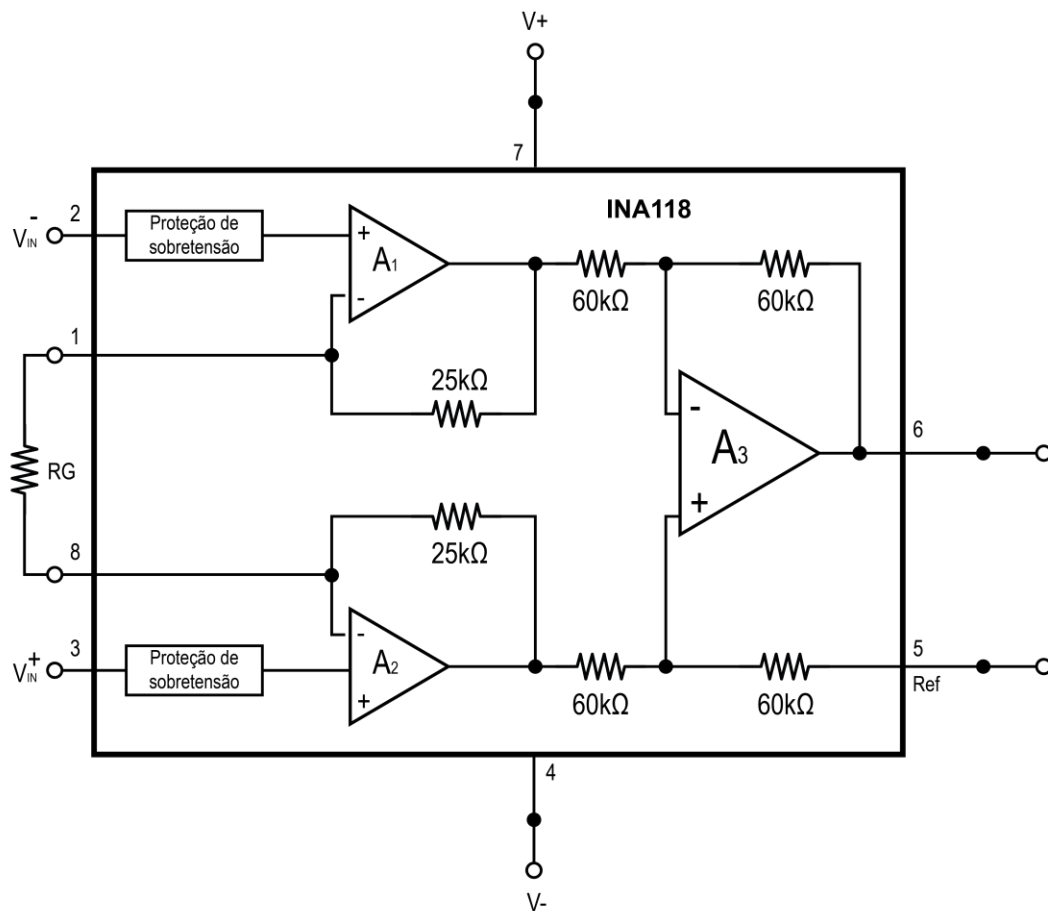
$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (8)$$

Figura 8 - Configuração de pinos do CI INA118P



Fonte: Texas Instruments.

Figura 9 - Topologia do CI INA118P, da fabricante Texas Instruments.

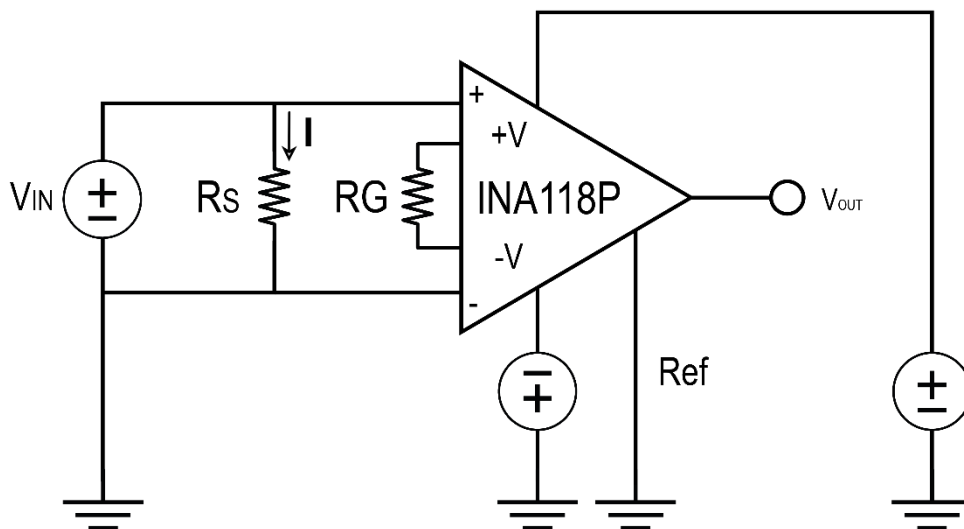


Fonte: Autores.

## 4.2 METODOLOGIA

Foi montado, em uma protoboard, o circuito exibido na figura 10. Para o resistor  $R_S$  buscou-se o valor mais próximo a  $1\Omega$  possível com o intuito de obter uma relação  $I \times V$  de 1:1. O valor medido em laboratório foi de  $1,003\Omega$ . Com a finalidade de testar o circuito integrado para diferentes níveis de ganho foi variado o valor da resistência em  $R_G$  entre  $26,86\Omega$  e  $5,475k\Omega$ , o que permitiu estabelecer ganhos de amplificação que variaram de 10,13 até 1862,50.

Figura 10 - Circuito utilizado no experimento prático. A corrente  $I$  que circula por  $R_S$  produz uma tensão  $V_S$  que é observada pelo amplificador.



Fonte: Autores.

Para cada um dos diferentes valores de ganho foram aplicados alguns valores de tensão de entrada ( $V_{IN}$ ) e então foi feita a medida da tensão amplificada ( $V_{OUT}$ ). Conforme a amplitude do sinal  $V_{OUT}$ , ajustes foram feitos na tensão de alimentação do circuito para acomodar esta necessidade. Os valores utilizados na alimentação do INA118P durante o experimento variaram entre  $\pm 2V$  e  $\pm 15V$ .

Com os resultados medidos da tensão amplificada, exposto em (9), foi possível realizar o cálculo da corrente elétrica  $I$  que percorria o resistor  $R_S$ . Como a tensão  $V_{OUT}$  estava amplificada o valor obtido deve ser então dividido pelo valor do ganho ajustado para se obter o valor de  $V_{IN}$  e então aplicar a Lei de Ohm para obter a corrente  $I$  (9.1).

$$V_{OUT} = G \cdot (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \rightarrow (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) = \frac{V_{OUT}}{G} \quad (9)$$

$$(V_{IN}^+ - V_{IN}^-) = R_S \cdot I \rightarrow I = \frac{(V_{IN}^+ - V_{IN}^-)}{R_S} \quad (9.1)$$

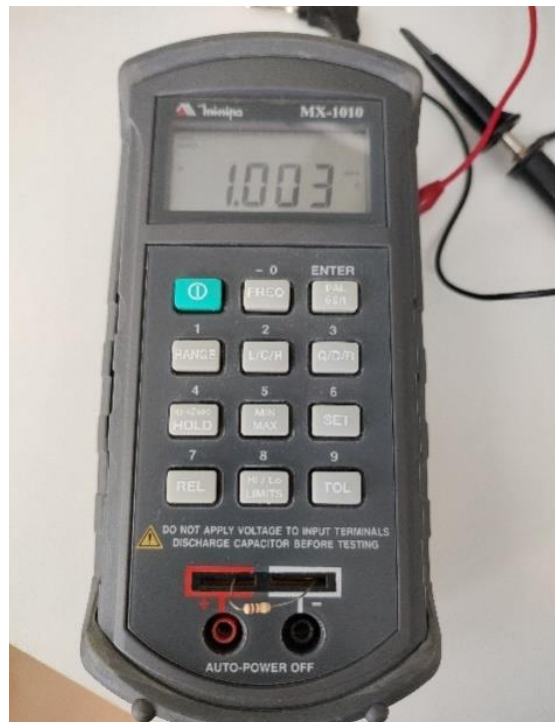
Todos os valores encontrados utilizando o método descrito podem ser vistos na Tabela 3.

#### 4.2.1 Metodologia das Medições

Como o objetivo do experimento era obter o valor mais preciso possível da corrente que percorre  $R_S$  foi necessária uma metódica medição de valores. Tanto para valores de tensão como para valores de resistência. Uma fonte de Alimentação de saída regulável, modelo PT-6000, da fabricante Icel Manaus foi utilizada para realizar a alimentação simétrica do CI e a fonte DC programável, modelo DP1308A, da fabricante Rigol, gerava o sinal da tensão de entrada  $V_{IN}$ .

Para a medição da resistência de todos os resistores utilizados no experimento prático foi utilizada uma Ponte LCR, modelo MX-1010, da Fabricante Minipa. A medição de todos os resistores foi feita com os mesmos desconectados da protoboard, como é possível ver na figura 11.

Figura 11 - Medição dos resistores.



Fonte: Autores.

A medição da tensão de entrada ( $V_{IN}$ ) foi feita através do multímetro digital, modelo MD-600, da fabricante Icel Manaus. Com a finalidade de evitar possíveis perdas decorrentes da resistência presente nos materiais condutores a medida foi feita nos pinos 2 e 3 do INA118P, com ponteiros do tipo garra. Os valores da tensão de saída ( $V_{OUT}$ ) foram obtidos com o auxílio do multímetro digital, modelo 72-7745, da fabricante Tenma. Foi utilizado no multímetro ponteiros do tipo garra, uma das quais ligada em um condutor de cobre estanhado posicionado no pino 6 do amplificador de instrumentação e outra na referência fornecida pela fonte que faz a alimentação do CI. A fim de garantir uma maior exatidão no resultado os valores da tensão de  $V_{IN}$  e  $V_{OUT}$  foram medidos simultaneamente.

#### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo geral deste experimento é realizar algumas medidas para identificar, de maneira prática, os erros de medição, seja nos instrumentos ou nos componentes utilizados e, por conseguinte, montar um comparativo dos valores estimados, adquiridos empregando as equações fornecidas pela fabricante do amplificador de instrumentação utilizado, em relação aos valores obtidos através das medições realizadas em laboratório.

Para uma visualização clara da diferença entre os valores de tensão de saída foi feito uma coluna na tabela 3 com valores de uma estimativa para  $V_{OUT}$ . Esses números foram obtidos multiplicando o valor medido da tensão de entrada  $V_{IN}$  pelos valores de ganho, este último adquirido através da equação de ganho própria do INA118P. Desta forma é possível fazer uma comparação, que está presente na tabela 3 na coluna intitulada “Diferença (%)”, do valor estimado para a tensão após a amplificação pelo ganho calculado e o valor de fato medido de  $V_{OUT}$ . Na figura 12 é possível uma melhor visualização desta diferença. As retas representam o ganho teórico, para 3 distintos valores de ganho, e as esferas representam o valor medido em laboratório.

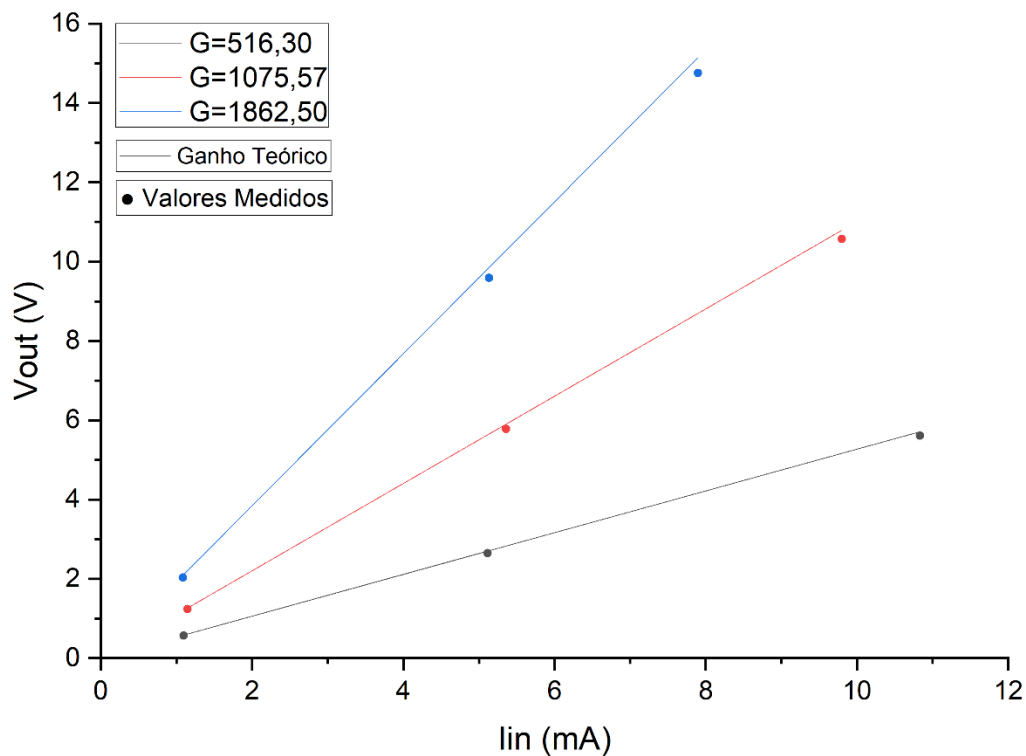
Tabela 3 - Dados obtidos no experimento prático com o amplificador de instrumentação ina118p

<b>Rs(<math>\Omega</math>)</b>	<b>Rg(<math>\Omega</math>)</b>	<b>V<sub>IN</sub> (V)</b>	<b>Ganho</b>	<b>Estimativa(V<sub>OUT</sub>)</b>	<b>V<sub>OUT</sub> (V)</b>	<b>Diferença(%)</b>	<b>Estimativa de corrente i<sub>in</sub> (A)</b>	<b>Corrente i<sub>in</sub>(mA)</b>
1,003	5475	1,031	10,13242009	10,44652511	9,81	-6,093175551	1027,916251	965,2835095
1,003	5475	0,4952	10,13242009	5,017574429	4,97	-0,9481559246	493,7188435	489,037619
1,003	5475	0,0483	10,13242009	0,4893958904	0,486	-0,6938943456	48,1555334	47,82138488
1,003	981,7	0,01008	51,93205664	0,5234751309	0,518	-1,045919963	10,04985045	9,944737057
1,003	981,7	0,1023	51,93205664	5,312649394	5,27	-0,8027895452	101,9940179	101,1752206
1,003	981,7	0,0506	51,93205664	2,627762066	2,61	-0,6759388925	50,44865404	50,10765196
1,003	981,7	0,00581	51,93205664	0,3017252491	0,299	-0,9032220758	5,792622134	5,740301892
1,003	671,3	0,00558	75,48234768	0,4211915001	0,418	-0,7577313583	5,56331007	5,521155125
1,003	671,3	0,04956	75,48234768	3,740905151	3,71	-0,8261409993	49,41176471	49,00355386
1,003	671,3	0,01025	75,48234768	0,7736940638	0,768	-0,7359580516	10,21934197	10,1441319
1,003	671,3	0,1009	75,48234768	7,616168881	7,55	-0,8687948272	100,5982054	99,72421338
1,003	562,3	0,01662	89,92050507	1,494478794	1,48	-0,9688189818	16,57028913	16,40975303
1,003	562,3	0,0981	89,92050507	8,821201547	8,74	-0,9205270595	97,80658026	96,90624422
1,003	562,3	0,00519	89,92050507	0,4666874213	0,462	-1,004402753	5,17447657	5,122503985
1,003	97,03	0,00523	516,304545	2,70027277	2,65	-1,861766368	5,214356929	5,117277786
1,003	97,03	0,00112	516,304545	0,5782610904	0,568	-1,774473599	1,11665005	1,09683539
1,003	97,03	0,01106	516,304545	5,710328268	5,61	-1,756961471	11,02691924	10,83318052
1,003	46,53	0,00118	1075,575543	1,26917914	1,24	-2,299056092	1,176470588	1,14942287
1,003	46,53	0,01003	1075,575543	10,78802269	10,57	-2,020969914	10	9,797903009
1,003	46,53	0,00548	1075,575543	5,894153974	5,78	-1,93673213	5,463609172	5,357793698
1,003	26,86	0,00529	1862,504095	9,852646664	9,59	-2,665747318	5,274177468	5,133581223
1,003	26,86	0,00112	1862,504095	2,086004587	2,03	-2,684777737	1,11665005	1,086670478
1,003	26,86	0,00813	1862,504095	15,14215829	14,75	-2,589844111	8,105682951	7,895758399

Fonte: Autores.



Figura 12 – Comparação  $V_{OUT} \times i_{in}$  para valores de ganho teórico e valores medidos em laboratório.



Fonte: Autores.

Para calcular o valor da diferença entre estimativas e medições foi subtraído da tensão  $V_{OUT}$  medida o valor de  $V_{OUT}$  estimado. O resultado era então multiplicado por 100 e, em seguida, dividido por  $V_{OUT}$  estimado. Como pode ser observado na tabela 4, que apresenta valores para dois ganhos distintos, há uma grande semelhança nos valores, em porcentagem, da diferença entre tensão de saída estimada e medida para um ganho específico. É possível notar também que, ao trocar de ganho, há um substancial aumento da diferença. De acordo com o fabricante, para um ganho de 100 a diferença esperada é de  $\pm 0,05\%$  até  $\pm 0,5\%$ . E para um ganho de 1000 a diferença esperada é de  $\pm 0,5\%$  até  $\pm 1\%$ . Por mais que as informações do fabricante expressem a possibilidade de erros positivos nenhum foi constatado durante a obtenção de dados do experimento.

Tabela 4 - Valores obtidos para os ganhos de 89,92 e 1075,57.

<b>Ganho</b>	<b>Estimativa de <math>V_{OUT}</math>(V)</b>	<b><math>V_{OUT}</math> medido (V)</b>	<b>Diferença(%)</b>
89,92050507	1,494478794	1,48	-0,9688189818
89,92050507	8,821201547	8,74	-0,9205270595
89,92050507	0,4666874213	0,462	-1,004402753
1075,575543	1,26917914	1,24	-2,299056092
1075,575543	10,78802269	10,57	-2,020969914
1075,575543	5,894153974	5,78	-1,93673213

Fonte: Autores.

Os valores adquiridos neste experimento atenderam às expectativas. A média das diferenças entre a tensão de saída teórica e a medida foi de -1,6015%, o que, à primeira vista, pode parecer um valor elevado, considerando que para um ganho de 1000 o erro seja, se no máximo  $\pm 1\%$ , porém, é necessário levar em conta fatores adversos que contribuem para um aumento no valor de erro em um experimento prático. Entre esses fatores estão, mas não se limitam, a qualidade do material utilizado nas medições, como os multímetros e a ponte LCR. Instabilidade do fornecimento da tensão de entrada  $V_{IN}$ . Resistência dos materiais condutores utilizados.

Para alguns resultados o erro da medição de corrente, utilizando o CI INA118P para amplificar um sinal de tensão em um resistor shunt, foi tão baixo quanto -0,6759%. Um ótimo valor considerando condições de aplicações e equipamentos não ideais.

## 5 CONCLUSÃO

A realização do experimento possibilitou a montagem de uma tabela simplificando a comparação de valores teóricos com os valores obtidos em laboratório. Parte fundamental para a melhor compreensão da questão. Nela foi possível visualizar o quão defasados estavam os valores da corrente  $I_{IN}$  alcançada na medida em relação a corrente elétrica real que percorria o transistor. A maioria das medidas apresentaram uma diferença entre esses valores abaixo de 2%. Foi possível observar, também, uma diferença mais acentuada conforme aumentávamos o Ganho. Diferenças acima de 1% foram pouco observadas para os valores de ganho abaixo de 100 enquanto que, para valores de ganho acima de 500 não foi observado nenhum valor de diferença abaixo de 1,75%. Um resultado esperado, uma vez que segundo o próprio fabricante do CI INA118P, conforme se aumenta o ganho aumenta também o erro de amplificação.

Mesmo obtendo resultados apropriados, fica claro que há espaço para uma melhora nas medições realizadas. Uma provável causa para o erro obtido ter sido superior àquele indicado pelo fabricante está associado aos equipamentos do laboratório que são bastante rudimentares. Seria interessante repetir o experimento com equipamentos que proporcionem uma maior exatidão nas medidas, como multímetros e fontes de precisão.

Além dos resultados do experimento prático, os capítulos 2 e 3 vieram a agregar uma contribuição de conhecimento valiosa sobre medição de corrente elétrica aos conteúdos estudados nas disciplinas de Medidas Elétricas e Eletrônicas, da qual faz parte o estudo de transformadores de corrente, e Instrumentação Eletrônica, que aborda as características de medição, como precisão, exatidão, resolução e linearidade. Foram revisados os conceitos fundamentais do mais utilizado método de medição de corrente elétrica na microeletrônica, o método do resistor em série, bem como algumas especificidades em relação ao resistor responsável por possibilitar essa medida. Ademais estão descritos no trabalho alguns princípios de funcionamento de outros métodos menos usuais de medição de corrente, como o medidor de efeito Hall e a bobina de Rogowski. A maioria destes, pouco, ou apenas superficialmente abordados durante o período de graduação, fornecendo assim, uma importante e útil revisão bibliográfica sobre o assunto trabalhado.

## 5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como mencionado na conclusão. Há espaço para melhoras nas medições realizadas durante o experimento prático. Há, também, mais parâmetros a serem levados em consideração quando se realiza a medição de corrente elétrica pelo método do resistor em série. Nesse experimento prático não foi levado em conta, por exemplo, a tensão de offset, uma diferença de potencial entre a entrada e a saída de amplificadores, um parâmetro indispensável de ser avaliado e, se possível, atenuado, em um experimento que utiliza um amplificador de instrumentação como o INA118P.

Outro fator importante que pode ser levado em conta para um enriquecimento da complexidade das medições realizadas é a temperatura do ambiente onde foi realizado o experimento. Esta informação se faz importante uma vez que a resistência elétrica de qualquer material, não apenas os que compõe resistores, varia conforme a temperatura em que estão inseridos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIGLARBEGLIAN, M. et al. **Development of current measurement techniques for high frequency power converters**. 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). *Anais...IEEE*, 2016.
- BLANCO, A. A.; RINCON-MORA, G. A. **Measuring micro-amp inductor currents in switched-inductor DC-DC power supplies**. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. *Anais...IEEE*, 2014.
- FORGHANI-ZADEH, H. P.; RINCON-MORA, G. A. **Current-sensing techniques for DC-DC converters**. The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2002. MWSCAS-2002. *Anais...IEEE*, 2003.
- GIFT, S. J. G. An enhanced current-mode instrumentation amplifier. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, v. 50, n. 1, p. 85–88, 2001.
- HUANG, P. Y.; SHIMIZU, T. **High power/current inductor loss measurement with shunt resistor current-sensing method**. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). *Anais...IEEE*, 2018.
- RAZAVI, B. **Fundamentals of microelectronics: Preview edition**. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2006.
- JIANG, Y.; ASAR, S.; FAYED, A. **An average inductor current sensor with enhanced accuracy in DCM for buck converters**. 2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). *Anais...IEEE*, 2018.
- FORGHANI-ZADEH, H. Pooya; RINCÓN-MORA, Gabriel A. A lossless, accurate, self-calibrating current-sensing technique for DC-DC converters. In: **31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005**. IEEE, 2005.
- KIM, H. et al. Inductor current measurement and regulation using a single DC link current sensor for interleaved DC–DC converters. *IEEE transactions on power electronics*, v. 26, n. 5, p. 1503–1510, 2011.
- KIM, W. et al. **Integrated current sensor using giant magneto resistive (GMR) field detector for planar power module**. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). *Anais...IEEE*, 2013.
- MATTAVELLI, P. **Digital control of dc-dc boost converters with inductor current estimation**. Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. *Anais...IEEE*, 2004.
- POPOVIC, R. S. **High resolution Hall magnetic sensors**. 2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings - MIEL 2014. *Anais...IEEE*, 2014.
- PALMER, P. R.; STARK, B. H.; JOYCE, J. C. **Noninvasive measurement of chip currents in IGBT modules**. PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists

Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972. **Anais...IEEE**, 2002.

RODRIGUEZ, M. et al. Average inductor current sensor for digitally controlled switched-mode power supplies. **IEEE transactions on power electronics**, v. 27, n. 8, p. 3795–3806, 2012.

XIAO, C. et al. **An overview of integratable current sensor technologies**. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. **Anais...IEEE**, 2004.

ZIEGLER, S. et al. Current sensing techniques: A review. **IEEE sensors journal**, v. 9, n. 4, p. 354–376, 2009.

MAMMANO, Bob. Current sensing solutions for power supply designers. **Proc. TI Power Supply Design Sem**, 1997.

MOHNS, E. et al. An AC current transformer standard measuring system for power frequencies. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 66, n. 6, p. 1433–1440, 2017.

JIN, K. et al. A current-sensing method for integrated transformer. **IEEE transactions on power electronics**, v. 27, n. 3, p. 1061–1065, 2012.

GRANT, D. A.; WILLIAMS, R. Current sensing MOSFETs for protection and control. In: **1991 IEE Colloquium on Measurement Techniques for Power Electronics**. IET, 1991.

FORGHANI-ZADEH, H. Pooya. **An Integrated, Lossless, and Accurate Current-Sensing Technique for High-Performance Switching Regulators**. Georgia Institute of Technology, 2006.

CARRASCO, J. A. et al. **Improved magnetic coupled current sensing techniques [space power applications]**. PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. **Anais...IEEE**, 2002.

CRESCENTINI, M.; SYEDA, S. F.; GIBIINO, G. P. Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques. **IEEE sensors journal**, p. 1–1, 2021.

HWANG, J.-Y. et al. A precise current detection method using a single shunt and FET Rds(on) of a low-voltage three-phase inverter. **Electronics**, v. 11, n. 1, p. 9, 2021.

ZHANG, Zhendong; LEGGATE, David; MATSUO, Takayoshi. Industrial inverter current sensing with three shunt resistors: Limitations and solutions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 6, p. 4577-4586, 2016.

YING, Da; HALL, Drew A. Current Sensing Front-Ends: A Review and Design Guidance. **IEEE Sensors Journal**, 2021.

TAN, Zhichao et al. A fully isolated delta-sigma ADC for shunt based current sensing. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 51, n. 10, p. 2232-2240, 2016.

PACHA, Matej; VARECHA, Patrik; SUMEGA, Martin. HW issues of current sensing by DC-link shunt resistor. In: **2018 ELEKTRO**. IEEE, 2018. p. 1-5.