



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Angelo Maxwell Alves Almeida



Estudo e Implementação de Sensores de Corrente

Trabalho de Conclusão de Curso

Angelo Maxwell Alves Almeida

Estudo e Implementação de Sensores de Corrente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Graduação de Engenharia Elétrica da UFCG como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista, Área de Concentração: Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Campina Grande – PB

2009

Angelo Maxwell Alves Almeida

Estudo e Implementação de Sensores de Corrente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Graduação de Engenharia Elétrica da UFCG
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Eletricista, Área de concentração: Eletrônica.

Prof. Dr. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Orientador

Prof.

Professor Convidado

Data de aprovação: ___/___/_____

Campina Grande – PB

2009

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo e aplicação de sensores de corrente que proporcionam isolamento elétrico entre o circuito considerado e o medidor. Sensores convencionais, como transformadores de corrente (TC's) e baseados em efeito Hall, e sensores não-convencionais, como o baseado em amplificador diferencial e isolador óptico, são utilizados no condicionamento de sinais destinados às atividades de medição de potência e de corrente elétrica. O estudo teórico, iniciado com pesquisa, análise e simulação dos circuitos, foi complementado com os resultados práticos obtidos a partir de testes e montagem de sensores de corrente baseados em efeito Hall e isolador óptico.

Palavras Chave: Sensor de corrente, isolamento elétrico, TC's, efeito Hall, isolador óptico, montagem.

Abstract

This work has as objective the study and application of sensor of current that provide electric isolation between the considered circuit and the meter. Conventional sensors, as current transformers (TC's) and based on Hall effect, and no-conventional sensors, as the based on diferencial amplifier and optical insulator are used in the conditioning of signs destined to the activities of potency and of electric current measurement. The theoretical study, initiate with research, analysis and simulation of the circuits, it was complemented with the practical results obtained starting from tests and assembly of the sensor of current based on Hall effect and optical insulator.

Words Key: Sensor of current, electric isolation, TC's, effect Hall, optical insulator, assembly.

Sumário

1. Introdução	9
2. Sensores de Corrente	10
2.1 Sensor de Corrente com Isolador Óptico	10
2.2 Sensor de Corrente de Efeito Hall	13
2.3 Transformadores de Corrente	15
3. Implementação de Sensores de Corrente	18
3.1 Implementação de Sensor de Corrente com Isolador Óptico	18
3.1.1 <i>Simulação</i>	19
3.1.2 <i>Placa de circuito impresso</i>	20
3.1.3 <i>Resultados experimentais</i>	21
3.1.4 <i>Análise de resultados</i>	22
3.2 Implementação de Sensor de Corrente de Efeito Hall	25
3.2.1 <i>Placa de Circuito Impresso</i>	25
3.2.2 <i>Resultados experimentais</i>	26
3.2.3 <i>Análise de resultados</i>	27
4. Considerações Finais	30
5. Referências Bibliográficas	31

Lista de Figuras

Figura 1 – Circuito sensor de corrente com isolador óptico.	10
Figura 2 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Estágio de entrada.	11
Figura 3 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Ajuste de nível DC.	11
Figura 4 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Ajuste de ganho.	12
Figura 5 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Exemplos de derivadores.	12
Figura 6 – Representação dos parâmetros elétricos do efeito Hall.	13
Figura 7 – Sensor de corrente de efeito Hall: Princípio de funcionamento.	14
Figura 8 – Transformador de corrente (TC).	15
Figura 9 – Modelo do transformador de corrente.	16
Figura 10 – Representação fasorial das correntes do secundário.	17
Figura 11 – Circuito sensor de corrente com isolamento óptico.	18
Figura 12 – Sensor de corrente com isolamento óptico: $I_{\text{entrada}} \times V_{\text{saída}}$ para simulação.	19
Figura 13 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Simulação para $I_{\text{pico}} = 10\text{A}$.	20
Figura 14 – Sensor de corrente com isolador óptico: Placa de circuito impresso.	20
Figura 15 – Sensor de corrente com isolador óptico: Disposição de componentes.	21
Figura 16 – Isolador óptico (relação 2:1): Ajuste linear de dados experimentais.	23
Figura 17 – Isolador óptico (relação 1:1): Ajuste linear de dados experimentais.	23
Figura 18 – Circuito sensor de corrente de efeito Hall.	25
Figura 19 – Sensor de corrente de efeito Hall: Leiute da placa de circuito impresso.	25
Figura 20 – Sensor de corrente de efeito Hall: Disposição de componentes.	26
Figura 21 – Sensor de efeito Hall (relação 2:1): Ajuste linear de dados experimentais.	28
Figura 22 – Sensor de efeito Hall (relação 1:1): Ajuste linear de dados experimentais.	28

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Sensor de corrente com isolador óptico: Simulação.	19
Tabela 2 – Isolador óptico (relação 2:1): Resultados experimentais.	21
Tabela 3 – Isolador óptico (relação 1:1): Resultados experimentais.	22
Tabela 4 – Acoplador optico (relação 2:1): Dados experimentais e erros.	24
Tabela 5 – Erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 2:1).	24
Tabela 6 – Acoplador optico (relação 1:1): Dados experimentais e erros.	24
Tabela 7 – Erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 1:1).	24
Tabela 8 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 1:1): Resultados experimentais.	26
Tabela 9 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 2:1): Resultados experimentais.	27
Tabela 10 – Sensor de efeito Hall (relação 2:1): Dados experimentais e erros.	29
Tabela 11 – Erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 2:1).	29
Tabela 12 – Sensor de efeito Hall (relação 1:1): Dados experimentais e erros.	29
Tabela 13 – Erros do sensor de corrente de efeito Hall (relação 1:1).	30

1. Introdução

Dentre as formas de medição de corrente elétrica, a mais simples usa derivadores de baixa resistência para se obter tensões proporcionais à corrente desejada. A utilização de derivadores de diferentes valores permite a medição com baixo erro de correntes com diferentes magnitudes, tal princípio é utilizado em amperímetros de bobina móvel, por exemplo. Porém, o uso de derivadores não proporciona isolamento elétrico entre o circuito considerado e o medidor.

É possível utilizar transformadores para isolamento elétrico entre os estágios do circuito, permitindo a redução das correntes entre o enrolamento primário e o secundário para valores seguros. Transformadores específicos para medição de corrente são denominados transformadores de corrente (TC's) e apenas podem ser utilizados em CA. Sensores de corrente baseados em efeito Hall podem ser utilizados tanto em CA quanto CC, apresentando excelente precisão para uma faixa ampla de frequências e valores de corrente.

Entretanto, TC's e sensores baseados em efeito Hall apresentam custos relativamente elevados. Como alternativa, é possível utilizar o circuito simples desenvolvido por Palaniappan & Vithayathil, que utiliza acoplamento óptico e também pode ser utilizado para medição de correntes CA e CC.

O objetivo deste trabalho é apresentar os princípios de funcionamento desses três métodos de medição de corrente com isolamento elétrico. O interesse pelo tema surgiu durante a realização do estágio supervisionado no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas de Potência (LASSE), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), quando foram implementados circuitos utilizando acoplamento óptico e sensores baseados em efeito Hall para os sistemas de aquisição de dados do laboratório.

2. Sensores de Corrente

2.1 Sensor de Corrente com Isolador Óptico

O circuito apresentado na figura 1 é semelhante ao circuito desenvolvido por Palaniappan & Vithayathil (1980). Usando acopladores ópticos para prover isolamento óptico entre os estágios de entrada e saída, pode ser utilizado para medição de correntes alternadas e contínuas.

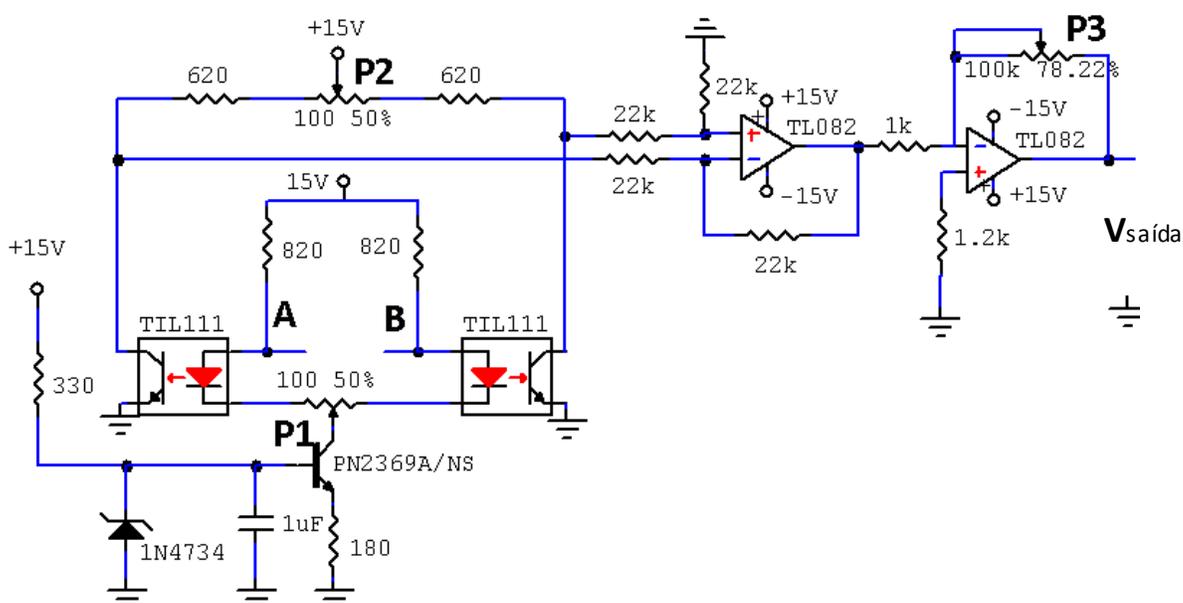


Figura 1 – Circuito sensor de corrente com isolador óptico.

O primeiro estágio é apresentado na figura 2. A corrente a ser medida flui entre os terminais A e B do circuito através de um derivador, ou *shunt*, de baixa resistência. A fonte de corrente formada pelo transistor, capacitor e diodo Zener fornece a corrente de polarização para os LED's do opto-acoplador, equilibrada a partir do potenciômetro P1. Manter ambos os LED's no mesmo ponto de operação garante que, em casos de tensões diferenciais alternadas entre os terminais A e B, por exemplo, a saída fornecida ao estágio seguinte seja simétrica em relação ao seu nível médio.

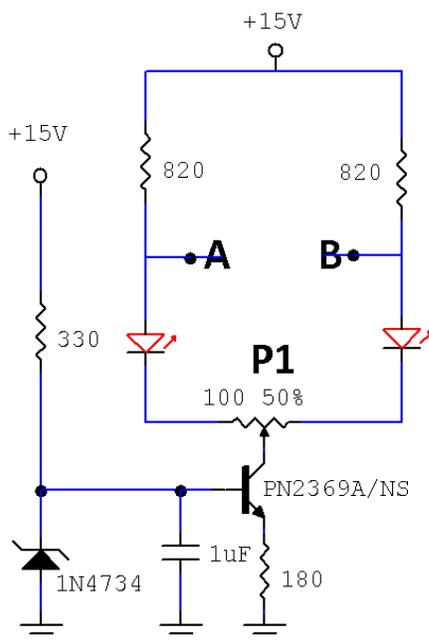


Figura 2 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Estágio de entrada.

O circuito da figura 3 apresenta o estágio de ajuste de nível DC. O sinal de entrada para o par diferencial é fornecido pelos LED's do opto-acoplador do primeiro estágio. O potenciômetro P2 equilibra as correntes de polarização para os foto-transistores, fazendo com que as tensões DC em seus coletores sejam iguais. A saída V_{01} do amplificador subtrator de ganho unitário é usada para medição durante o ajuste do nível DC.

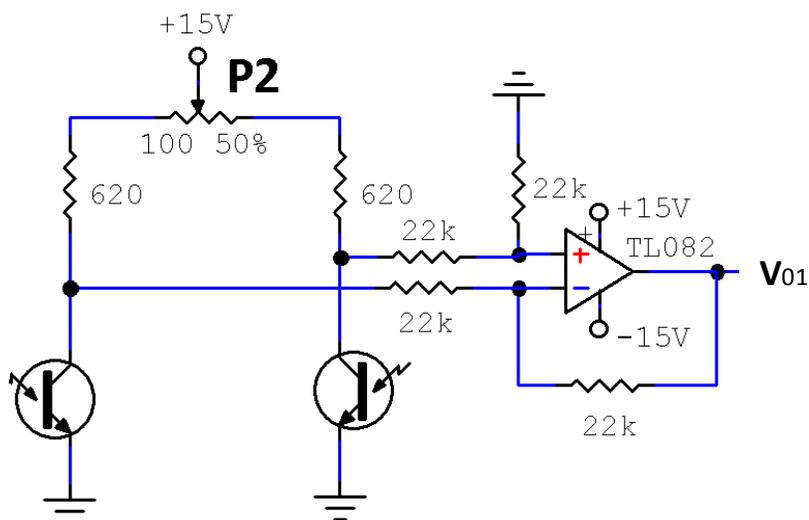


Figura 3 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Ajuste de nível DC.

O terceiro estágio do sensor é apresentado na figura 4. O potenciômetro P3 é usado para ajustar o ganho do circuito de acordo com a relação desejada entre corrente de entrada e tensão de saída.

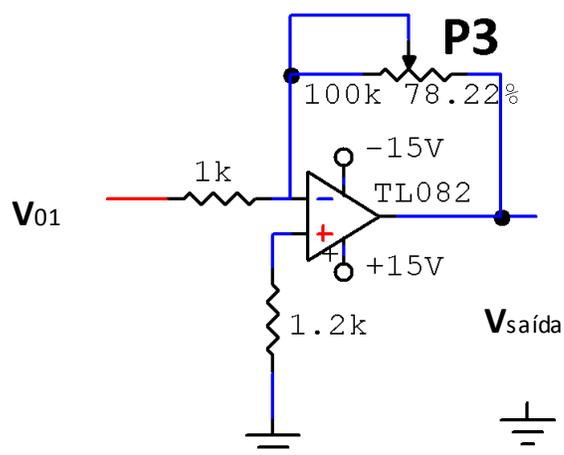


Figura 4 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Ajuste de ganho.

A depender da faixa desejada para as correntes de entrada, o sensor de corrente com acoplador óptico apresenta excelente linearidade e precisão, podendo chegar até mais de 99% na relação $V_{saída} \times I_{entrada}$. O fator limitante para a tensão de saída é a tensão de alimentação para os amplificadores operacionais.

Os derivadores podem ser feitos de resistência de metal ou liga metálica, como manganina ou constantan, estável termicamente. Apresentam linearidade para uma ampla faixa de correntes e resistências baixas comparadas às cargas com as quais são colocados em série. A figura 5 apresenta exemplos de derivadores que podem ser utilizados nos sensores de corrente com acoplador óptico.



Figura 5 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Exemplos de derivadores.

2.2 Sensor de Corrente de Efeito Hall

O efeito Hall foi descoberto pelo físico americano Edwin Herbert Hall em 1879. Hall descobriu que os portadores de carga de uma corrente, I_c , fluindo em uma fina camada de material condutor são afetados por um fluxo magnético externo, B , gerando a força de Lorentz, perpendicular à direção do fluxo da corrente.

$$\vec{F}_L = e (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

A força de Lorentz faz com que mais portadores de cargas fiquem nas bordas do material, criando uma diferença de potencial, V_H , denominada tensão Hall. Na figura 6 está uma representação dos parâmetros elétricos do efeito Hall.

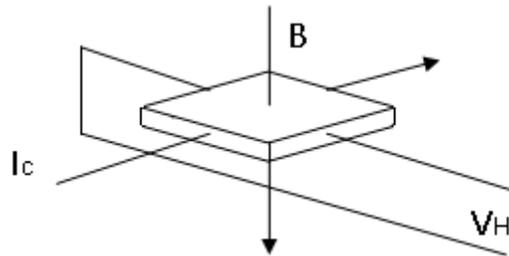
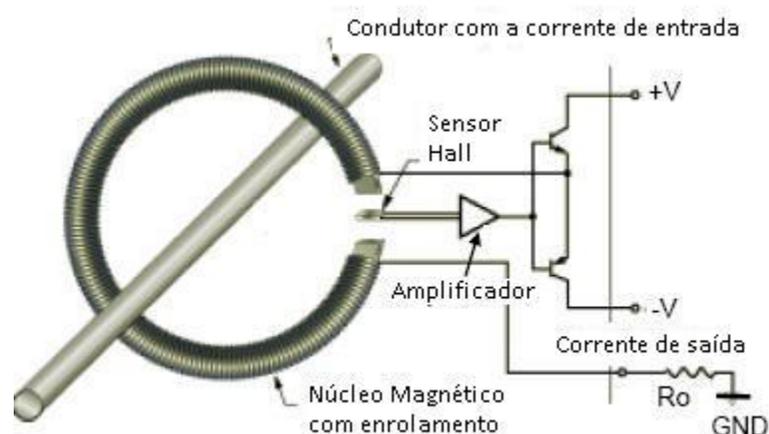


Figura 6 – Representação dos parâmetros elétricos do efeito Hall.

O transdutores de efeito Hall podem ser encontrados em três configurações:

- *Loop* aberto – apresenta o menor consumo de potência, por usar o efeito Hall simples, medindo V_H depois de amplificado;
- *Loop* fechado – apresenta um circuito de compensação de fluxo que melhora seu desempenho quando comparado ao anterior;
- *Eta* – construído de forma semelhante ao sensor em *Loop* fechado, apresenta desempenho intermediário entre os dois anteriores, mas baixo consumo de potência no secundário.



Fonte: http://www.bbautomacao.com/images/Hall_Effect_Closed_Loop_Current_Sensor.jpg

Figura 7 – Sensor de corrente de efeito Hall: Princípio de funcionamento

Os transdutores de efeito Hall em *Loop* fechado podem ser modelados como transformadores de corrente, porém não usa simples acoplamento magnético como princípio de funcionamento.

Estes transdutores funcionam pelo princípio da compensação do fluxo. Usam a tensão Hall gerada V_H para criar uma corrente de compensação no secundário cujo fluxo é igual em amplitude ao fluxo gerado pela corrente do primário, mas oposto em direção.

A operação em condições de fluxo zero elimina os efeitos da temperatura e faz com que o potencial magnético dos dois enrolamentos seja igual. Como consequência, a corrente no secundário é a imagem da corrente no primário, como ilustrado na equação (2).

$$N_P I_P = N_S I_S \quad (2)$$

A tensão de saída, medida no resistor R_o na figura 8, apresenta grande precisão e linearidade com isolamento galvânico entre os circuitos de entrada e saída para uma ampla faixa de frequências.

2.3 Transformador de Corrente

Transformadores destinados à aplicações de medição, controle ou proteção podem ser de dois tipos: transformadores de corrente (TC's) e transformadores de potencial (TP's). Além de garantir o isolamento elétrico entre o circuito considerado e o medidor, tais transformadores disponibilizam no secundário valores padronizados de tensão (115V, 115/3V e $115/\sqrt{3}V$) e corrente (5A e 1A).

Para corrente elétrica como grandeza de interesse para medição, controle ou proteção, utiliza-se o transformador de corrente em configuração ilustrada na figura 8. Apresentam o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores convencionais e, em geral, o número de espiras do enrolamento primário é menor que o número de espiras do enrolamento secundário ($N1 < N2 \rightarrow I2 < I1$).

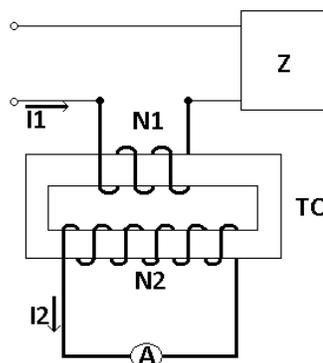


Figura 8 – Transformador de corrente.

Possuem duas classificações:

- TC's de serviço de medição – usados para a medição de energia ou corrente, apresentam classes de exatidão de 0,3%, 0,6% e 1,2 %;
- TC's de serviço de proteção – usados para a proteção de sistemas elétricos, apresentam classes de exatidão de 2,5%, 5,0% e 10,0 %.

O transformador de corrente ideal apresenta relações ampère-espira iguais nos enrolamentos primário e secundário. A relação de transformação nominal K_N é apresentada na equação (3). No caso real, a relação de transformação real K_R é dada pela equação (4).

$$\frac{I_P n}{I_S n} = \frac{N_2}{N_1} = K_N \quad (3)$$

$$\frac{I_P}{I_S} = K_R \quad (4)$$

Onde $K_N \neq K_R$.

A divergência entre as relações de transformação real e nominal dos transformadores de corrente deve-se ao fato de que, em transformadores reais, o circuito magnético introduz um erro que define a intensidade de excitação I_e gerada no secundário.

$$I_P N_1 = I_S N_2 + I_e N_2 \quad (5)$$

O modelo do transformador de corrente que considera a corrente de excitação, decomposta em corrente de magnetização I_m e corrente de perdas no circuito magnético I_a , é apresentado na figura 9.

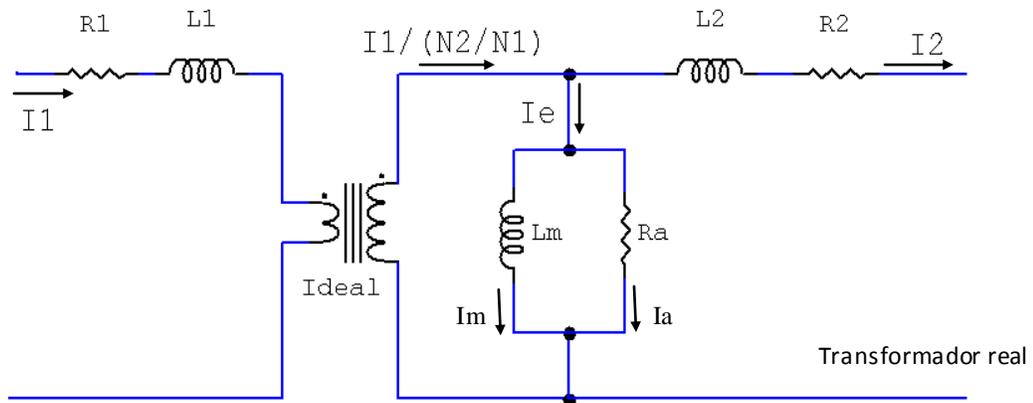


Figura 9 – Modelo do transformador de corrente.

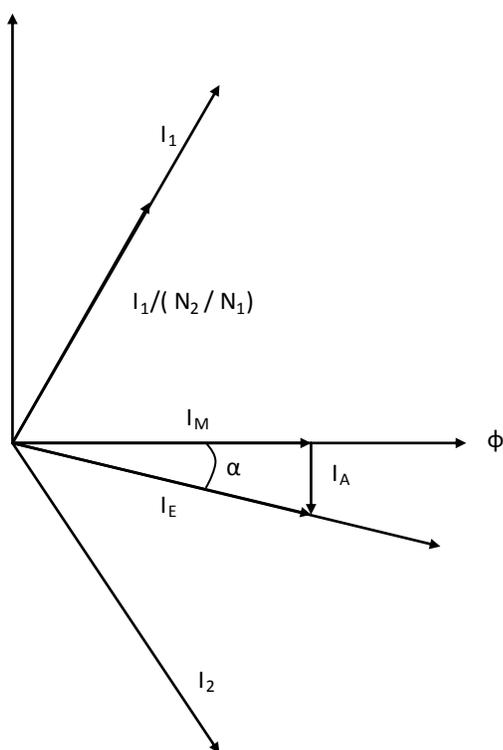


Figura 10 – Representação fasorial das correntes do secundário.

O núcleo dos transformadores de corrente de medição possui alta permeabilidade magnética, o que implica que o TC funciona com baixa excitação e poucas perdas, trabalhando em condições de baixa indução magnética (0,1 Tesla).

A partir de uma corrente aproximadamente quatro vezes a corrente nominal, o núcleo de um transformador de corrente satura. O limite de corrente no enrolamento primário também é refletido para o secundário.

Na prática, a alta permeabilidade magnética do núcleo dos transformadores de corrente garante que os instrumentos de medição, ligados ao enrolamento secundário, não sejam sujeitos a correntes superiores a $4I_{2N}$ ou às não linearidades provocadas pela saturação do núcleo. A precisão na faixa de operação linear garante precisão e proteção nos sistemas de medição.

3. Implementação de Sensores de Corrente

Os sensores de corrente com acoplador óptico e de efeito Hall foram implementados no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas de Potência (LASSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O objetivo de cada montagem era o de se ter equipamentos com relação de 1:1 e 2:1 entre corrente de entrada e tensão de saída com erros menores que 1%.

3.1 Implementação Sensor de Corrente com Isolador Óptico

O circuito usado para a análise do sensor de corrente com acoplador óptico, reapresentado na figura 9 abaixo, foi utilizado para simulação, através do *software CircuitMaker*, antes da montagem em *proto-board*.

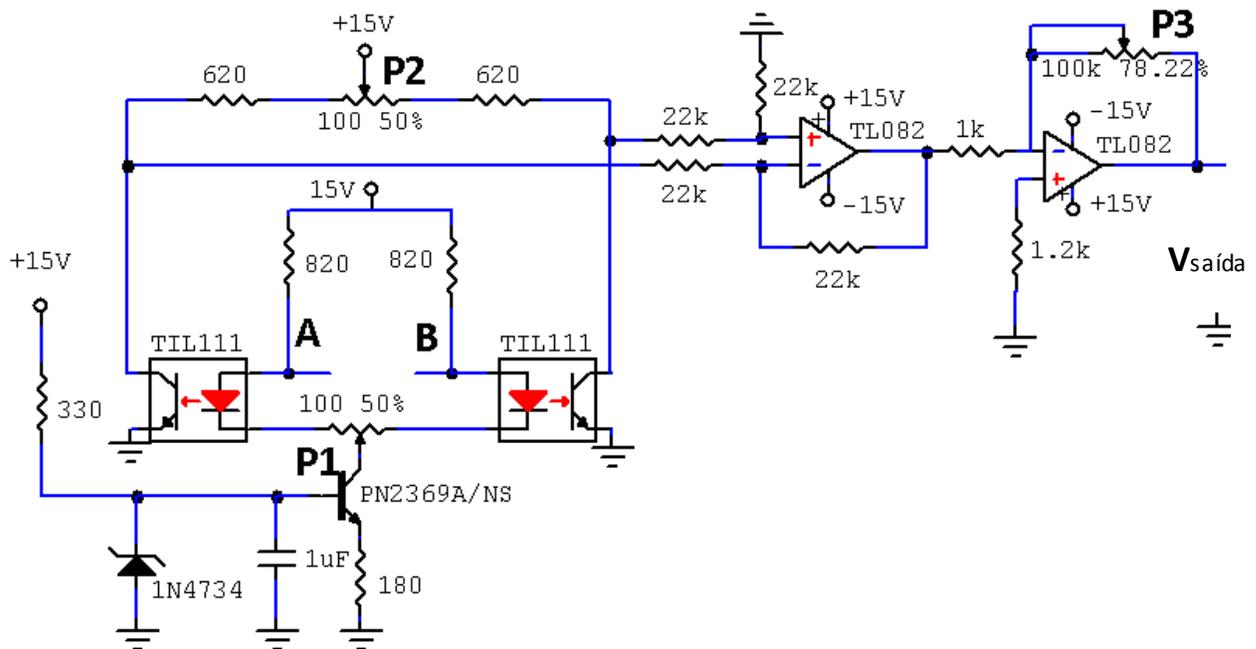


Figura 11 – Circuito sensor de corrente com isolamento óptico.

3.1.1 Simulação

O circuito foi simulado para vários valores de corrente usando $5\text{ m}\Omega$ como valor de resistência para o derivador entre os pontos A e B e $8\ \Omega$ como valor para carga. Os resultados da simulação apresentados na tabela 1 são utilizados para primeira análise de linearidade entre I_{entrada} e $V_{\text{saída}}$, como demonstrado na figura 10.

$I_{\text{ENTRADA RMS (A)}}$	$V_{\text{SAÍDA RMS (V)}}$
0,357	0,006
0,707	0,012
1,061	0,018
1,414	0,024
1,768	0,030
2,121	0,036
2,475	0,042
2,828	0,048
3,182	0,054
3,538	0,060

Tabela 1 – Sensor de corrente com isolador óptico: Simulação.

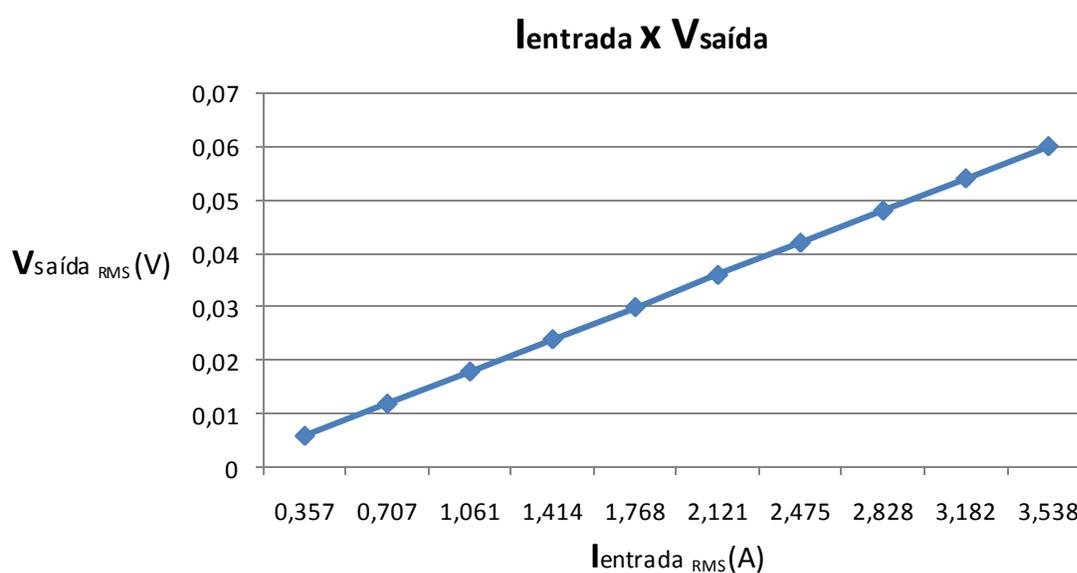


Figura 12 – Sensor de corrente com isolamento óptico: $I_{\text{entrada}} \times V_{\text{saída}}$ para simulação.

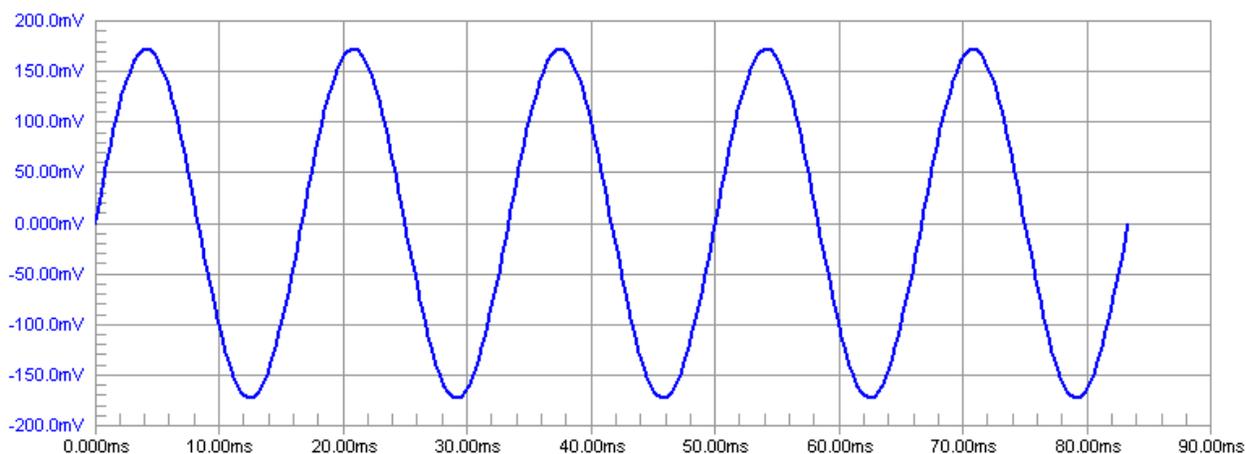


Figura 13 – Sensor de corrente com isolamento óptico: Simulação para $I_{pico} = 10A$.

3.1.2 Placa de circuito impresso

Depois de simulado e montado em *proto-board*, foram confeccionadas placas de circuito impresso para os sensores segundo o leiaute apresentado na figura 12.

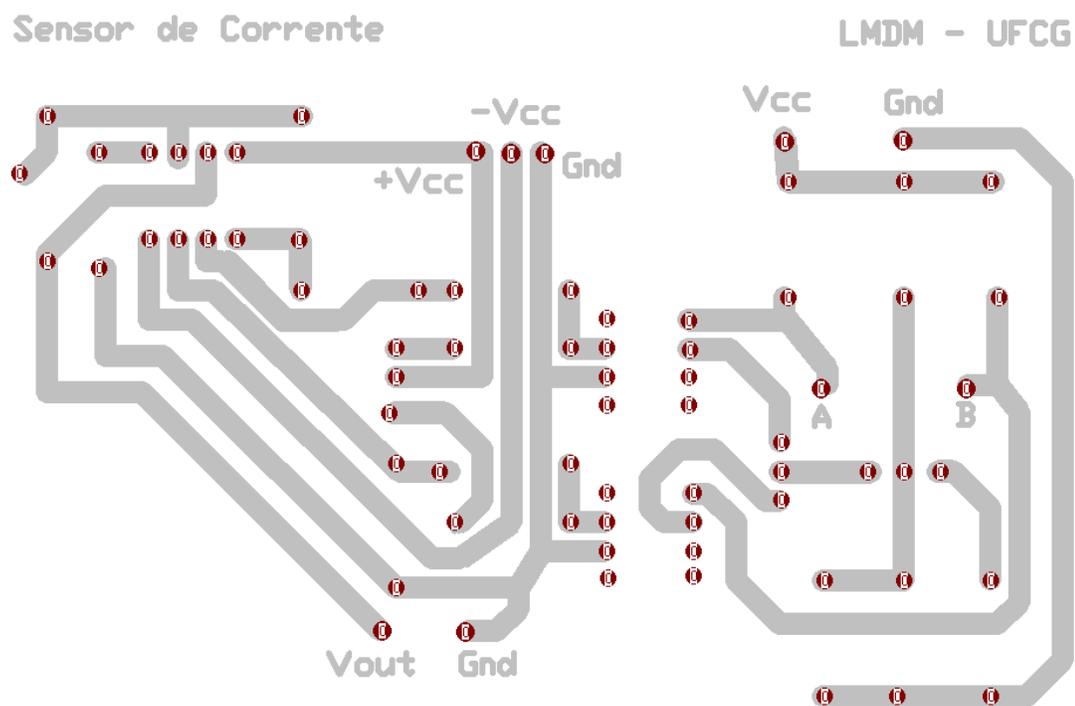


Figura 14 – Sensor de corrente com isolador óptico: Placa de circuito impresso.

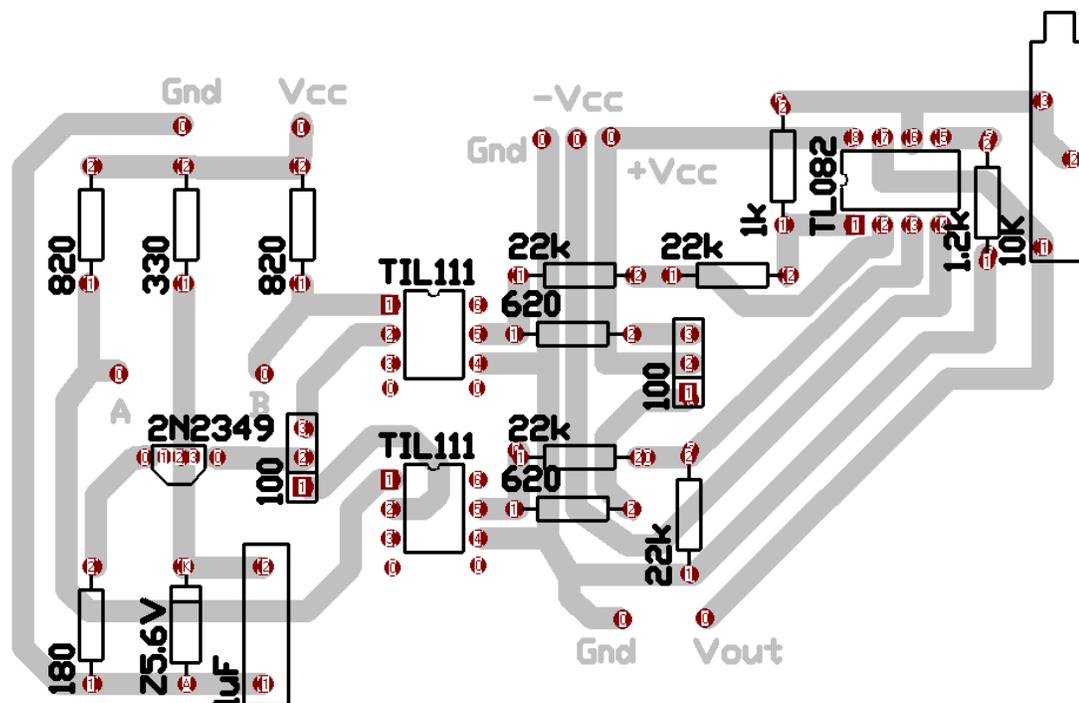


Figura 15 – Sensor de corrente com isolador óptico: Disposição de componentes.

3.1.3 Resultados experimentais

Com o circuito montado e efetuados os ajustes para sensores com relações de 1:1 e 2:1 entre corrente de entrada e tensão de saída, foram feitas medições até 5,0 A espaçadas 0,5 A entre si. Os resultados encontram-se nas tabelas 2 e 3.

I_{med} (A)	V_{med} (V)
0,538	0,244
1,055	0,481
1,548	0,715
2,072	0,955
2,577	1,173
3,009	1,390
3,512	1,598
4,079	1,865
4,516	2,079
5,028	2,285

Tabela 2 – Isolador óptico (relação 2:1): Resultados experimentais.

I_{med} (A)	V_{med} (V)
0,510	0,504
1,037	1,022
1,144	1,125
1,563	1,520
2,084	2,034
2,590	2,523
3,019	2,948
3,517	3,448
4,019	3,959
5,049	4,979

Tabela 3 – Isolador óptico (relação 1:1): Resultados experimentais.

3.1.4 Análise de resultados

Com os resultados das medições, através do *software* LabFit, a partir dos dados experimentais, foi feito o ajuste linear de uma reta que passa pela origem. A equação da reta foi usada para se obter uma relação de proporcionalidade entre a corrente de entrada e a tensão de saída, como é demonstrado na equação (6).

$$I_{K_p}(V) = K_p * V \quad (6)$$

Nas figuras 14 e 15 são apresentados os gráficos obtidos a partir do ajuste linear dos dados experimentais para os sensores com relações de 2:1 e 1:1, respectivamente. Nas tabelas 4 e 6 são apresentados os valores de corrente medidos I_{med} e os obtidos a partir do ajuste linear I_{K_p} , usados para o cálculo do erro percentual $\epsilon\%$. As relações obtidas para os sensores são apresentadas nas equações (7) e (8).

$$I_{K_p}(V) = 2,186 * V \quad (7)$$

$$I_{K_p}(V) = 1,018 * V \quad (8)$$

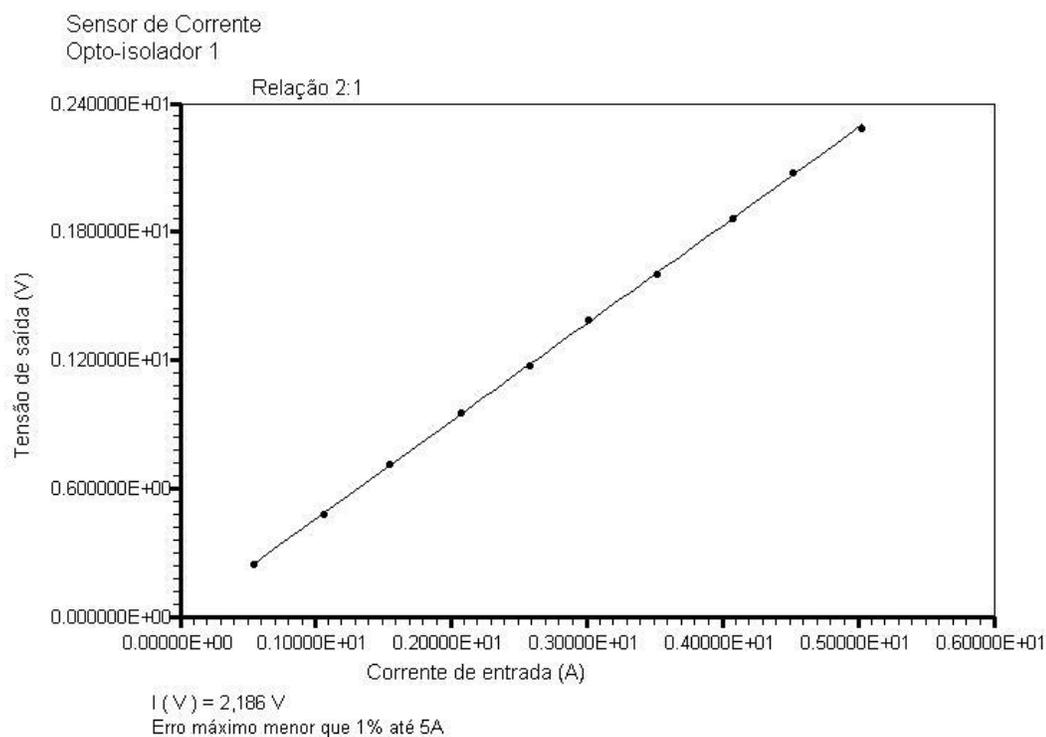


Figura 16 – Isolador óptico (relação 2:1): Ajuste linear de dados experimentais.

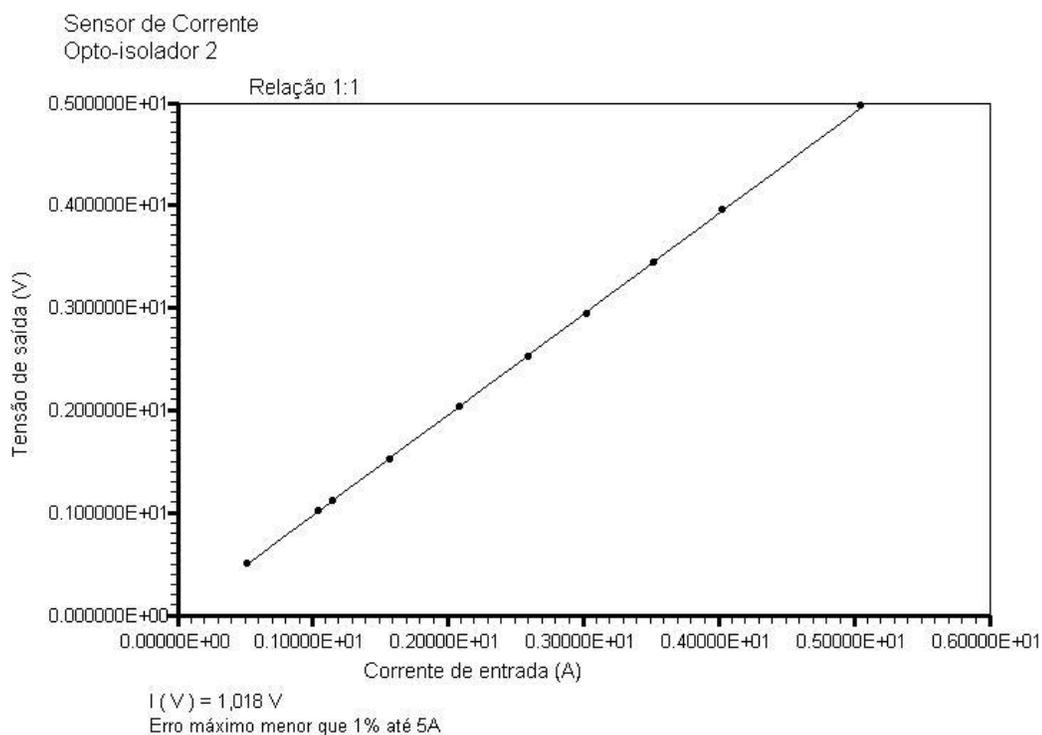


Figura 17 – Isolador óptico (relação 1:1): Ajuste linear de dados experimentais.

I_{med} (A)	V_{med} (V)	I_{kp} (V) = K_p * V	ε %
0,538	0,244	0,533	0,858
1,055	0,481	1,051	0,335
1,548	0,715	1,563	0,968
2,072	0,955	2,088	0,754
2,577	1,173	2,564	0,498
3,009	1,390	3,039	0,982
3,512	1,598	3,493	0,535
4,079	1,865	4,077	0,052
4,516	2,079	4,545	0,287
5,028	2,285	4,995	0,656

Tabela 4 – Acoplador optico (relação 2:1): Dados experimentais e erros.

Relação I:V	Erro Médio (%)	Erro Máximo (%)
2:1	0,592	0,982

Tabela 5 – Erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 2:1).

I_{med} (A)	V_{med} (V)	I_{kp} (V) = K_p * V	ε %
0,510	0,504	0,513	0,602
1,037	1,022	1,040	0,327
1,144	1,125	1,145	0,109
1,563	1,520	1,547	0,109
2,084	2,034	2,071	0,642
2,590	2,523	2,568	0,833
3,019	2,948	3,001	0,594
3,517	3,448	3,510	0,197
4,019	3,959	4,030	0,113
5,049	4,979	5,069	0,389

Tabela 6 – Dados experimentais e erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 1:1).

Relação I:V	Erro Médio (%)	Erro Máximo (%)
1:1	0,392	0,833

Tabela 7 – Acoplador optico (relação 1:1): Dados experimentais e erros.

Apesar de apresentar linearidade até correntes de 8,0 A *rms*, aproximadamente, os erros percentuais obtidos após o ajuste, associados às correntes acima de 5,0 A chegavam a quase 4,0 %, o que torna o circuito pouco útil para aplicações que necessitam de precisão. A depender da precisão e faixa de correntes desejadas, outras relações IxV podem ser utilizadas.

3.2 Implementação de Sensor de Corrente de Efeito Hall

O circuito usado para a análise do sensor de corrente de efeito Hall, é apresentado na figura 16. Durante os experimentos em *proto-board* foi verificado que cada volta no enrolamento primário correspondia a uma relação 10:1, aproximadamente. Assim, foram utilizadas 6 voltas para o sensor com relação 2:1 e 11 voltas para relação 1:1, o ajuste fino do ganho foi realizado a partir do potenciômetro.

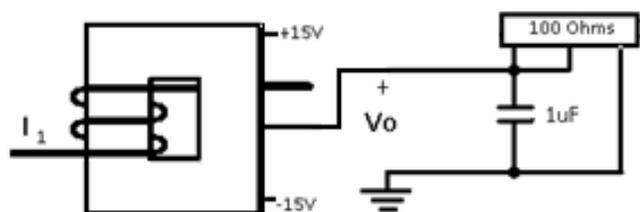


Figura 18 – Circuito sensor de corrente de efeito Hall.

3.2.1 Placa de circuito impresso

Na figura 17 é apresentado o leiaute da placa de circuito impresso.

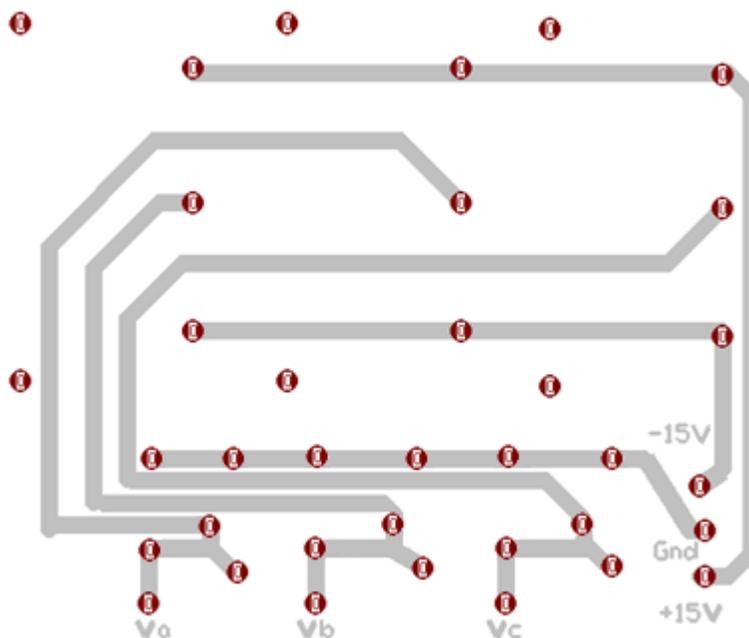


Figura 19 – Sensor de corrente de efeito Hall: Leiaute da placa de circuito impresso.

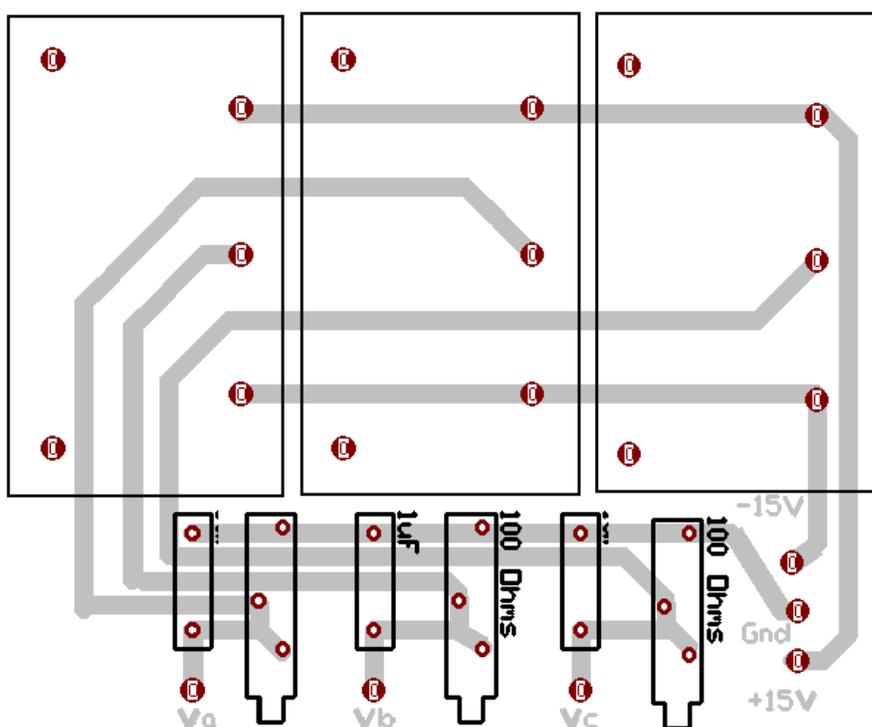


Figura 20 – Sensor de corrente de efeito Hall: Disposição de componentes.

3.2.2 Resultados experimentais

Com o circuito montado, depois de efetuados os ajustes para sensores com relações de 1:1 e 2:1 entre a corrente de entrada e a tensão de saída, foram feitas medições até 8,0A espaçadas 0,5 A entre si. Os resultados encontram-se nas tabelas 8 e 9.

I_{med} (A)	V_{med} (V)
0,539	0,545
1,059	1,073
1,581	1,594
2,269	2,296
2,585	2,620
3,120	3,160
3,565	3,606
4,011	4,060

I_{med} (A)	V_{med} (V)
4,516	4,576
5,038	5,103
5,550	5,630
6,160	6,250
6,570	6,670
6,950	7,060
7,580	7,620

Tabela 8 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 1:1): Resultados experimentais.

I _{med} (A)	V _{med} (V)
0,540	0,271
1,060	0,533
1,582	0,795
2,083	1,045
2,501	1,253
3,009	1,509
3,527	1,770
4,032	2,024

I _{med} (A)	V _{med} (V)
4,516	2,269
5,165	2,592
5,550	2,784
6,080	3,050
6,580	3,302
7,060	3,550
7,590	3,813
8,080	4,065

Tabela 9 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 2:1): Resultados experimentais.

3.2.3 Análise de resultados

Com os resultados das medições, através do *software* LabFit, foi feito o ajuste linear dos dados experimentais a partir de uma reta que passa pela origem. A equação da reta foi usada para se obter uma relação de proporcionalidade entre a corrente de entrada e a tensão de saída, como é demonstrado na equação (6), reescrita abaixo.

$$I_{K_p}(V) = K_p * V \quad (6)$$

Nas figuras 19 e 20 são apresentados os gráficos obtidos a partir do ajuste linear dos dados experimentais para os sensores com relações de 2:1 e 1:1, respectivamente. Nas tabelas 4 e 6 são apresentados os valores de corrente medidos I_{med} e os obtidos a partir do ajuste linear I_{K_p} , usados para o cálculo do erro percentual $\epsilon\%$. As relações obtidas para os sensores são apresentadas nas equações (9) e (10).

$$I_{K_p}(V) = 1,991 * V \quad (9)$$

$$I_{K_p}(V) = 0,992 * V \quad (10)$$

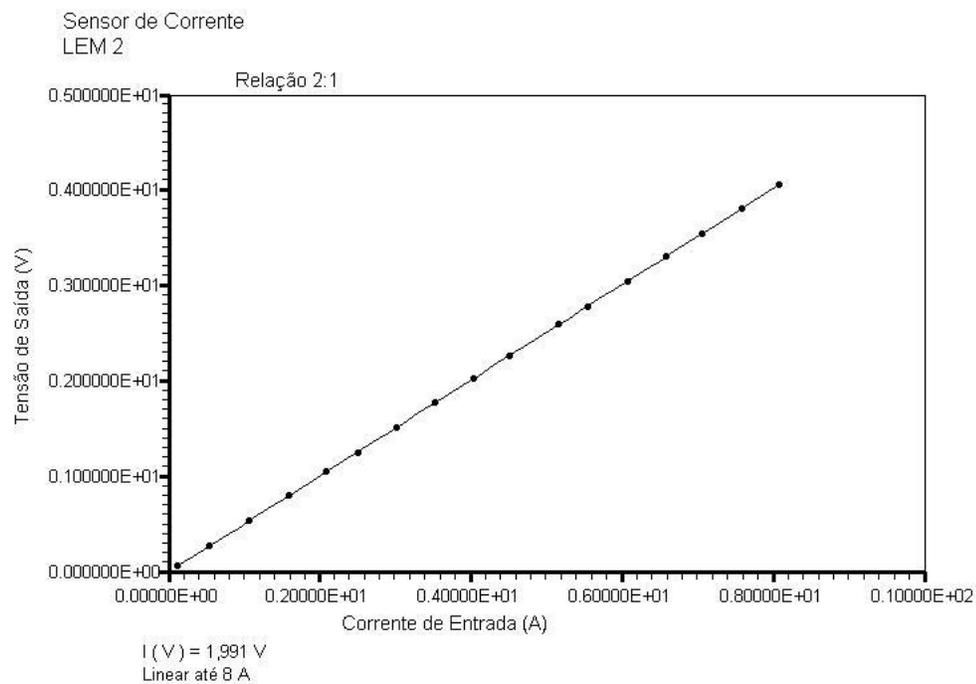


Figura 21 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 2:1): Ajuste linear de dados experimentais.

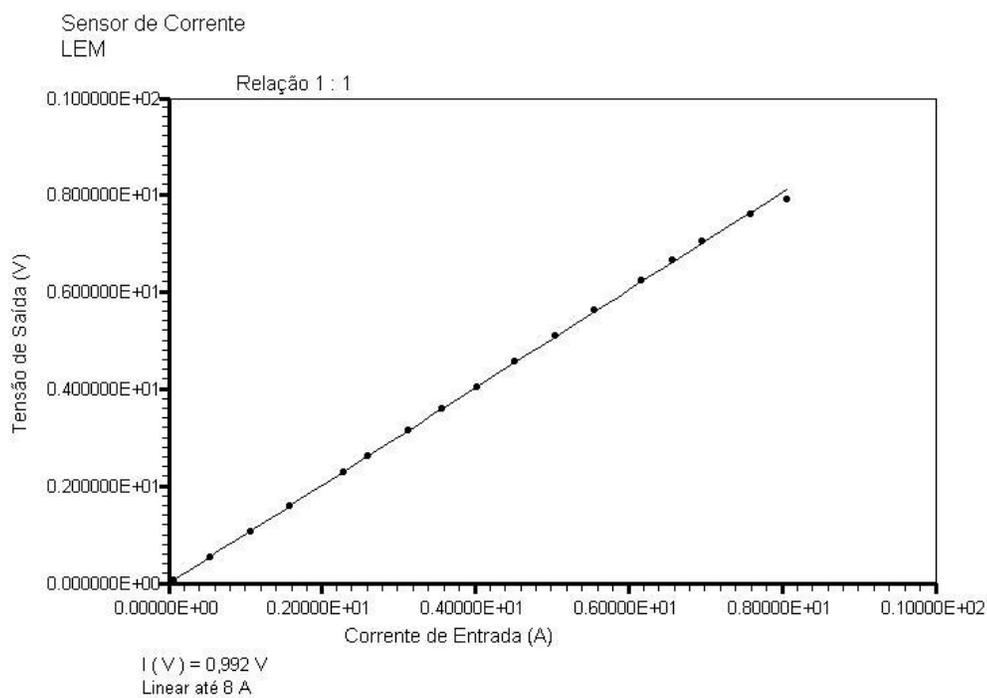


Figura 22 – Sensor de corrente de efeito Hall (relação 1:1): Ajuste linear de dados experimentais.

I_{med} (A)	V_{med} (V)	I_{kp} (V) = K_p * V	ε %
0,540	0,271	0,539	0,185
1,060	0,533	1,061	0,000
1,582	0,795	1,583	0,000
2,083	1,045	2,081	0,000
2,501	1,253	2,495	0,239
3,009	1,509	3,004	0,166
3,527	1,770	3,524	0,000
4,032	2,024	4,029	0,000
4,516	2,269	4,517	0,000
5,165	2,592	5,161	0,000
5,550	2,784	5,543	0,126
6,080	3,050	6,073	0,115
6,580	3,302	6,574	0,000
7,060	3,550	7,068	0,113
7,590	3,813	7,592	0,000
8,080	4,065	8,093	0,161

Tabela 10 – Sensor de efeito Hall (relação 2:1): Dados experimentais e erros.

Relação I:V	Erro Médio (%)	Erro Máximo (%)
2:1	0,069	0,239

Tabela 11 – Erros do sensor de corrente com acoplador optco (relação 2:1).

I_{med} (A)	V_{med} (V)	I_{kp} (V) = K_p * V	ε %
0,539	0,545	0,541	0,371
1,059	1,073	1,064	0,472
1,581	1,594	1,581	0,000
2,269	2,296	2,278	0,397
2,585	2,620	2,599	0,541
3,120	3,160	3,135	0,481
3,565	3,606	3,577	0,337
4,011	4,060	4,027	0,399
4,516	4,576	4,539	0,509
5,038	5,103	5,062	0,476
5,550	5,630	5,585	0,631
6,160	6,250	6,200	0,649
6,570	6,670	6,617	0,715
6,950	7,060	7,003	0,762
7,580	7,620	7,559	0,277

Tabela 12 – Sensor de efeito Hall (relação 1:1): Dados experimentais e erros.

Relação I:V	Erro Médio (%)	Erro Máximo (%)
1:1	0,468	0,762

Tabela 13 – Erros do sensor de corrente de efeito Hall (relação 1:1).

Os sensores de corrente de efeito Hall em *Loop* fechado apresentam excelente precisão devido à compensação de fluxo. Apesar de poder ser utilizado para faixas maiores de corrente, utilizando um número menor de voltas em seu enrolamento primário, na faixa de corrente estudada, apresenta facilidade de ajuste e montagem para sistemas de aquisição de dados.

4. Considerações Finais

Durante a elaboração deste trabalho, foram realizados experimentos e montagens economicamente mais acessíveis como alternativa ao uso de transformadores de corrente (TC's) em sistemas de medição de corrente elétrica.

Sensores de corrente baseados em efeito Hall apresentaram erros menores que 1,0 % na faixa de corrente entre 0 e 8,0 A. Podem ser usados para faixas maiores de corrente, desde que relações maiores que 2:1 entre corrente de entrada e tensão de saída sejam estabelecidas. Apresentaram precisão e segurança nos resultados obtidos durante os experimentos na medição de diferentes valores de corrente.

Os sensores de corrente baseados em isolador óptico, apresentaram bons resultados na faixa de corrente estudada. Porém, algumas dificuldades para o ajuste reduz sua faixa de operação. Durante as montagens, o limite obtido foi de 5,0 A. Ainda assim, é uma alternativa economicamente viável aos TC's e proporciona isolamento elétrico de 1,5 KV entre os estágios de entrada e saída.

5. Referências Bibliográficas

Medeiros, Solon de. *Fundamentos de Medidas Elétricas*. 2ª Edição. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1981.

Lira, José Gutemberg A. *Sistema de Aquisição de Dados para Monitoramento e Diagnóstico Remoto das Condições de Pára-Raios de Óxido de Zinco*. Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Tese de Doutorado, 2007.

Palaniappan , Rasappa G. *A Control Strategy for Reference Wave Adaptive Current Generation*. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-27, nº 2, May 1980.

Montero, Luis Reyes Rosales. *Monitorização e Controle em Tempo Real Baseados em Microcomputador para um Microgerador Síncrono e Motor CC*. Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, Tese de Doutorado, 1995.

Oliveira, Prícia Cals . *Análise de Transformadores de Corrente para Medição*. Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 2001.

NBR 6856/92, Transformador de Corrente – Especificação. Rio de Janeiro, Abril de 1992.