

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VINÍCIUS MENEZES LOURENÇONI

**SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SENSORES DE
EFEITO HALL**

VIÇOSA
2016

VINÍCIUS MENEZES LOURENÇONI

**SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SENSORES DE
EFEITO HALL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

VIÇOSA
2016

VINÍCIUS MENEZES LOURENÇONI

**SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SENSORES DE
EFEITO HALL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de Dezembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. M.Sc. Allan Fagner Cupertino - Membro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. M.Sc. Erick Matheus da Silveira Brito - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Não desista. Geralmente é a última chave do chaveiro que abre a porta.”

Paulo Coelho

Aos meus pais, Eugênio e Ana, à minha irmã Ana Flávia, à Michelle e à Deus

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, sem o qual nada seria possível. Um agradecimento especial aos meus pais por sempre investirem no meu aprendizado, à minha irmã pela amizade e apoio de sempre, à Michelle por me transmitir felicidade e pelo apoio nessa jornada.

Aos familiares deixo meu muito obrigado pelos incentivos e sabedorias compartilhadas comigo.

Agradeço a todos os professores do departamento de engenharia elétrica pelos conhecimentos compartilhados ao longo desses anos, bem como todos os professores dos quais já tive o prazer de ser aluno. Em especial ao professor Heverton Augusto Pereira pela orientação, ideias e conhecimentos transmitidos ao longo da elaboração deste trabalho. Agradeço ainda ao professor Leonardo Bonato Felix pelo uso da “impressora” de circuitos impressos e ao funcionário do departamento, João.

Pela imensa ajuda prestada, além do conhecimento passado, fica meu agradecimento ao aluno e amigo Felipe Antunes. Ainda em relação a contribuições acadêmicas, uma outra pessoa que merece um agradecimento especial é o professor Erick Matheus Brito.

O agradecimento final fica por conta das amizades, tanto as criadas em Viçosa como os mais antigos de Nepomuceno.

Resumo

A medição de corrente e tensão pode ser usada de diversas formas no que tange a engenharia elétrica. Existem diversos modos para aquisição desses dados. Neste trabalho realiza-se tal aquisição através de sensores que utilizam o efeito Hall para realizar a transdução tanto de corrente (transdutor de corrente LA 55-P) quanto de tensão (transdutor de tensão LV 25-P). Utilizando-se esses sensores (transdutores) e os componentes necessários para a aferição dos dados, propôs-se a criação de uma placa de circuito impresso. Os requisitos básicos para o bom funcionamento da PCI foram observados e devidamente atendidos. Objetiva-se com este trabalho a criação de um sistema de aquisição de dados (corrente e tensão) trifásicos sendo possível a utilização desses dados de diversas formas, como para análise de máquinas elétricas de modo geral (desde que respeitados os valores nominais da placa) e na geração de energia, principalmente através de fontes alternativas, por meio de análises realizadas a partir dos dados medidos.

Abstract

The measurement of current and voltage can be used for many applications regarding to electrical engineering. There are many possibilities for data (current and voltage) acquisition, in this work the acquisition is done by sensors that use the Hall effect to realize the transduction both current (current transducer LA 55-P) and voltage (voltage transducer LV 25-P). Through the use of these sensors (transducers) and the components used in the data admeasurement, the design of a printed board circuit was proposed. The basics requirements for the good operation of the PCB was observed and they are properly attended. Therefore, it is the main objectives of this work the creation of a data acquisition system (current and voltage) three-phase and this data can be used for many ways as for tests in electrical machines (since the nominal values are respected) and in energy generation, mainly by alternative sources, by means of measured data analysis.

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	Sistemas de medição – breve histórico.....	15
1.2	Medição de corrente e tensão	16
1.2.1	Amperímetros, voltímetros e multímetros.....	16
1.2.2	Outros equipamentos utilizados na medição de tensão e corrente	17
1.3	Motivação.....	18
1.4	Objetivos.....	18
1.5	Organização do Trabalho.....	18
2	Conceitos Básicos.....	19
2.1	Efeito Hall	19
2.2	Sensor de Efeito Hall.....	20
2.3	Printed Circuit Board (PCB)	21
2.3.1	Características físicas de PCI	22
2.3.2	Placa de face simples.....	23
2.3.3	Roteamento das trilhas	24
2.3.4	Plano Terra (<i>ground</i> – GND)	27
2.4	Capacitores de desacoplamento e de bulk	28
2.4.1	Capacitores de desacoplamento.....	29
2.4.2	Capacitores de bulk	29
2.5	Regulador de tensão.....	29
2.6	Sensores utilizados	30
2.7	Geração de offset.....	32
2.8	Proteus	33
3	Desenvolvimento da PCB	34
3.1	Esquemático	34
3.2	Dimensionamento da fonte de alimentação.....	35
3.3	Dimensionamento dos Sensores	35
3.3.1	Níveis máximos de medição para corrente e tensão.....	36
3.3.2	Resistores utilizados nas saídas dos sensores	37
3.4	Dimensionamento do circuito de offset.....	39
3.5	Dimensionamento dos capacitores	39
3.6	Flexibilidade delta-Y	40
3.7	Placa e trilhas.....	41
3.7.1	Placa para montagem da PCI.....	42
3.7.2	Roteamento das trilhas	43
3.8	Testes de tensão e corrente	45

3.8.1	Sensores de tensão	45
3.8.2	Sensores de corrente	46
4	Resultados	47
4.1	PCB.....	47
4.2	Validação da placa.....	50
4.2.1	Medição de tensão	50
4.2.2	Medição de corrente	53
5	Conclusões.....	56
5.1	Propostas de continuidade e melhorias.....	56
	Referências Bibliográficas	58

Lista de Figuras

Figura 1 - (a) Circuito básico de um amperímetro CC. (b) Circuito básico de um voltímetro CC (retirada de [4]).	16
Figura 2 - Osciloscópio digital (retirada de [5]).	17
Figura 3 - Efeito Hall. O campo magnético é direcionado para dentro do plano da página. A força magnética sobre uma partícula carregada é ascendente para uma corrente para a direita se a corrente deve-se a (a) partícula positiva movendo-se para a direita ou (b) a partícula negativa movendo-se para a esquerda (retirada de [4]).	19
Figura 4 - Esquema generalizado de um sensor baseado no efeito Hall (modificada de [9]).	21
Figura 5 - Disposição dos grupos funcionais em uma PCI (modificada de [14]).	23
Figura 6 - Gráficos para determinação da capacidade de condução de corrente e dimensionamento de condutores externos em cobre para vários aumentos de temperatura acima da ambiente (retirada de [15]).	25
Figura 7 - Exemplo de trilha com conexão mais curta (retirada de [16]).	26
Figura 8 - Exemplo de emprego de polígonos no roteamento (retirada de [16]).	27
Figura 9 - Exemplo de ground grid (retirada de [14]).	28
Figura 10 - Indutância dos sistemas de terra (retirada de [14]).	28
Figura 11 - Esboço com dimensões das vistas inferior e lateral do TMP 15215 (modificada de [17]).	30
Figura 12 - Transdutor de corrente LEM LA 55-P (retiradas de [6]).	31
Figura 13 - Transdutor de tensão LEM LV 25-P. (Imagem (a) retirada de [18] e (b) retirada de [7]).	31
Figura 14 - Exemplo da construção de um sensor de corrente de efeito Hall em malha fechada (modificado de [9]).	32
Figura 15 - Multiplicador de ganho constante com amplificador inversor (retirada de [20]).	33
Figura 16 - Esquemático criado na plataforma ISIS do Proteus.	34
Figura 17 - Esquema da conexão a ser realizada no sensor LV 25-P (retirada de [7]).	36
Figura 18 - Esquema da conexão a ser realizada no sensor LV 55-P (retirada de [6]).	38
Figura 19 - Esquemático retirado do Proteus do circuito utilizado na geração do offset de -2,5 Vcc.	39
Figura 20 - Ligação de gerador em estrela (a) e em delta (b) (retirada de [21]).	40
Figura 21 - Bornes de ligação para realização da flexibilidade delta-Y da placa no <i>software</i> Proteus.	41
Figura 22 - Visualização das trilhas de parte da placa no <i>software</i> Proteus para análise da flexibilidade delta-Y.	41
Figura 23 - Layout da PCB (visualização superior apresentando as trilhas) criada no Proteus. Ocultou-se o plano terra (existente na placa) propositalmente para uma melhor visualização dos componentes.	42

Figura 24 - Cabo condutor da corrente a ser medida atravessando o sensor LA 55-P (retirada de [22]).	43
Figura 25 - Largura de 30 mils utilizada nas trilhas de alimentação CC dos sensores e do amplificador.	44
Figura 26 - Largura de 100 mils utilizada nas trilhas de entrada dos sensores de tensão.	44
Figura 27 - Largura de 50 mils utilizada nas trilhas de saída do sinal medido até os conectores coaxiais.	44
Figura 28 - Duas distâncias entre trilhas para análise de proximidade relacionada à tensão.	45
Figura 29 - Forma de onda e tensão de pico a pico para teste realizado nos sensores de tensão.	46
Figura 30 - Plotadora (ou impressora) de placa de circuito.	47
Figura 31 - Placa de fenolite cobreada após serem feitos os furos e as trilhas.	48
Figura 32 - Vista superior da placa, onde pode-se observar os componentes.	48
Figura 33 - Bancada contendo a placa de medição e a carga utilizada na validação.	50
Figura 34 - Valor de tensão encontrado no resistor de medição do sensor de tensão.	51
Figura 35 - Tensão obtida através do Arduino referente à saída da placa de medição.	52
Figura 36 - Gráfico obtido através da sonda de corrente no osciloscópio na escala de 100 mV/A.	53
Figura 37 - Valor de tensão encontrado no resistor de medição do sensor de corrente.	54
Figura 38 - Corrente obtida através do Arduino referente à saída da placa de medição.	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Unidades utilizadas como básicas do SI (modificada de [2]).	15
Tabela 2 - Algumas características de RF/Analógico <i>versus</i> PCIs com base digital (modificada de [12]).	22
Tabela 3 - Espaçamento entre condutores (modificada de [15]).	26
Tabela 4 - Algumas especificações do TMP 15215 (retirada de [17]).	29
Tabela 5 - Valores utilizados como nominais de corrente para ambos os transdutores e as constantes relacionadas às razões de conversão para cada um dos sensores.	36
Tabela 6 - Valores de resistência de medição informados no <i>datasheet</i> do LA 55-P (retirada de [6]).	49
Tabela 7 - Valores de resistência de medição informados no <i>datasheet</i> do LV 25-P (retirada de [7]).	49
Tabela 8 - Medições de tensão em estrela e delta para validação da flexibilidade delta-Y.	52
Tabela 9 - Valores medidos e calculados para tensão.	53

1 Introdução

1.1 Sistemas de medição – breve histórico

Sistemas de medição têm sido utilizados desde os primórdios da civilização. Um dos primeiros sistemas de medição usados em larga escala, foi o *cubit* (ou cúbito), que era a unidade utilizada pelos egípcios por volta dos anos 3000 A.C., e consistia no comprimento do antebraço mais a largura da mão do faraó, ou seja, a distância do cotovelo à ponta do dedo médio [1]. Muitas outras unidades relacionadas às partes do corpo surgiram com o passar do tempo, entre elas: o pé (pés ou *feet*), a polegada (*inch*) e a jarda (*yard*).

Em vista da dificuldade criada por meio dos diferentes tipos de unidades utilizados para um mesmo tipo de medição, em 1790, o governo francês propôs a criação de um sistema de unidades que substituísse todos os sistemas vigentes. Coube à Academia Francesa de Ciências a criação de um sistema universal de pesos e medidas. Em 1795 as propostas foram aprovadas e entraram em vigor na França, ficando conhecidas como sistema métrico de unidades. Esse sistema interessou outros países, e em 1875, dezessete países assinaram o que ficou conhecido como “Convenção Métrica”. Estados Unidos e Inglaterra foram um dos 17 países, mas reconheceram tal legalidade apenas para transações internacionais [2].

Em 1960 estruturou-se e reconheceu-se em uma convenção internacional o Sistema Internacional de Unidades (SI), que adotava seis unidades como básicas. A Tabela 1 mostra as grandezas com suas respectivas unidades e respectivos símbolos utilizados no SI [2] mais a adição feita posteriormente em 1971 referente à quantidade de substância [1].

Tabela 1 - Unidades utilizadas como básicas do SI (modificada de [2]).

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente Elétrica	ampère	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de substância	mol	mol
Intensidade Luminosa	Candela	cd

1.2 Medição de corrente e tensão

Em relação à medição de corrente e tensão, todo esse processo deu-se a partir de 1820 com a utilização do chamado “galvanômetro de tangente” que relacionava efeitos magnéticos com corrente, porém havia necessidade de alinhamento perpendicular do campo magnético produzido com o campo terrestre. Então, em 1882, Jacques Arsène d’Ansoval propôs a utilização de um galvanômetro que não dependia do campo terrestre [3].

1.2.1 Amperímetros, voltímetros e multímetros

Tratam-se dos modelos mais básicos de medição de corrente e tensão, os quais utilizam, em sua maioria, um galvanômetro e um resistor em seus circuitos.

Para a montagem de um amperímetro C.C. faz-se uso de bobina móvel e ímã permanente (galvanômetro), entretanto, tal conjunto opera com baixas intensidades de correntes. Para a medição de grandes intensidades de corrente deve-se adicionar um resistor em paralelo com a bobina móvel ao qual se dá o nome de derivador ou *shunt* [2], o circuito desse tipo de amperímetro (para baixa intensidade de corrente) é o mostrado na Figura 1-(a).

Já no caso do voltímetro C.C., adiciona-se uma resistência em série (ou resistência multiplicadora) ao galvanômetro. O resistor tem função de limitação de corrente. Esse circuito é mostrado na Figura 1(b).

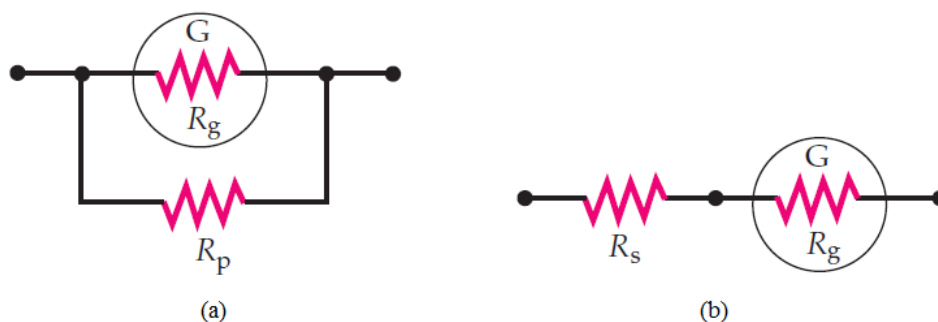


Figura 1 - (a) Circuito básico de um amperímetro CC. (b) Circuito básico de um voltímetro CC (retirada de [4]).

A parte circulado na Figura 1 mostra o galvanômetro com sua resistência interna R_g , no amperímetro pode-se notar a resistência em paralelo (R_p - resistor *shunt*) e no voltímetro a em série (R_s).

Nos dias de hoje, utiliza-se muito do multímetro (capaz de medir corrente, tensão, resistência, entre outros). Quando se trata de grandezas em corrente alternada, esse aparelho retorna em sua tela o valor eficaz (rms – *root mean square*).

Porém, um problema observado no uso de multímetros diz respeito à forma de onda a ser medida. Caso não se trate de uma onda senoidal perfeita (ou a mais perfeita possível, ou seja, sem ruídos e harmônicas), um multímetro convencional pode informar valores errados de tensão e corrente. Para a resolução desse problema, surgiu a tecnologia de multímetros “*true rms*”, os quais são capazes de informar a grandeza rms mesmo que não se trate de uma onda senoidal perfeita.

1.2.2 Outros equipamentos utilizados na medição de tensão e corrente

Quando deseja-se saber o formato da onda bem como suas características, um osciloscópio pode ser uma ótima ferramenta.

Existem osciloscópios analógicos e digitais, sendo este último mais moderno e possui mais funções, entre elas a auto escala e informação de valores relacionados à onda mostrada. Alguns modelos possuem ainda opção para gravar os dados analisados em um dispositivo usb, além de muitas outras vantagens em relação aos demais instrumentos. Um exemplo de um osciloscópio digital é mostrado na Figura 2.



Figura 2 - Osciloscópio digital (retirada de [5]).

Outros equipamentos utilizados são os transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), os quais são realmente transformadores que diminuem altos níveis de tensão e corrente a níveis mais baixos, o que facilita a medição além de aumentar a segurança.

Os componentes utilizados nesse trabalho também realizam a transdução da corrente e tensão, e fazem isso através do efeito Hall, sendo capazes de realizar medições tanto de grandezas contínuas, alternadas e pulsadas [6] [7].

1.3 Motivação

A medição trifásica de corrente e tensão é de grande importância para análises elétricas. Nos tempos de hoje, onde cada vez mais se buscam fontes de energia alternativas e limpas, a análise das formas de ondas das tensões e corrente geradas (e conseqüentemente a potência). Nessas análises podem-se observar os valores de pico, a presença de componentes harmônicas, afundamentos de tensão e frequência, traz grandes benefícios ao aproveitamento da energia proveniente de fontes alternativas.

Em função dessas necessidades, propôs-se a criação de um sistema de medição trifásico de tensão e corrente, e para realizar o sensoriamento optou-se pelo uso de sensores que utilizam do efeito Hall na transdução.

1.4 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é a criação de um sistema de medição trifásico utilizando sensores de efeito Hall, que de forma geral são transdutores de corrente e de tensão.

Tendo tal objetivo em mente, o mesmo será realizado através da construção de uma placa de circuito impresso, respeitando-se na medida do possível as limitações para o mínimo de interferência nos sinais medidos.

1.5 Organização do Trabalho

Dividiu-se esse trabalho em 5 capítulos, sendo eles: introdução, conceitos básicos, desenvolvimento da PCB (*printed board circuit*), resultados e conclusão.

O primeiro capítulo trouxe um breve histórico sobre sistemas de medição além da motivação e objetivos do trabalho. O capítulo 2 tem como objetivo informar as especificações necessárias na construção de uma placa de circuito impresso bem como a teoria em cima dos sensores que utilizam efeito Hall para transduções apresentando também os componentes utilizados neste trabalho.

O capítulo 3 demonstra a metodologia utilizada na construção da PCB e os dimensionamentos dos componentes a serem utilizados. Os dois últimos capítulos (4 e 5) trazem os resultados observados na validação da placa, bem como a própria placa, as conclusões feitas e propostas de continuidade do trabalho.

2 Conceitos Básicos

Nessa seção serão mostradas algumas definições, bem como algumas regras básicas no que diz respeito do *design* e construção de placas de circuito impresso.

2.1 Efeito Hall

Em 1879, Edwin Herbert Hall, mostrou que elétrons que se movem no interior de um fio de cobre podem ser desviados por um campo magnético, esse efeito veio mais tarde a ser chamado de efeito Hall. Tal fenômeno permite verificar qual a carga de portadores em um condutor e também permite medir o número de portadores por unidade de volume do condutor [8]. O ponto de maior interesse neste trabalho é o fato do efeito Hall fornecer um método conveniente para medição de campos magnéticos.

Analisando-se a Figura 3, pode-se notar a presença de um vetor de força magnética e a Equação (1) descreve tal força.

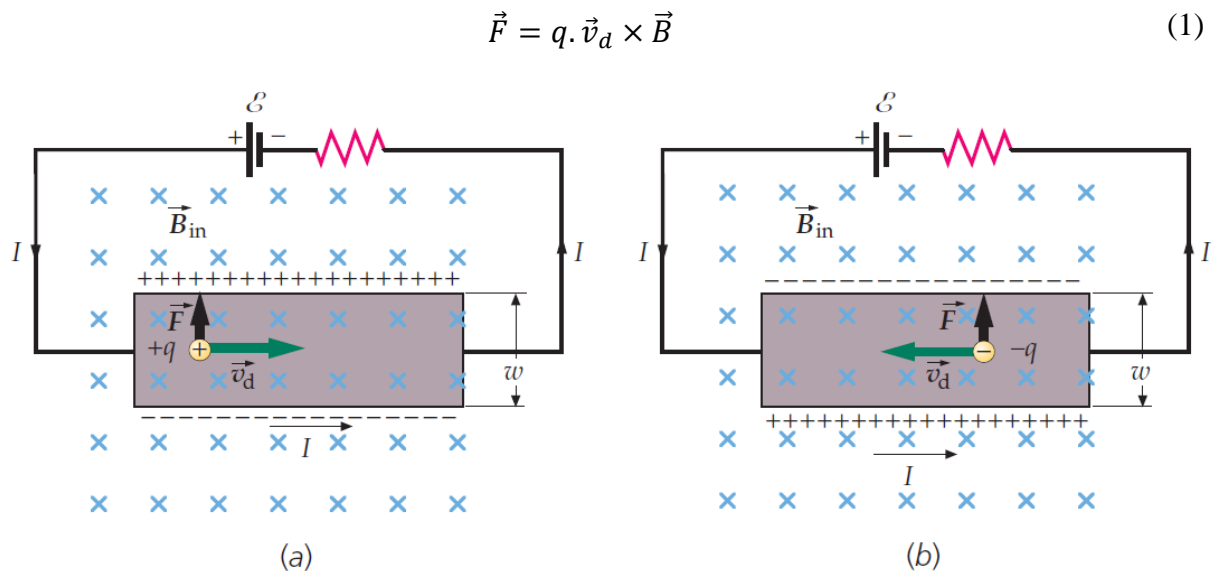


Figura 3 - Efeito Hall. O campo magnético é direcionado para dentro do plano da página. A força magnética sobre uma partícula carregada é ascendente para uma corrente para a direita se a corrente deve-se a (a) partícula positiva movendo-se para a direita ou (b) a partícula negativa movendo-se para a esquerda (retirada de [4]).

Quando existe a atuação da força descrita na Equação (1), há um acúmulo de cargas (positivas ou negativas, dependendo da carga da partícula que está movendo na fita de cobre em questão) no lado superior da fita. Tal separação de cargas leva à criação de um campo

elétrico \vec{E} que exerce uma força na partícula a qual se opõe à força magnética. Os elétrons continuam a se acumular em uma das bordas da fita até que a força magnética se equilibre com a força exercida pelo campo elétrico. Quando isso ocorre, uma das bordas fica com um potencial maior que a outra e esse potencial pode ser medido através de um voltímetro sensível. A diferença de potencial entre a borda superior e inferior da fita é conhecida como tensão Hall e é dada pela Equação (2), sabendo-se que $E_H = v_d \cdot B$.

$$V_H = E_H \cdot w = v_d \cdot B \cdot w \quad (2)$$

Onde E_H é o campo elétrico gerado pela separação das cargas e w é a largura da fita. A magnitude da corrente é dada pela Equação (3).

$$|I| = |q| \cdot n \cdot v_d \cdot A \quad (3)$$

Onde n é a concentração de portadores de carga (número de portadores por unidade de volume) e A é a área de seção reta da fita. Sabendo-se que $A = w \cdot t$ onde t é a espessura da fita e considerando-se q como a carga de um único elétron, pode-se escrever a Equação (4).

$$V_H = \frac{|I|}{n \cdot t \cdot e} B \quad (4)$$

Logo, pode-se calibrar uma fita de cobre medindo-se a tensão Hall para corrente e campo magnético conhecidos. Assim, a fita pode ser usada futuramente para medição de campo magnético desconhecido através da medição da tensão Hall para uma corrente conhecida [4]. As equações apresentadas foram retiradas de [4].

2.2 Sensor de Efeito Hall

Em geral, o elemento Hall é construído por uma fina camada de um material condutivo, sendo suas conexões de saída perpendiculares à direção do fluxo de corrente de entrada. Apesar de se tratar de um sensor primariamente para medição de campo magnético, esse tipo de sensor pode ser usado como peça fundamental em muitos outros tipos de sensores, como no caso do presente trabalho para corrente e tensão [9].

Um esquema generalizado para um sensor baseado no efeito Hall é mostrado na Figura 4. Nesse esquema pode-se observar a presença do sensor de efeito Hall (onde se encontra o elemento Hall). Tal esquema tem como entrada uma quantidade a ser medida (corrente ou tensão por exemplo) e retorna na saída um sinal elétrico, o qual é usado como base na medição requerida.

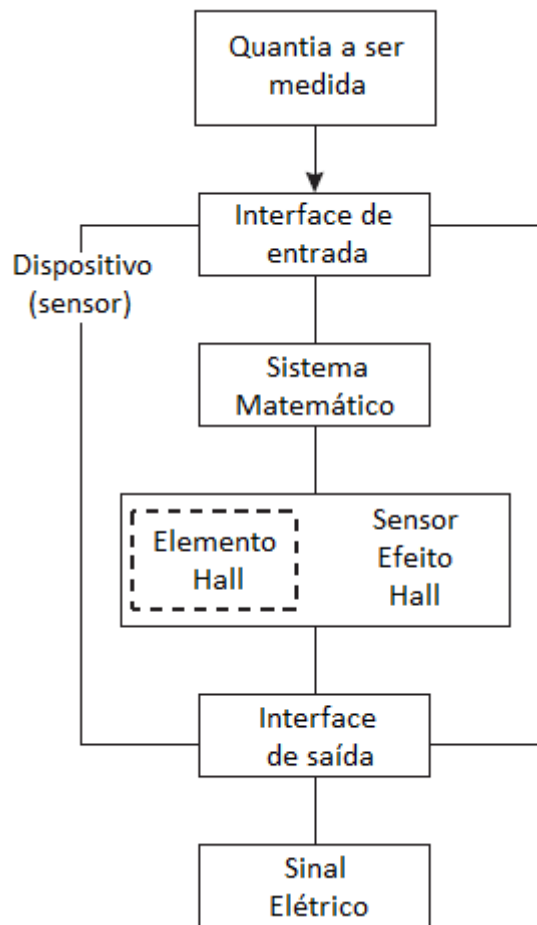


Figura 4 - Esquema generalizado de um sensor baseado no efeito Hall (modificada de [9]).

Os sensores baseados no efeito Hall possuem diversas características que os credenciam para usos refinados, sendo algumas delas [9]:

- *True solid state*;
- longa vida;
- alta velocidade de operação – mais de 100 kHz é possível;
- operação mesmo com entrada estacionária;
- ampla faixa de temperaturas (-40 até 90°C);
- operação altamente repetitiva.

2.3 Printed Circuit Board (PCB)

Existe divergência em relação à criação de PCBs, também conhecidas como placas de circuito impresso (PCIs) ou ainda como *printed wiring board (PWB)*. Muitas publicações creditam a invenção do circuito impresso a Paul Eisler (1907 – 1995), um engenheiro austríaco que, em 1936, patenteou um método para corrosão de uma camada de cobre depositada sobre

uma superfície isolante. Outra patente também registrada (essa em 1925), de Charles Ducas, cuja ideia era a utilização de uma tinta condutiva sobre um substrato isolante. Entretanto, a utilização desses chamados “circuitos impressos” só se deu por volta de 1943 em equipamentos de rádio para uso militar [10].

Havia, no Brasil, uma norma, a ABNT NBR 8183:1993, cujo objetivo era fornecer ao projetista e ao usuário de circuito impresso, informações sobre as matérias relativas e especificações, fabricação e utilização de placas impressas. No entanto essa norma foi cancelada sem substituição em 22/06/2011 [11].

2.3.1 Características físicas de PCI

Segundo [12], as PCIs podem ser divididas em duas classes. A primeira abrange PCIs com sinais analógicos, RF (radiofrequência) e micro-ondas, já a segunda contém circuitos baseados em sistemas digitais. A Tabela 2 traz uma comparação entre essas duas classes.

Tabela 2 - Algumas características de RF/Analógico *versus* PCIs com base digital (modificada de [12]).

Primeira Classe	Segunda Classe
Circuito de baixa complexidade	Circuito de alta complexidade
Utilização de uma ou duas camadas	Muitas camadas

Como na placa de aquisição de dados não será utilizada a segunda classe, o foco, a partir de agora, será direcionado apenas à primeira.

A baixa complexibilidade (descrita na Tabela 2) deve-se ao fato da maioria dos componentes usados possuírem duas, três ou quatro conexões (como ocorre com resistores, capacitores, indutores, transformadores, transistores, entre outros).

Devido à baixa complexibilidade, muitas vezes uma ou duas camadas são necessárias no desenvolvimento de PCIs da primeira classe.

Ainda no que diz respeito da parte física de PCIs, uma consideração plausível a se fazer diz respeito à fixação dos componentes na placa. Existem dois tipos principais de componentes eletrônicos, aqueles que possuem terminais que atravessam a placa (PTH – *Plated Through-Hole*, ou, inserido através do furo) e os soldados na superfície da placa (SMD – *Surface Mount Device*, ou, de montagem na superfície). Existem ainda outros tipos de encapsulamento de componentes como os *Fine Pitch* (uma subclasse de SMD), os *Press Fit* (forma especial de PTH), os TAB (*Tape-automated bonding*), os *Flip Chip*, os BGA (*Ball grid array*, usado em CIs

com muitos pinos, como por exemplo processadores) e os *Wire-Bonded Bare Die*, mais informações em [12].

Não existe um padrão para o material utilizado na fabricação de PCIs podendo ser o fenolite, fibra de vidro (FV), teflon (politetrafluoroetino – PTFE), poliéster (permite circuitos impressos flexíveis), entre outros. O nome fenolite era inicialmente uma marca comercial de chapas isolantes e trata-se de uma mistura de uma resina fenólica com certa quantidade de papel picado ou serragem de madeira.

A fibra de vidro surgiu como solução ao problema relacionado à característica higroscópica (capaz de absorver certa quantidade de água em ambientes úmidos) do fenolite, e as chamadas FV possuem na verdade apenas uma fina manta de tecido de fibras de vidro, sendo composta com resina epóxi. Sendo o material condutor em todas elas o cobre [10].

2.3.2 Placa de face simples

Placas de face simples são em geral utilizadas em instrumentação analógica e sistemas de controle. Recomenda-se utilizar placas de faces simples para circuitos operando abaixo de poucos kHz [13].

Para melhor organização além de minimizar os efeitos de EMI (*electromagnetic interference*), recomenda-se que cada componente seja posicionado na placa em grupos divididos de acordo com as funções de cada componente. Em [14] recomenda-se separar os grupos da forma que se vê na Figura 5.

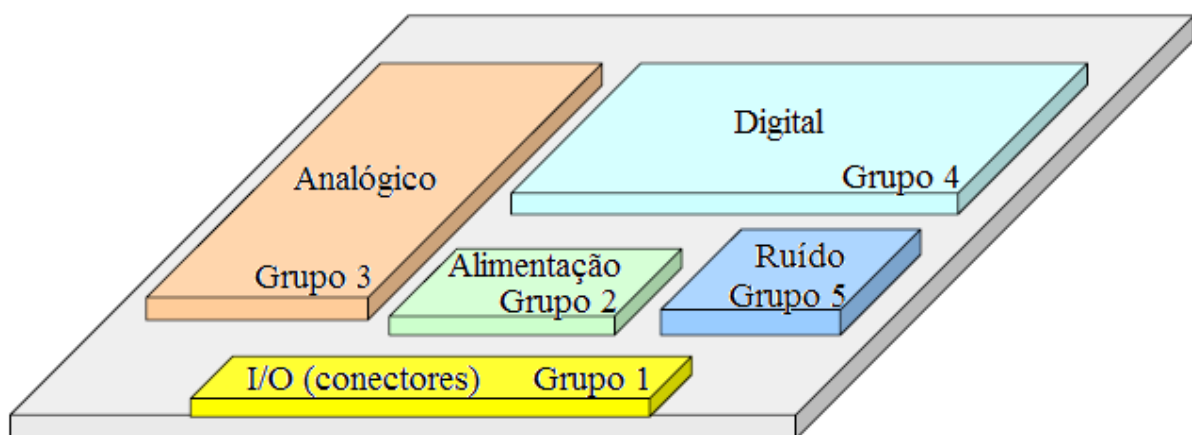


Figura 5 - Disposição dos grupos funcionais em uma PCI (modificada de [14]).

Uma sequência de exigências que deve ser seguida ao se projetar uma PCI de face simples é a que se segue [13]:

- Identificar todas as fontes de energia e terra, juntamente com redes de sinais críticos.
- Posicionar o esboço de acordo com subseções como descrito na Figura 5.
- Posicionar todos os componentes com redes de sinais críticos próximos uns aos outros.
- Se forem necessários diferentes pontos de terra (*ground* – GND), determinar se eles devem ser interconectados, e caso sim, onde.
- Termine o roteamento da placa, lembrando-se da necessidade de cancelamento de fluxo para trilhas ricas em espectro de energia RF (radiofrequência).

2.3.3 Roteamento das trilhas

Inicialmente, deve-se atentar ao dimensionamento das trilhas em função da corrente que fluirá por elas. Sabe-se que o acréscimo de temperatura gerado na trilha geralmente relaciona-se à capacidade de condução de corrente, tal aumento de temperatura depende [12]:

- Do nível da corrente;
- da espessura do cobre na placa dada em oz (onça);
- da seção transversal do traçado;
- da distância da trilha aos planos de cobre;
- do material da placa;
- do ambiente (ar parado, ar forçado, vácuo, etc);
- do *skin effect* para altas velocidades.

Um método utilizado na definição da largura das trilhas é através de gráficos criados pela IPC (*Association Connecting Electronics Industries*) e seu gráfico pode ser visualizado na Figura 6 [15]. Define-se inicialmente a corrente que fluirá pela trilha e através do primeiro gráfico da Figura 6 define-se a seção transversal necessária, em posse desse dado busca-se no segundo gráfico qual é a espessura mínima necessária para a trilha.

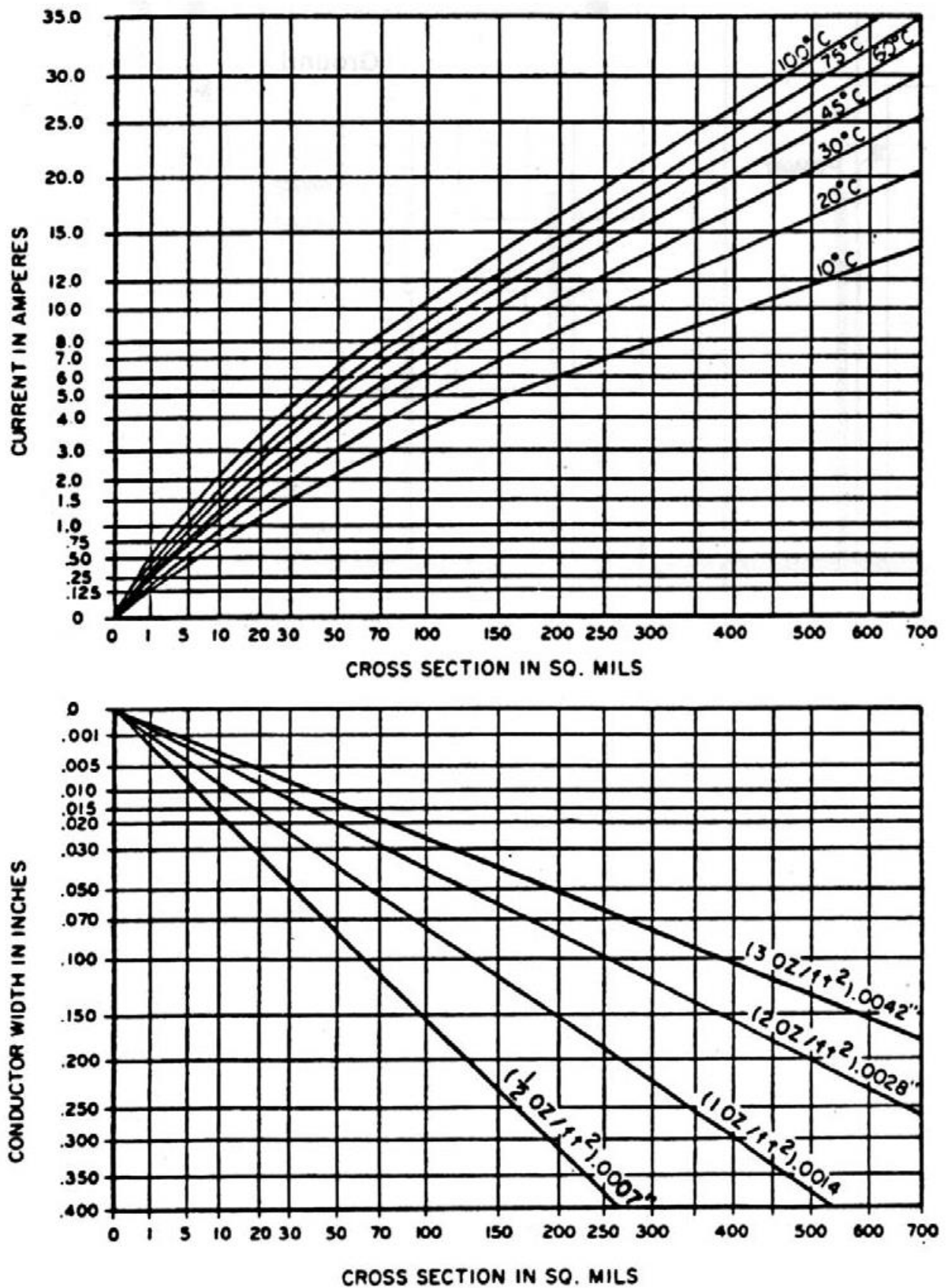


Figura 6 - Gráficos para determinação da capacidade de condução de corrente e dimensionamento de condutores externos em cobre para vários aumentos de temperatura acima da ambiente (retirada de [15]).

Já os espaçamentos entre os condutores elétricos em uma PCI são especificados em categorias e em função da tensão entre os condutores (DC ou tensão de pico para o caso AC), fato esse que pode ser visto na Tabela 3, lembrando que 1 Mil equivale a 0,001 polegadas (ou 0.001 *inches*).

Tabela 3 - Espaçamento entre condutores (modificada de [15]).

Tensão entre condutores (CC ou picos em CA)	B1	B2	B3	B4
0-15	0,05 mm [1,97 mils]	0,1 mm [3,9 mils]	0,1 mm [3,9 mils]	0,05 mm [1,97 mils]
16-30	0,05 mm [1,97 mils]	0,1 mm [3,9 mils]	0,1 mm [3,9 mils]	0,05 mm [1,97 mils]
31-50	0,1 mm [3,9 mils]	0,6 mm [24,0 mils]	0,6 mm [24,0 mils]	0,13 mm [5,12 mils]
51-100	0,1 mm [3,9 mils]	0,6 mm [24,0 mils]	1,5 mm [59,1 mils]	0,13 mm [5,12 mils]
101-150	0,2 mm [7,9 mils]	0,6 mm [24,0 mils]	3,2 mm [126,0 mils]	0,4 mm [16,0 mils]
151-170	0,2 mm [7,9 mils]	1,25 mm [49,2 mils]	3,2 mm [126,0 mils]	0,4 mm [16,0 mils]
171-250	0,2 mm [7,9 mils]	1,25 mm [49,2 mils]	6,4 mm [252,0 mils]	0,4 mm [16,0 mils]
251-300	0,2 mm [7,9 mils]	1,25 mm [49,2 mils]	12,5 mm [492,1 mils]	0,4 mm [16,0 mils]
301-500	0,25 mm [9,84 mils]	2,5 mm [98,4 mils]	12,5 mm [492,1 mils]	0,8 mm [31,0 mils]

B1 – Condutores internos

B2 – Condutores externos, não revestidos, do nível do mar até 3050 m [10007 pés]

B3 – Condutores externos, não revestidos, acima de 3050 m [10007 pés]

B4 – Condutores externos, com revestimento de polímero permanente (qualquer elevação)

Essas distâncias apresentadas na Tabela 3 devem ser respeitadas afim de se evitar o efeito de indutância mútua entre trilhas próximas umas das outras.

No que se refere às trilhas, ainda deve-se atentar para algumas outras características importantes, as mais importantes são aqui listadas [16]:

- É importante que as conexões sejam as mais curtas possíveis (exemplo na Figura 7).

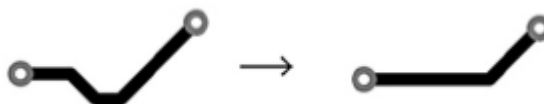


Figura 7 - Exemplo de trilha com conexão mais curta (retirada de [16]).

- Uso de polígonos sempre que possível afim de se evitar ângulos diferentes de 45° (exemplo na Figura 8).

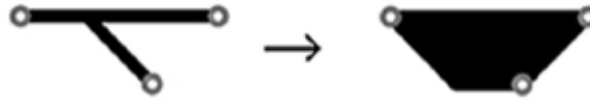


Figura 8 - Exemplo de emprego de polígonos no roteamento (retirada de [16]).

- Empregar trilhas de maior espessura sempre que possível.
- Nos planos de alimentação usar a maior área de cobre possível.
- No desenho das trilhas, evitar mudança de direção com ângulos diferentes de 45°.
- As trilhas de terra e alimentação devem ser as mais largas possíveis e ainda devem estar próximas, evitando laços de corrente.
- Evitar trilhas de potência ao longo da extensão da placa. Se houver entrada de tensão alternada e saída de baixa amplitude, uma deve estar de um lado da placa e outra, do outro.

Tais práticas apresentadas acima, devem ser respeitadas para que haja minimização de interferências bem como de indutância mútua e própria.

2.3.4 Plano Terra (*ground* – GND)

Antes de falar sobre plano terra, deve-se entender um conceito bastante importante, sendo ele o EMC (*Electromagnetic Compability*). Tal conceito engloba o controle e redução de campo eletromagnético (EMF), interferência eletromagnética (EMI), interferência de radiofrequência (RFI) e cobre todo espectro de frequência de corrente contínua até 20 GHz [12].

Um sistema de terra de baixa indutância é o elemento mais importante no *design* de uma PCI para EMC, visto que uma baixa indutância é fundamental para minimizar problemas de EMC. De acordo com [14], existem três tipos de estrutura para o *ground* em PCI, sendo elas:

- Mínimo (*Minimal*).
- Malha de Terra (*Ground Grid*).
- Plano de Terra (*Ground Plane*).

O mínimo deve ser evitado, pois trata-se da estrutura menos aconselhável no que diz respeito a EMC. Já a malha de terra é usada geralmente em PCI com mais de uma camada, um

esquema muito utilizado de *ground grid* é mostrado na Figura 9, onde as *vias* mostradas são os “caminhos” que ligam duas ou mais camadas de uma PCI.

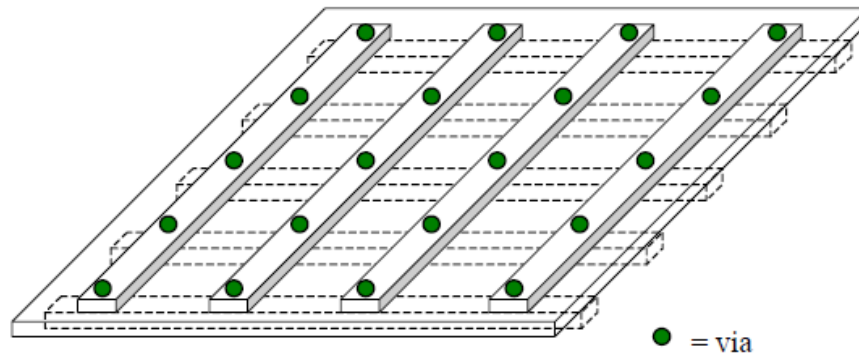


Figura 9 - Exemplo de ground grid (retirada de [14]).

O plano de terra é considerado o sistema ideal, isso deve-se ao fato de ele possuir a menor indutância dentre os três modelos aqui descritos conforme ilustrado na Figura 10.

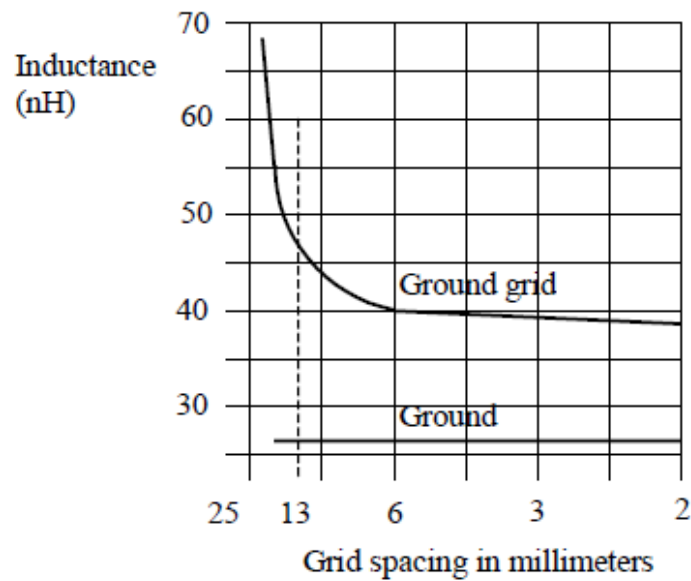


Figura 10 - Indutância dos sistemas de terra (retirada de [14]).

Pode-se observar na Figura 10 que a malha de terra se torna eficiente desde que o espaçamento entre suas trilhas seja menor que 13 mm, mas que mesmo assim, seu valor de indutância é maior que o do sistema de plano terra.

2.4 Capacitores de desacoplamento e de bulk

Os dois tipos devem ser posicionados o mais próximo possível do seu respectivo componente.

2.4.1 Capacitores de desacoplamento

São utilizados na amenização (ou redução) de correntes de pico propagadas através da placa além de fornecerem uma fonte de energia em corrente contínua para os dispositivos e componentes. Ajudam também na remoção de radiofrequências. São utilizados, geralmente, capacitores cerâmicos [13].

2.4.2 Capacitores de bulk

Ajudam a manter os níveis de tensão e corrente contínua para os componentes, ou seja, são posicionados o mais próximo possível da fonte de alimentação em corrente contínua. Além disso, ajudam a impedir a queda de energia devido a surtos di/dt que podem ser gerados nos componentes. Nesse caso capacitores eletrolíticos são os mais utilizados [13].

2.5 Regulador de tensão

Os sensores utilizados na transdução da corrente e tensão necessitam de uma alimentação de $\pm 15 V_{cc}$. Para isso, optou-se pelo uso do módulo de potência da *Traco Power*®, mais precisamente o modelo TMP 15215 (que é um modelo com terra comum às duas saídas). Algumas especificações retiradas do *datasheet* [17] do componente são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Algumas especificações do TMP 15215 (retirada de [17]).

Potência de Saída	15 W
Saída 1 (V_{out1})	+15 VCC / 500 mA
Saída 2 (V_{out2})	-15 VCC / 500 mA
Tensão nominal de entrada	100 – 240 VCA
Frequência nominal de entrada	50 / 60 Hz

Na Tabela 4, VCC quer dizer tensão em corrente contínua, bem como VCA quer dizer tensão em corrente alternada. O esboço presente no *datasheet* [17] do componente pode ser observado na Figura 11 onde as dimensões entre parênteses possuem como unidade a polegada e as fora de parênteses em milímetros.

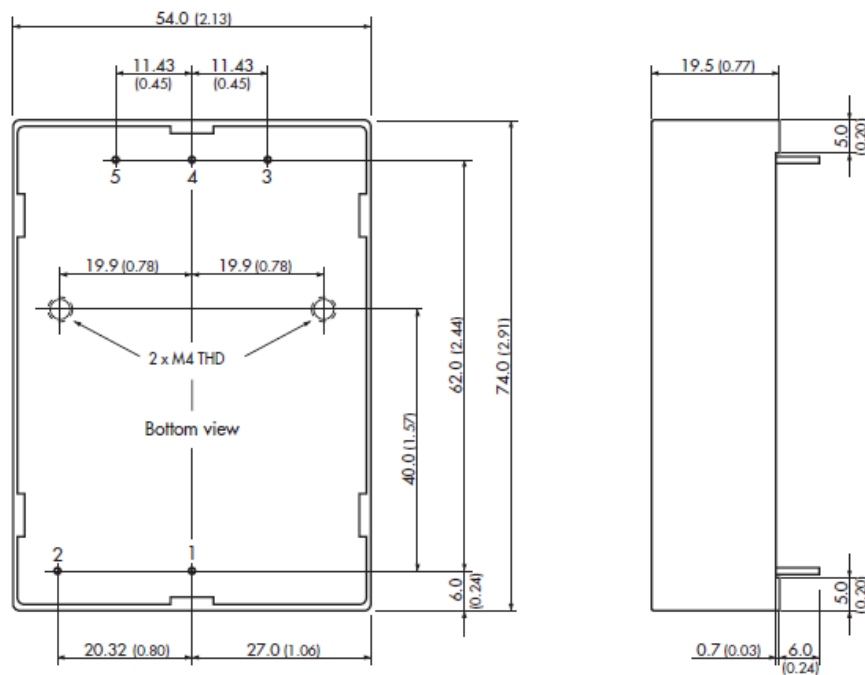


Figura 11 - Esboço com dimensões das vistas inferior e lateral do TMP 15215 (modificada de [17]).

Os pinos numerados vistos na Figura 11 são os pinos existentes no módulo, sendo o 1 e 2 referente à entrada em corrente alternada, o 3 a saída de tensão 2, o 5 a saída de tensão 1 e o 4 o terra comum às duas saídas.

2.6 Sensores utilizados

Para a medição da corrente e tensão trifásicas, optou-se pelo uso do transdutor de corrente LA 55-P (Figura 12) e do transdutor de tensão LV 25-P (Figura 13) ambos são fabricados pela empresa LEM® e são transdutores que fazem uso do efeito Hall em malha fechada (compensada). Os sensores com malha fechada têm saída amplificada quando comparadas aos de malha aberta [9].

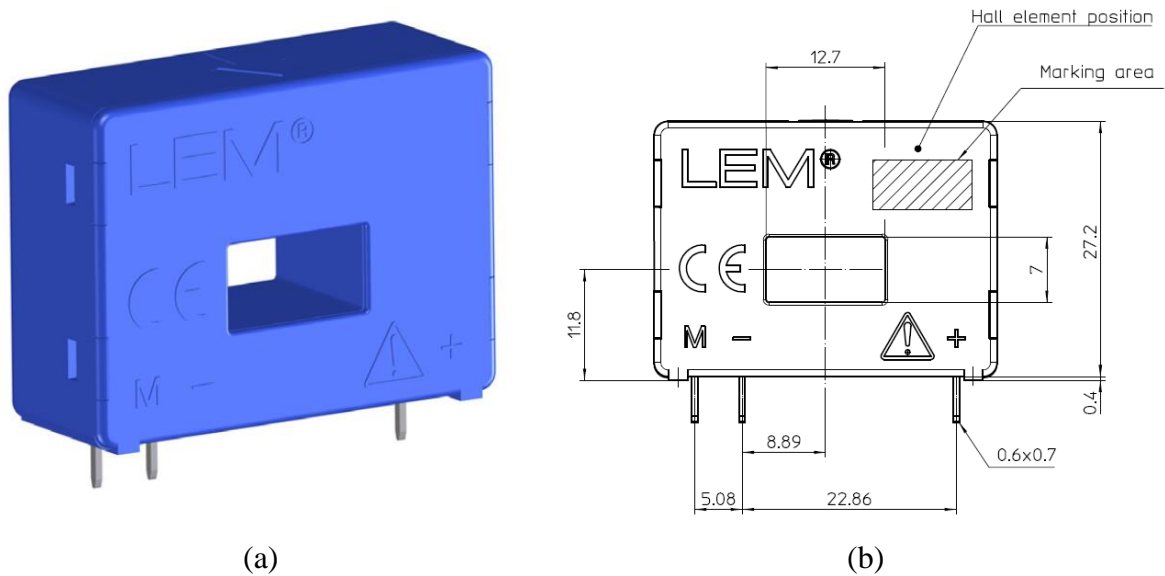


Figura 12 - Transdutor de corrente LEM LA 55-P (retiradas de [6]).

Sensores em malha fechada são também conhecidos, do inglês, de *null balance sensors*. Esse tipo de sensoriamento possui várias características desejáveis, como por exemplo: o sistema de *feedback* responde muito rápido e possuem ótima precisão. Pode-se considerar como lados negativos desses sensores seus preços e tamanhos, visto que são em média bem mais caros e geralmente grandes quando comparados a outros.

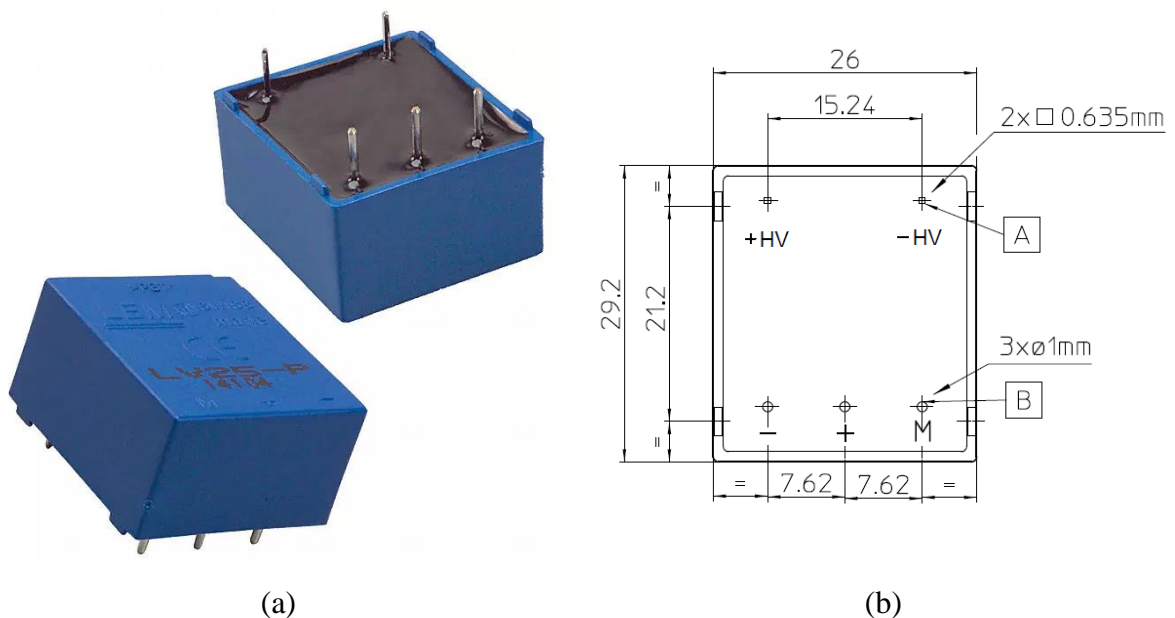


Figura 13 - Transdutor de tensão LEM LV 25-P. (Imagem (a) retirada de [18] e (b) retirada de [7]).

Um exemplo de construção de um sensor de corrente de efeito Hall em malha fechada é mostrado através da Figura 14. Onde I_p é a corrente primária a ser medida, I_s é a corrente secundária (saída do sensor), N_s é o número de voltas na bobina, R_m é a resistência usada na saída para obter-se a tensão V_m que é a tensão de saída (ou de medição) [9].

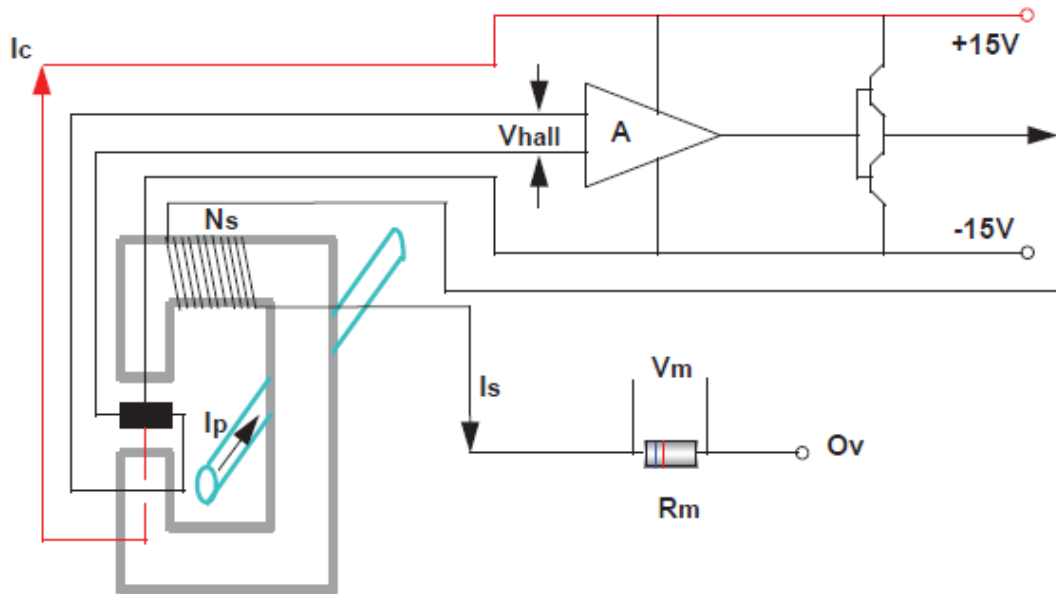


Figura 14 - Exemplo da construção de um sensor de corrente de efeito Hall em malha fechada (modificado de [9]).

Sabe-se que esse tipo de sensor possui ótima linearidade, portanto, define-se a Equação (5) [9].

$$I_p N_p = I_s N_s \quad (5)$$

Onde:

I_p → corrente primária no sensor;

N_p → número de voltas dados pelo cabo que conduz a corrente no sensor;

I_s → corrente secundária no sensor;

N_s → número de voltas no sensor (dado construtivo do sensor).

2.7 Geração de offset

Para a leitura dos dados em um computador, será utilizado o Arduino Mega, em função de ser possível através dele se realizar a conversão de sinal analógico para digital. Sabe-se que seu conversor analógico digital dessa placa admite entradas analógicas com valores de tensão entre 0 e 5 V.

Visto que as saídas da placa de medição foram calculadas para terem saída de tensão de -2,5 a 2,5 V, tornou-se necessária a adição de uma tensão de *offset* de -2,5 V para ser adicionada à referência do Arduino.

Optou-se então pelo uso do circuito multiplicador de ganho constante mostrado na Figura 15. O amplificador operacional utilizado nesse caso é o LM741 cujo *datasheet* pode ser encontrado em [19].

O ganho do circuito mostrado na Figura 15 é mostrado na Equação (6) [20].

$$A = -\frac{R_f}{R_1} \quad (6)$$

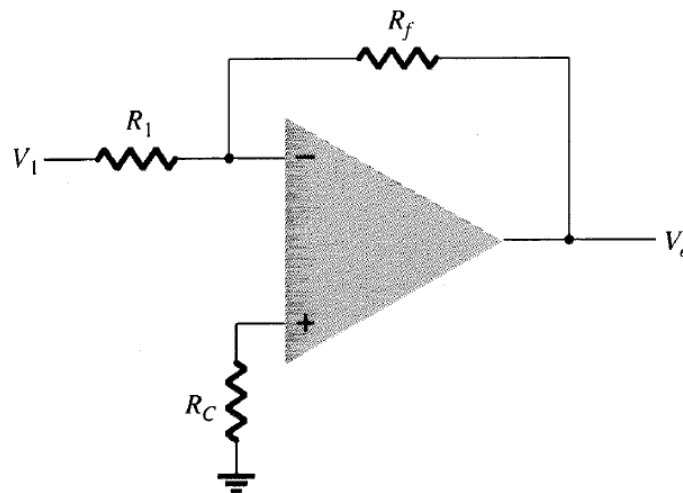


Figura 15 - Multiplicador de ganho constante com amplificador inversor (retirada de [20]).

Com uma tensão de entrada V_i igual a $15 V_{cc}$, deseja-se que a tensão de saída V_o seja de $-2,5 V_{cc}$, para isso torna-se necessário um ganho de $-1/6$. Logo, faz-se necessário a utilização de um resistor R_f seis vezes menor que R_1 .

2.8 Proteus

Para o desenvolvimento tanto do esquemático quanto do esboço da PCB fez-se uso do *software Proteus 8 Professional*. Existem nesse programa existem quatro módulos que trabalham conjuntamente, sendo eles: ISIS, VSM, PRO-SPICE e ARES. É de interesse nesse trabalho apenas dois desses módulos, que são o ISIS (*Intelligent Schematic input System – Sistema de entrada de esquemático inteligente*) e o ARES (*Advanced Routing and Editing Software – Software de edição e roteamento avançado*).

Em função dessas discussões apresentadas até o momento, iniciou-se o desenvolvimento da PCB levando-se em conta os requisitos mínimos e necessários ao projeto.

3 Desenvolvimento da PCB

Nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da placa de circuito impresso.

3.1 Esquemático

O esquemático montado no Proteus e utilizado na criação da placa é apresentado na Figura 16.

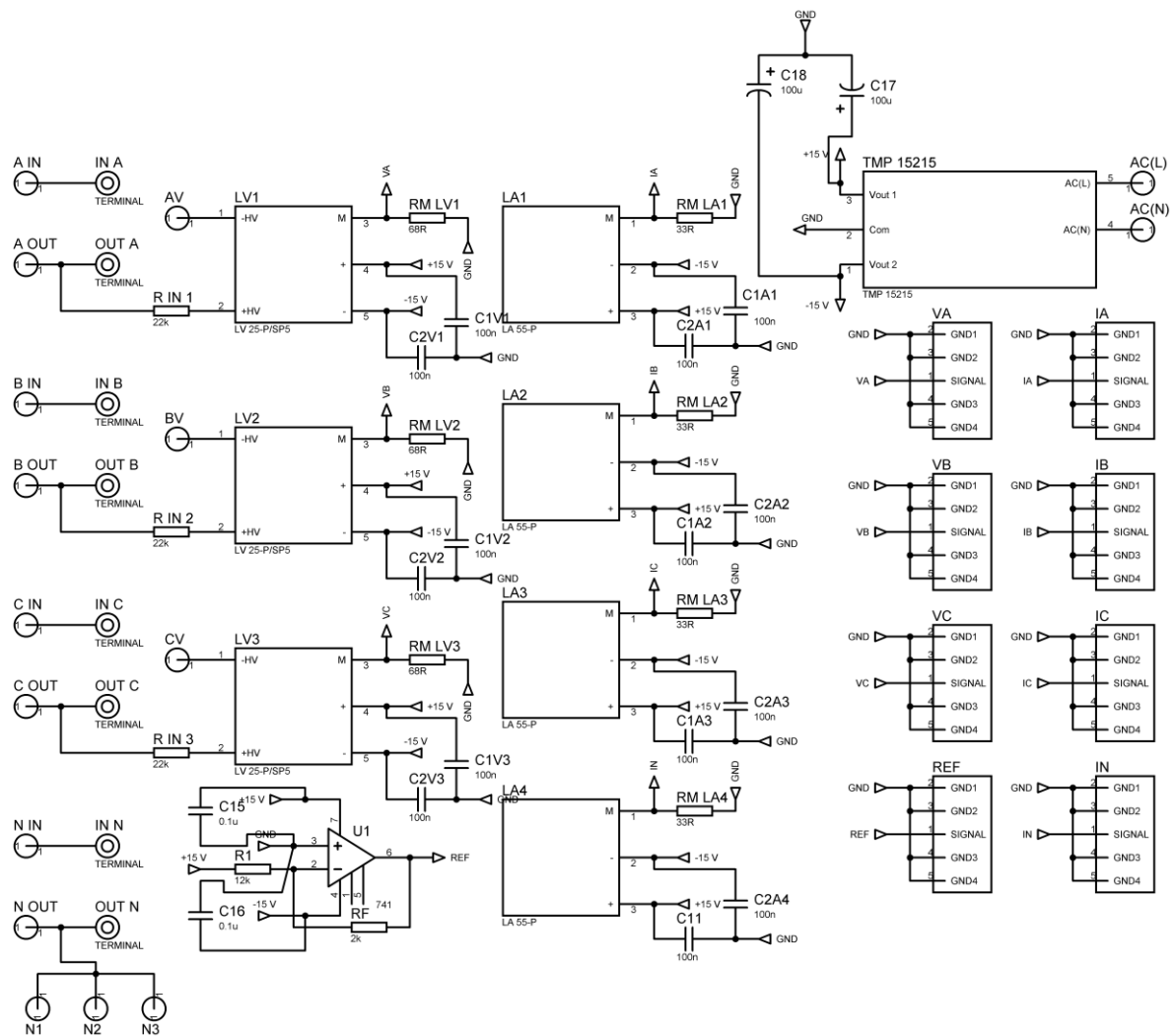


Figura 16 - Esquemático criado na plataforma ISIS do Proteus.

3.2 Dimensionamento da fonte de alimentação

O dimensionamento da fonte de alimentação foi feito respeitando-se a Equação (7).

$$C_{total} = N_C \cdot C_{LA} + N_T \cdot C_{LV} + C_{741} \quad (7)$$

Onde:

C_{total} → consumo total de corrente (A);

N_C → número de sensores de corrente (LA 55-P);

C_{LA} → consumo por sensor de corrente (A);

N_T → número de sensores de tensão (LV 25-P);

C_{LV} → consumo por sensor de tensão (A);

C_{741} → consumo do amplificador operacional 741 (A).

É possível encontrar nos *datasheets* dos sensores, que a corrente consumida por cada um dos sensores (tanto de tensão quanto de corrente) é vista através da Equação (8) onde I_s é a corrente no secundário do sensor [7] [6].

$$I_c = 10 + I_s \quad (8)$$

Para o LA 55-P, a corrente nominal no secundário é de 50 mA, já para o LV 25-P, 25 mA. Considerando-se esses valores nominais para o cálculo do consumo total a uma alimentação de 15 V_{cc}, além de se saber que serão utilizados quatro transdutores de corrente e três de tensão, chega-se a um consumo total de corrente nos sensores de 345 mA. Sendo o consumo por LA de 60 mA e por LV de 35 mA. No caso do amplificador operacional 741, a máxima corrente de alimentação é 2,8 mA como pode ser conferido no *datasheet* do componente [19]. Portanto, o consumo total de corrente (para condições nominais dos sensores e máxima do amplificador) será de 347,8 mA.

No *datasheet* [17] do módulo de potência (fonte) é possível encontrar que cada saída de tensão contínua (+15 V e -15 V) é capaz de entregar até 500 mA. Pode-se então concluir que a fonte de alimentação utilizada neste trabalho será suficiente na alimentação dos sensores.

3.3 Dimensionamento dos Sensores

Essa seção mostrará como foram feitas as escolhas e consequentes dimensionamentos de resistências (de medição e limitadora de corrente) dos sensores, bem como os níveis de medição para corrente e tensão.

3.3.1 Níveis máximos de medição para corrente e tensão

Inicialmente, deve-se definir os níveis máximos de medição para corrente e tensão os quais serão aceitos pelo sistema criado.

Em relação aos sensores de corrente, mesmo o sensor LA 55-P possuindo uma corrente primária em valor quadrático médio (ou valor eficaz ou ainda RMS, do inglês *root mean square*) de 50 amperes, optou-se por limitar a corrente de medição do sistema em 10 A, para que com esse nível de corrente seja possível alcançar a corrente nominal no secundário (50mA), cinco voltas foram feitas no sensor de corrente.

Já no caso do LV 25-P, consta em seu *datasheet* [7] que uma precisão ótima é obtida quando a corrente no primário é igual à nominal (10 mA). Essa corrente é limitada no primário através de um resistor de potência (R_1) adicionado à entrada de tensão denominada +HV do transdutor, esquema esse que pode ser visto através da Figura 17.

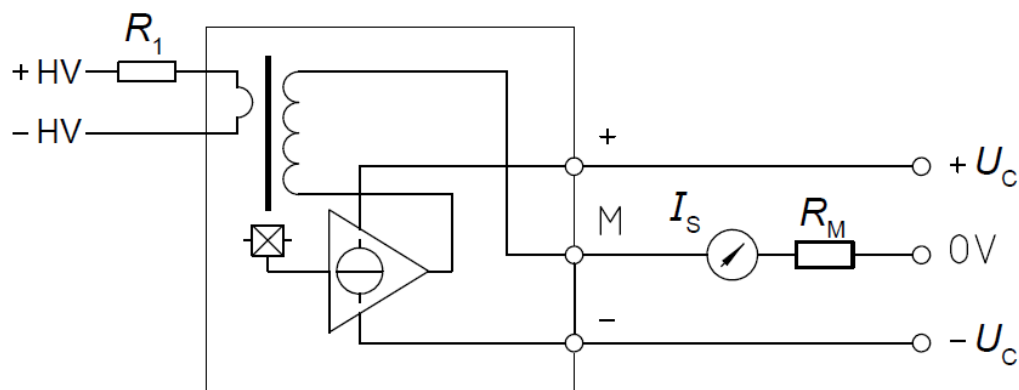


Figura 17 - Esquema da conexão a ser realizada no sensor LV 25-P (retirada de [7]).

Como serão utilizados resistores de valores fixos, optou-se por limitar a tensão de entrada em $220 V_{rms}$ e, portanto, o resistor R_1 deve ter valor de $22 k\Omega$, pois assim, para a tensão nominal (escolhida como nominal do sistema – 220 V), é possível obter a corrente primária nominal do sensor.

Então, de acordo com o descrito acima, pôde-se montar a Tabela 5 com os valores os quais serão considerados nominais na placa de medição, lembrando que se tratam de valores eficazes. Cabe ainda atentar para o fato que por meio de [7] e [6] pode-se obter as proporções de conversão dos dois sensores e as mesmas são apresentadas também na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores utilizados como nominais de corrente para ambos os transdutores e as constantes relacionadas às razões de conversão para cada um dos sensores.

LA 55-P	I_{PN} – Corrente primária nominal rms	10 A
	I_{SN} – Corrente secundária nominal rms (para 1 volta)	50 mA *
	K_N – Razão ou proporção de conversão	N_p :1000
LV 25-P	I_{PN} – Corrente primária nominal rms	10 mA
	V_{PN} – Tensão primária nominal rms	220 V
	I_{SN} – Corrente secundária nominal rms	25 mA
	K_N – Razão ou proporção de conversão	2500:1000

* Em função das 5 voltas realizadas pelo cabo condutor da corrente no sensor. Onde N_p é o número de voltas no sensor.

Ainda sobre o resistor R_1 mostrado na Figura 17, já mencionado seu valor de 22 k Ω , tomou-se cuidado ao escolher um resistor de 3 watts (W) para que não houvessem problemas com aquecimento devido à potência mal dimensionada. Tal dimensionamento de potência deu-se através da Equação (9).

$$P = VI = RI^2 = (22 \text{ k}\Omega) \left(\frac{220 \text{ V}}{22 \text{ k}\Omega} \right)^2 = 2,2 \text{ W} \quad (9)$$

Durante os testes de tensão, observou-se que os resistores estavam esquentando muito (já que não existe ventilação forçada) quando aplicada uma tensão de 127 V_{rms} (pouco mais da metade da escolhida como nominal), logo, para não se ter problemas durante os testes e no funcionamento, utilizou-se uma resistência de 33 k Ω (3 W), para esse caso, tem-se uma nova potência mínima mostrada na Equação (10).

$$P = VI = RI^2 = (33 \text{ k}\Omega) \left(\frac{220 \text{ V}}{33 \text{ k}\Omega} \right)^2 = 1,467 \text{ W} \quad (10)$$

Tal fato diminui pouco a precisão do sensor que é de $\pm 0,8 \%$ [7].

3.3.2 Resistores utilizados nas saídas dos sensores

Agora serão tratados os dimensionamentos dos resistores colocados nas saídas tanto dos sensores de corrente como no de tensão.

Na Figura 17 é possível notar que o sensor LV 25-P tem como saída uma corrente, o mesmo ocorre para o LA 55-P como pode ser visualizado por meio da Figura 18.

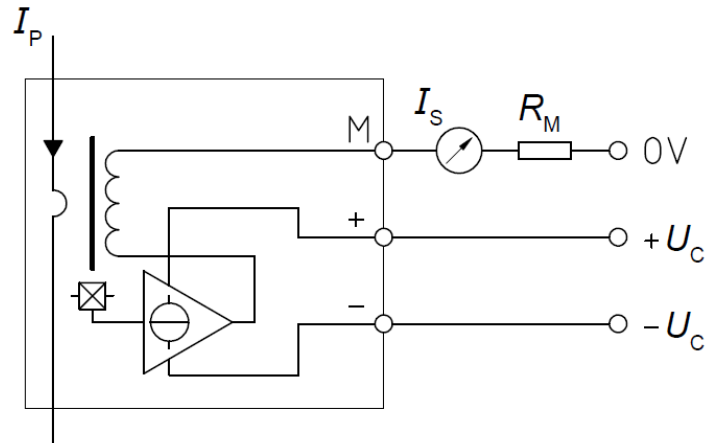


Figura 18 - Esquema da conexão a ser realizada no sensor LV 55-P (retirada de [6]).

Tanto na Figura 17 quanto na Figura 18, nota-se a presença de um resistor (R_M) conectado à saída de medição. Esses resistores devem ser dimensionados para que a máxima tensão de entrada do conversor analógico digital (neste trabalho um Arduino Mega) não seja excedida.

No caso do transdutor de corrente, a corrente nominal no secundário será de $50 \text{ mA}_{\text{rms}}$, deseja-se obter uma tensão de pico a pico de no máximo 5 volts. Para tanto, deve-se escolher o valor do resistor de saída do sensor de corrente respeitando-se a Equação (11).

$$R_{MLA} = \frac{V_{p-p}}{I_{s-p-p}} = \frac{5}{0,050 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}} = 35,35 \Omega \quad (11)$$

O resultado encontrado por meio da Equação (11) trata-se de um valor máximo para a resistência de medição no sensor de corrente. Analisando-se em termos de valores comerciais de resistência, o valor mais próximo abaixo do encontrado é de 33Ω .

Para o sensor de tensão utilizado, a corrente secundária nominal é de $25 \text{ mA}_{\text{rms}}$ e novamente deseja-se obter uma tensão máxima 5 V_{p-p} . A escolha do resistor de medição do sensor de tensão deve ser feita através da Equação (12).

$$R_{MLV} = \frac{V_{p-p}}{I_{s-p-p}} = \frac{5}{0,025 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}} = 70,71 \Omega \quad (12)$$

A Equação (12) também resulta em um valor máximo de resistência. O valor mais próximo e menor encontrado comercialmente é de 68Ω .

3.4 Dimensionamento do circuito de offset

Como descrito na seção 2.7 na geração do *offset* de $-2,5 V_{cc}$ fez-se opção pelo uso do amp-op LM741. Sabe-se que a saída do circuito é dada pela Equação (13) [20].

$$V_o = A.V_i \quad (13)$$

Onde o A é dado pela Equação (6). Para se obter o nível de tensão requerido, fez-se uso de um resistor de $2\text{ k}\Omega$ e outro de $12\text{ k}\Omega$, sendo o primeiro o R_f e o segundo R_1 . A ligação feita no *software* Proteus (esquemático) é apresentada na Figura 19 onde U1 trata-se do amplificador 741 e os dois capacitores são capacitores de desacoplamento.

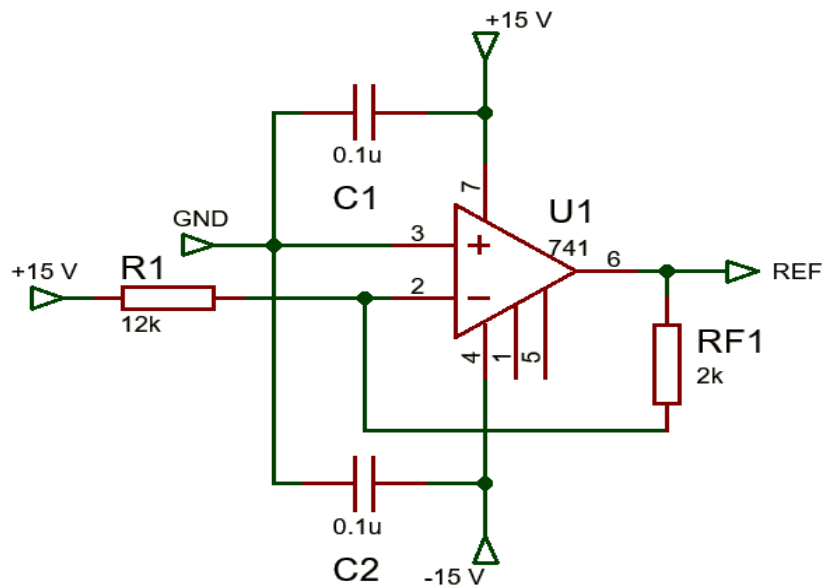


Figura 19 - Esquemático retirado do Proteus do circuito utilizado na geração do offset de $-2,5 V_{cc}$.

3.5 Dimensionamento dos capacitores

Em relação aos capacitores de desacoplamento, foram utilizados um par para cada sensor além de um par para o LM741, sendo eles cerâmicos. No caso dos de bulk são necessários dois capacitores eletrolíticos, visto que a fonte é simétrica em $15 V_{cc}$.

Na Figura 19 pode-se observar os capacitores de desacoplamento do LM 741, que de acordo com seu *datasheet* [19] têm valores recomendados de $0,1\ \mu\text{F}$.

Utiliza-se, geralmente, em PCIs capacitores com propósito bulk na faixa de $4,7 - 100\ \mu\text{F}$ [13]. Já no caso de capacitores de desacoplamento, é comum se utilizar $100\ \text{nF}$ [16].

3.6 Flexibilidade delta-Y

Sabe-se que existem as ligações trifásicas em Y (estrela) ou Δ (delta), para exemplificar essas ligações, pode-se observar na Figura 20 dois modelos de geradores trifásicos, um ligado em estrela e outro em delta.

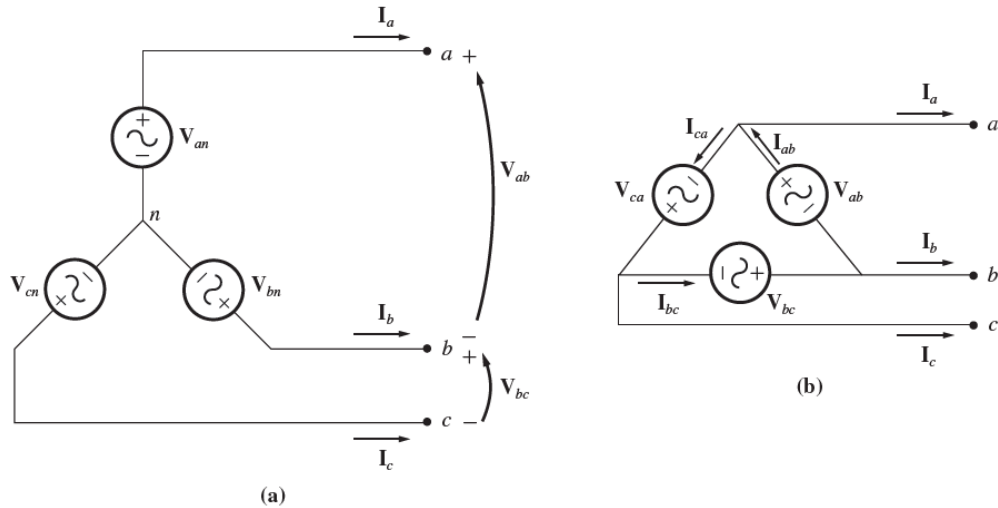


Figura 20 - Ligação de gerador em estrela (a) e em delta (b) (retirada de [21]).

Afim de ser possível realizar medições de tensão em sistemas ligados em delta e sistemas ligados em estrela, optou-se pela criação de um sistema que permite uma flexibilidade delta-Y através da ligação de cabos banana-banana à diferentes bornes a qual permite a medição da tensão de fase ou de linha.

A flexibilidade delta-Y pode ser vista por meio da Figura 21, onde os bornes identificados com as letras A, B e C estão conectados às entradas -HV (mostrada na Figura 17) e os identificados como N₁, N₂ e N₃ estão conectados à entrada do neutro. As entradas +HV estão conectadas aos resistores limitadores de corrente. Assim, caso se deseje realizar a medição de tensão em delta, basta-se conectar o borne A à fase B, o B à fase C e o C à fase A. Já para uma medição em estrela, basta-se conectar o borne A ao N₁, o B ao N₂ e o C ao N₃ (onde N₁, N₂ e N₃ estão conectados via trilha ao neutro).

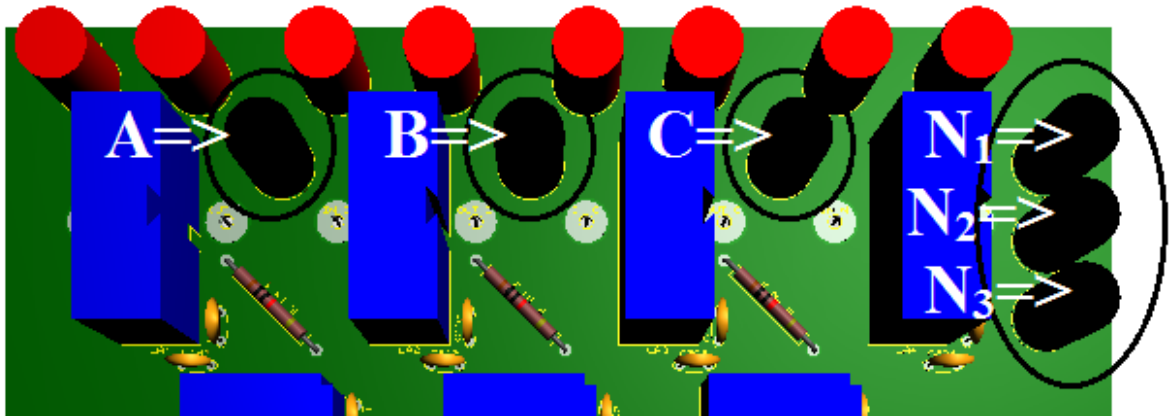


Figura 21 - Bornes de ligação para realização da flexibilidade delta-Y da placa no *software* Proteus.

Para visualizar as trilhas utilizadas nessa parte da placa deve-se observar a Figura 22, onde as setas verticais indicam os bornes e a horizontal a perna -HV do sensor de tensão.

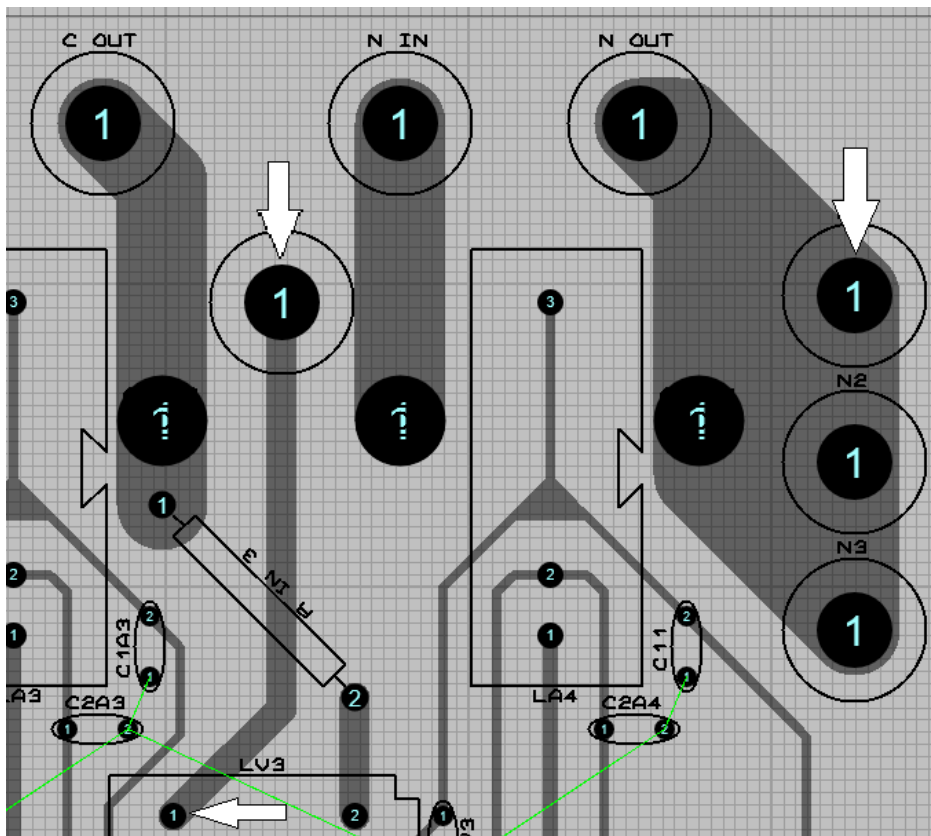


Figura 22 - Visualização das trilhas de parte da placa no *software* Proteus para análise da flexibilidade delta-Y.

3.7 Placa e trilhas

Nessa seção serão mostradas as escolhas feitas no planejamento da PCI bem como a elaboração da mesma.

3.7.1 Placa para montagem da PCI

A primeira escolha foi feita em relação ao material da placa, onde optou-se pelo uso da placa de fenolite cobreada de face simples.

Em função da elaboração da placa no *software* proteus, pode-se observar que uma placa com tamanho 200x200 mm seria suficiente para a montagem da mesma. O *layout* da PCI criado no Proteus é mostrado na Figura 23.

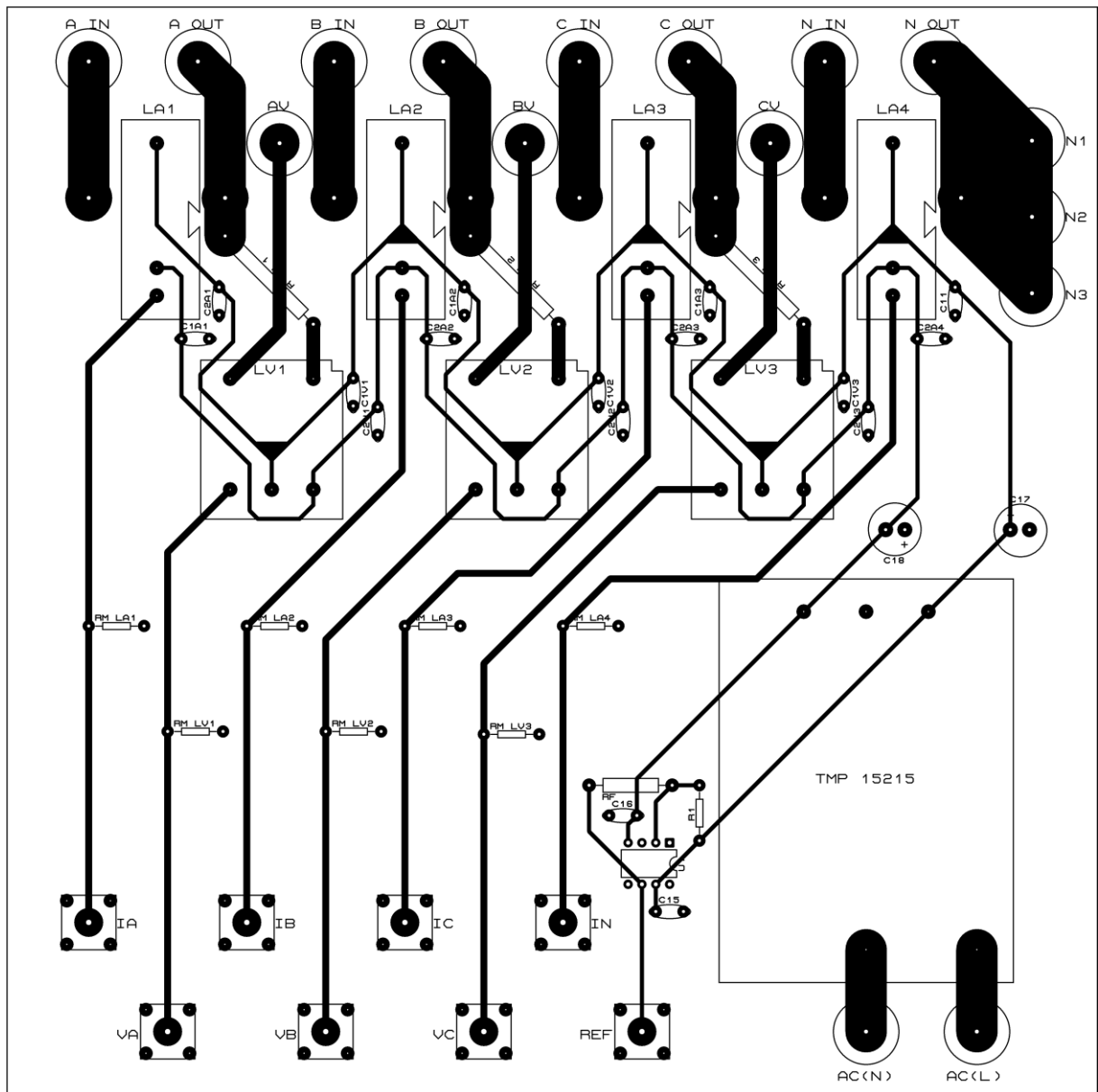


Figura 23 - Layout da PCB (visualização superior apresentando as trilhas) criada no Proteus. Ocultou-se o plano terra (existente na placa) propositalmente para uma melhor visualização dos componentes.

Para entrada de potência da placa, optou-se pelo uso de bornes fêmeas para pinos do tipo banana, já na saída de sinal fez-se uso de conectores fêmeas coaxiais. A passagem da

corrente pelos sensores LA 55-P não são mostradas na Figura 23 visto que tal passagem é feita através de cabos condutores por meio da “janela” do sensor como exemplificado na Figura 24, onde I_E é a corrente a ser medida e I_H é a corrente de medição, e os pontos na placa onde esses cabos são conectados são os dois furos mais próximos aos sensores.

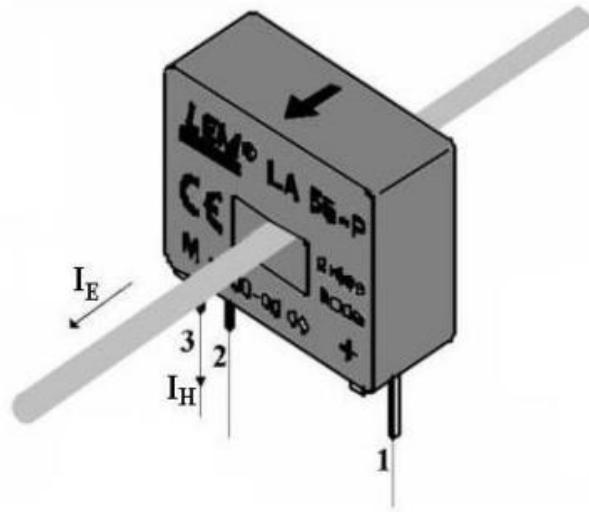


Figura 24 - Cabo condutor da corrente a ser medida atravessando o sensor LA 55-P (retirada de [22]).

Pode-se notar ainda através da Figura 23 que existe divisão dos grupos funcionais na elaboração da PCI de forma semelhante à mostrada na Figura 5.

3.7.2 Roteamento das trilhas

Para o roteamento das trilhas, seguiu-se as ideias mostradas no capítulo Conceitos Básicos.

A preocupação inicial foi em relação à espessura das trilhas em função da corrente que cada uma poderá conduzir. Para a entrada de potência, onde limitou-se a corrente nominal a 10 A utilizou-se 300 mils (milésimo de polegada ou th), isso pode-se comprovar por meio da Figura 6, onde a placa utilizada possui 1 oz/ft². Essa espessura pode ser vista na Figura 23 na parte superior. Essa mesma espessura foi utilizada na alimentação do módulo de potência TMP 15215.

Nas trilhas de alimentação dos sensores e do amplificador operacional utilizou-se uma espessura de 30 mils visto que a máxima corrente que o TMP 15215 (responsável pela alimentação desses circuitos) entrega em cada saída de tensão é de 0,5 A. Novamente através da Figura 6 nota-se que o mínimo necessário (para o pior caso de temperatura) seria de 10 mils, logo, 30 mils são mais que suficientes. A Figura 25 traz uma parte da placa onde é possível se ver a largura utilizada nas trilhas de $\pm 15 V_{CC}$.

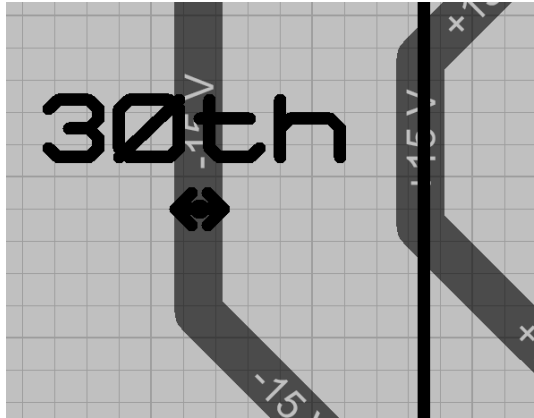


Figura 25 - Largura de 30 mils utilizada nas trilhas de alimentação CC dos sensores e do amplificador.

Nas trilhas de entrada dos sensores de tensão, utilizou-se 100 mils nas trilhas como pode ser visto na Figura 26.

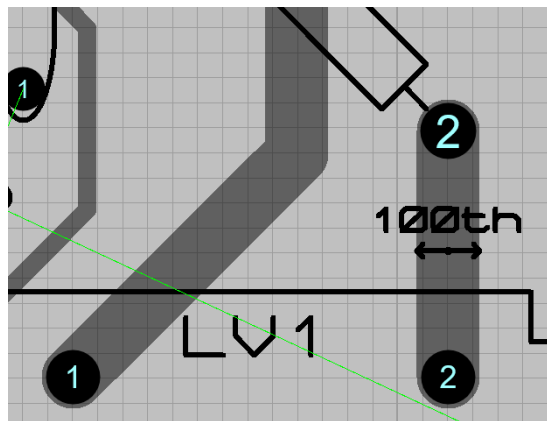


Figura 26 - Largura de 100 mils utilizada nas trilhas de entrada dos sensores de tensão.

Para a excursão do sinal medido até os conectores coaxiais utilizou-se uma largura de 50 mils, fato esse mostrado na Figura 27.

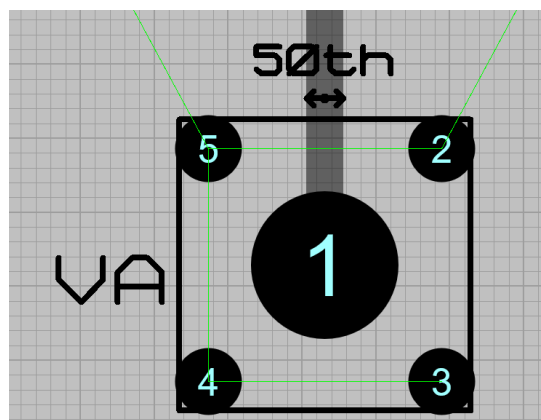


Figura 27 - Largura de 50 mils utilizada nas trilhas de saída do sinal medido até os conectores coaxiais.

Assim como no caso da largura de 30 mils as apresentadas nas Figura 26 e Figura 27 estão superdimensionadas.

Realizadas as devidas precauções em relação às larguras das trilhas, partiu-se para a distância entre as trilhas levando-se em conta os dados presentes na Tabela 3. As trilhas mais próximas são aqui mostradas para demonstrar a observância da norma.

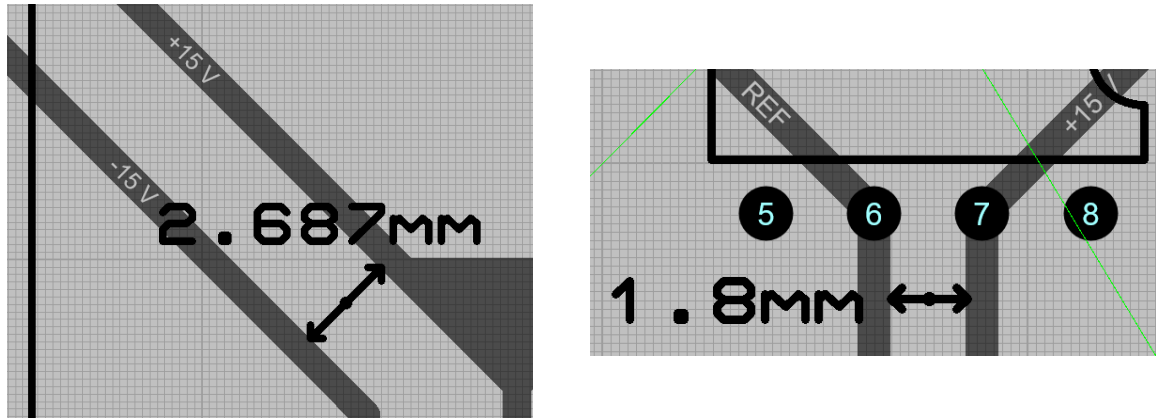


Figura 28 - Duas distâncias entre trilhas para análise de proximidade relacionada à tensão.

Como pode ser observado por meio da Figura 28, as distâncias mínimas são respeitadas. No primeiro caso tem-se uma diferença de potencial entre as trilhas condutoras de $30 V_{CC}$, sendo a distância mínima, para o pior caso (B4), de 0,13 mm. Já para o segundo caso, a tensão de referência trata-se de $-2,5 V_{CC}$, logo a diferença de potencial entre as duas trilhas é de $17,5 V_{CC}$ a qual demanda uma distância mínima de 0,1 mm.

As demais trilhas estão em conformidade com a norma e assim como as descritas acima, com distâncias superiores às mínimas necessárias.

3.8 Testes de tensão e corrente

Nesta seção serão mostrados os dados referentes aos testes nos sensores de corrente e tensão, bem como no circuito que gera o *offset* necessário ao conversor analógico digital.

3.8.1 Sensores de tensão

Os testes nos sensores de tensão foram realizados através da ligação diretamente à rede elétrica de $127 V_{rms}$, o resistor utilizado na entrada do sensor foi de $33 k\Omega$ (3W) e o resistor de medição de 100Ω . Portanto, obteve-se uma corrente primária de $3,85 mA_{rms}$, utilizando-se a razão de conversão mostrada na Tabela 5 tem-se uma corrente secundária de $9,625 mA_{rms}$, logo a tensão de pico a pico na saída deveria ser algo em torno de $2,72 V_{p-p}$, o resultado obtido através de um osciloscópio digital é mostrado na Figura 29.

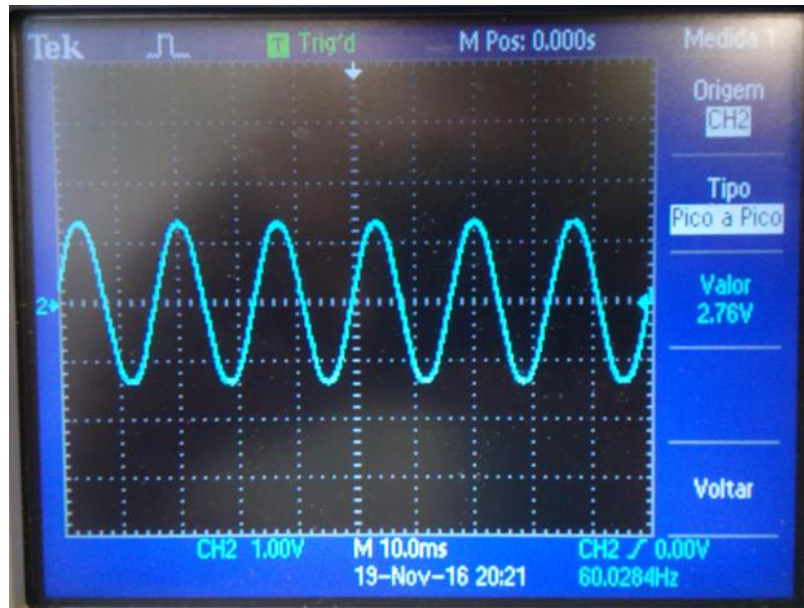


Figura 29 - Forma de onda e tensão de pico a pico para teste realizado nos sensores de tensão.

O valor mostrado na tela do osciloscópio é coerente ao esperado pela teoria, e esse mesmo resultado foi obtido para os testes nos três sensores utilizados.

3.8.2 Sensores de corrente

Para o teste nos sensores de corrente utilizou-se como carga uma lâmpada incandescente de 60 W conectada à rede 127 V_{rms} e com cinco voltas dadas na “janela” do LA 55-P. O resistor utilizado na medição foi de 25 Ω.

A corrente primária nesse caso (considerando-se a lâmpada como carga puramente resistiva) foi de 472 mA_{rms}, porém, em função das cinco voltas, essa corrente torna-se 2,36 A_{rms}, com a relação de conversão (dada na Tabela 5) espera-se uma corrente no secundário de 2,36 mA_{rms}. A tensão de saída em função do resistor de 25 Ω deve ser de 59 mV_{rms}. Em função do baixo valor medido, não foi possível uma boa leitura com o osciloscópio, entretanto, ao utilizar-se um multímetro obteve-se a tensão na saída próxima a 59 mV_{rms} para os sensores utilizados.

4 Resultados

Este capítulo traz os resultados obtidos, tanto em relação ao design da placa (já mostrado em *software* no capítulo anterior) quanto seu funcionamento.

4.1 PCB

Em função dos requisitos já discutidos e dos esquemas criados, realizou-se a “impressão” da PCB, trabalho esse realizado através de uma máquina específica para tal função. A Figura 30 mostra a máquina utilizada, da LPKF Laser & Electronics.

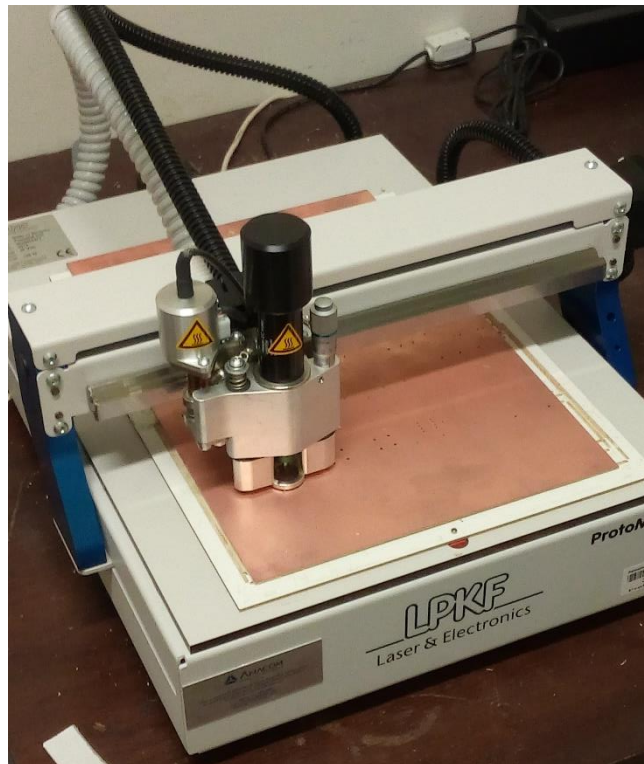


Figura 30 - Plotadora (ou impressora) de placa de circuito.

O resultado então é mostrado na Figura 31, onde pode-se notar semelhança com a Figura 23, sendo a imagem da placa real espelhada em relação ao esboço do esquemático, pois o esquemático traz a vista superior, e a imagem da placa real, inferior. A visualização do lado oposto ao mostrado na Figura 31 torna-se desnecessário, visto que só seriam visíveis os furos.

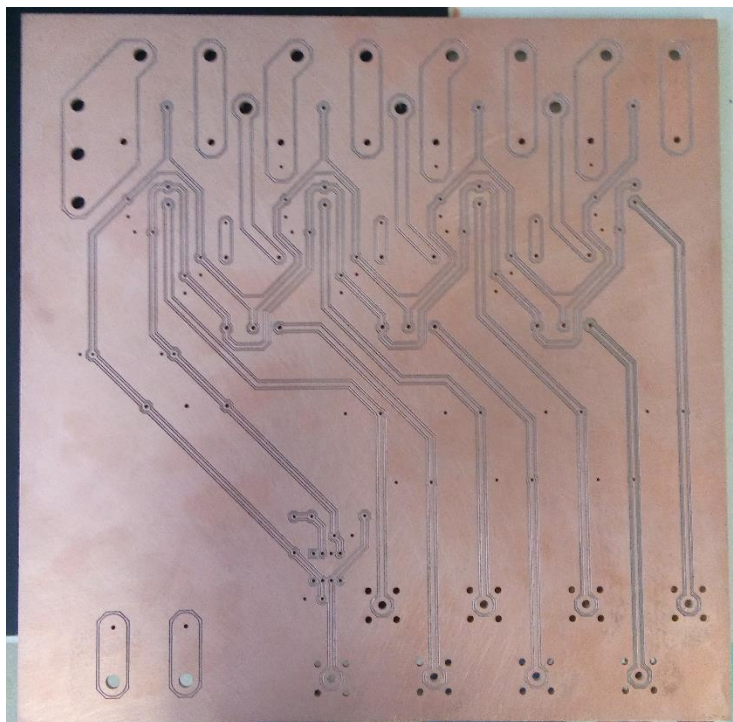


Figura 31 - Placa de fenolite cobreada após serem feitos os furos e as trilhas.

Após terem sido soldados os componentes em suas devidas posições, a vista superior da placa é mostrada através da Figura 32.

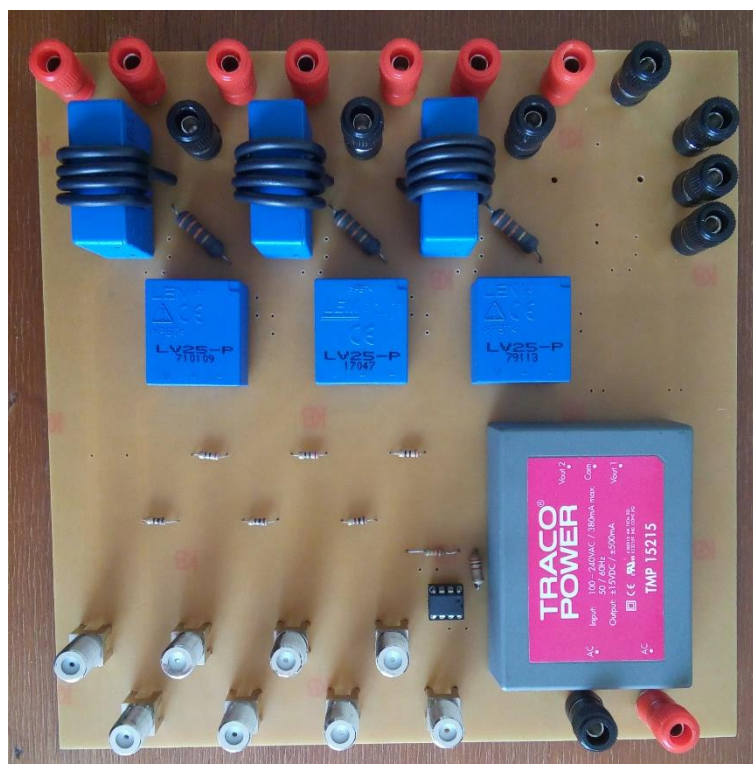


Figura 32 - Vista superior da placa, onde pode-se observar os componentes.

Os resistores de medição utilizados não foram os ideais apresentados no capítulo anterior. Os resistores de medição do LV 25-P foram de 100 Ω e os do LA 55-P de 20 Ω . Pode-se notar através desses valores e da Equação (12) que o resistor utilizado na validação tem valor maior que o máximo (70,71 Ω), porém como o resistor limitador de corrente utilizado foi de 33 k Ω , pode-se obter outro resultado da Equação (12), sendo ele o mostrado através da Equação (14).

$$R_{M_{LV}} = \frac{V_{p-p}}{I'_{sp-p}} = \frac{5}{0,0167 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}} = 106,07 \Omega \quad (14)$$

Onde I'_{sp-p} é corrente secundário de pico a pico em função da corrente primária ser igual a $I'_p = 220/33000 = 0,067$ A. Portanto utilizou-se o resistor de 100 Ω .

Já no caso do resistor de medição do sensor de corrente, utilizou-se um valor pouco abaixo do valor encontrado na Equação(13) (11), sendo o resistor utilizado durante a validação de 20 Ω . Nesse caso, para uma corrente secundária nominal, espera-se uma tensão de pico a pico de 2,8284 V.

No caso do resistor de medição do transdutor de corrente, observa-se que mesmo se fosse usado o resistor mencionado na Equação (11), tal valor estaria em desconformidade com o mínimo valor de R_M apresentado no *datasheet* [6] do componente. O mesmo ocorre caso o caso do uso do valor encontrado na Equação (12) para o LV 25-P. Os valores para o LA 55-P são apresentados na Tabela 6. A Tabela 7 apresenta os valores referentes ao LV 25-P.

Tabela 6 - Valores de resistência de medição informados no *datasheet* do LA 55-P (retirada de [6]).

Alimentação	Corrente máxima	$T_A = 70^\circ C$		$T_A = 85^\circ C$	
		$R_{M \min} (\Omega)$	$R_{M \max} (\Omega)$	$R_{M \min} (\Omega)$	$R_{M \max} (\Omega)$
± 12 V	+50 A	10	100	60	95
	+70 A	10	50	60	60
± 15 V	+50 A	50	160	135	155
	+70 A	50	90	135	135

Tabela 7 - Valores de resistência de medição informados no *datasheet* do LV 25-P (retirada de [7]).

Alimentação	Corrente máxima	$R_{M \min} (\Omega)$	$R_{M \max} (\Omega)$
± 15 V	+10 mA	100	340
	+14 mA	100	180

4.2 Validação da placa

Para a validação da placa utilizou-se como carga três lâmpadas (150 W e 127 V) ligadas em estrela e mediu-se a corrente em cada fase (com exceção do neutro, pois o sensor de corrente para o neutro será colocado apenas futuramente) e as tensões de fase. A Figura 33 mostra a bancada do laboratório durante a execução dos testes.

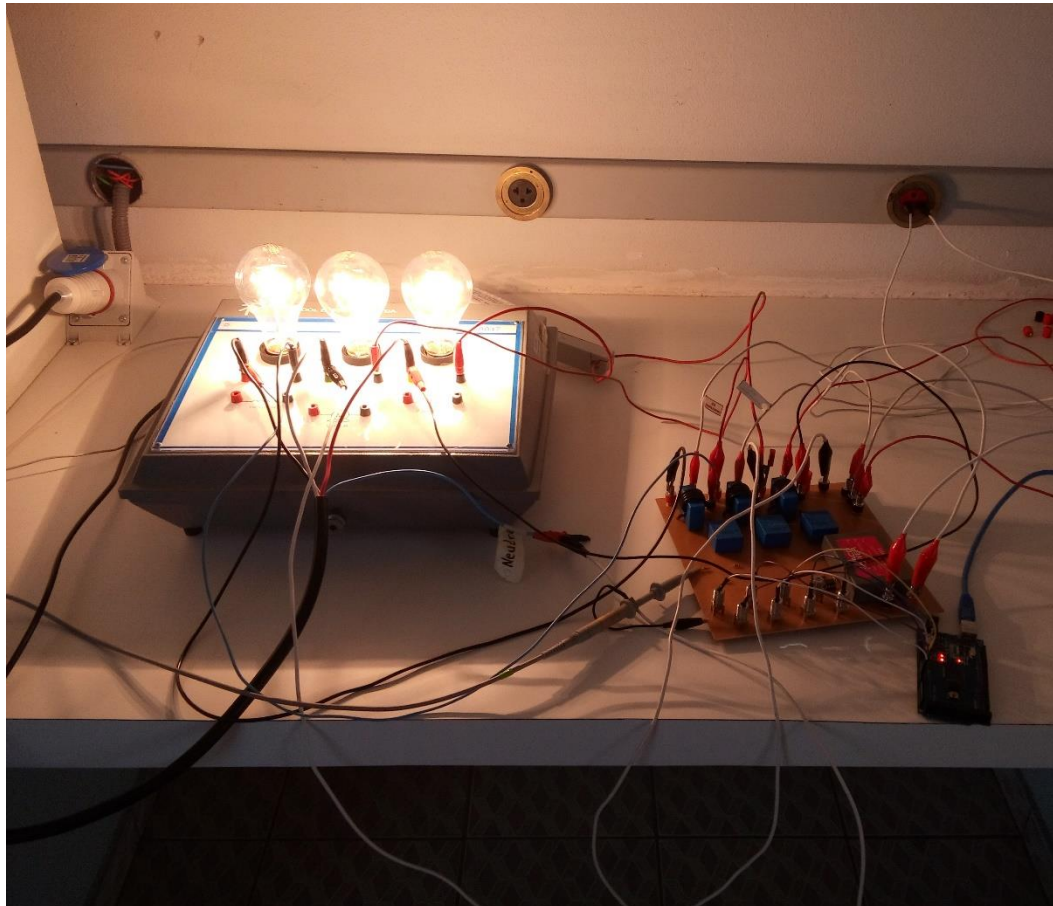


Figura 33 - Bancada contendo a placa de medição e a carga utilizada na validação.

Através das ligações realizadas, pode-se obter tanto através de um osciloscópio digital, tanto através do Arduino valores semelhantes tanto de tensão quanto de corrente.

Afim de comparação, medidas foram realizadas através de um osciloscópio digital da empresa Agilent Technologies modelo DSO3202A. No caso da medição da corrente, a sonda utilizada foi da empresa Tektronix modelo A622.

4.2.1 Medição de tensão

Para o caso da tensão, por se tratar de uma tensão trifásica da rede elétrica convencional, esperava-se uma tensão $127 V_{\text{rms}}$ ou $179,60 V_{\text{pico}}$. Porém, para se chegar a esse valor deve ser

feita a relação entre a saída obtida no sensor (e o resistor utilizado) com a real aferição de tensão. Portanto, o gráfico da Figura 34 mostra o valor de tensão encontrado por meio do osciloscópio (tomando-se como ponto de medida o resistor de medição do sensor de tensão).

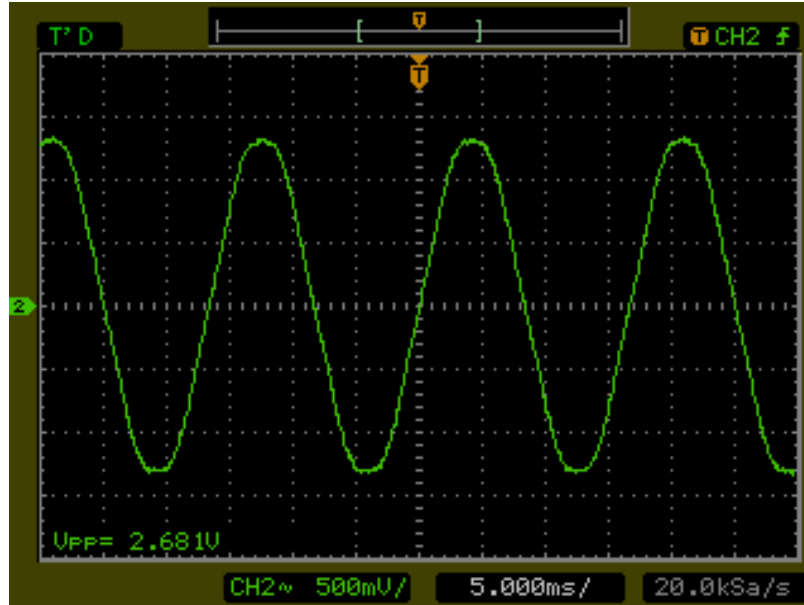


Figura 34 - Valor de tensão encontrado no resistor de medição do sensor de tensão.

Pode-se comprovar através da Equação (15) que esse valor apresentou diferença de 1,5% em relação ao valor medido.

$$V_m = I'_{pp} \cdot K_{N-LV} \cdot R_{M-LV} = \left(\frac{127}{33000} \right) \cdot \left(\frac{2500}{1000} \right) \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 100 = 2,7213 V_{pp} \quad (15)$$

O gráfico da leitura realizada por meio do Arduino, já feita a relação de transformação para que seja a mais próxima do valor real é apresentada na Figura 35.

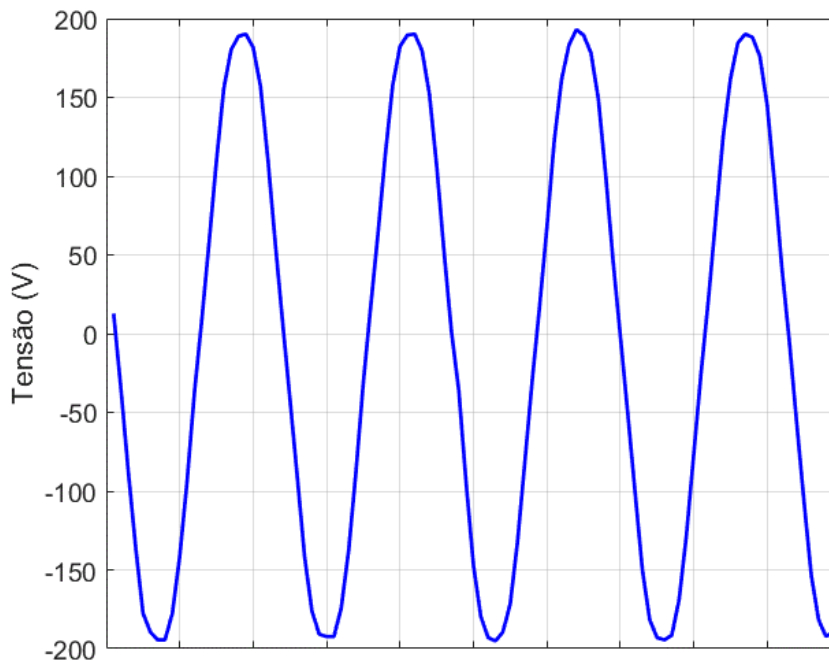


Figura 35 - Tensão obtida através do Arduino referente à saída da placa de medição.

Tanto através da Figura 34 quanto por meio da Figura 35 pode-se comprovar a eficácia no sensoriamento de tensão realizado através da placa criada.

Para teste da flexibilidade delta-Y montou-se a Tabela 8 com dados das três tensões para cada tipo de ligação, ou seja, para tensão de fase e tensão de linha.

Tabela 8 - Medições de tensão em estrela e delta para validação da flexibilidade delta-Y.

Tensão medida	Valor da tensão (V_{rms})
V_{an}	0,9478
V_{bn}	0,9478
V_{cn}	0,9549
V_{ab}	1,6916
V_{bc}	1,6916
V_{ca}	1,7003

Onde as três primeiras tensões tratam-se das tensões de fase e as outras três as de linha. Por meio da Equação (16) pode-se comprovar o correto funcionamento da flexibilidade.

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Levando-se em conta os dados de tensão de fase, os valores de linha deveriam ser iguais aos mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores medidos e calculados para tensão.

Tensão Medida (V _F)	Tensão Medida (V _L)	Tensão Calculada (V _L)	Erro relativo
0,9478 V _{rms}	1,6916 V _{rms}	1,6416 V _{rms}	3,04 %
0,9478 V _{rms}	1,6916 V _{rms}	1,6416 V _{rms}	3,04 %
0,9549 V _{rms}	1,7003 V _{rms}	1,6539 V _{rms}	2,80 %

O erro relativo foi calculado em relação à tensão calculada. E pode-se notar que foi um erro pequeno. Esse erro pode ser referente a baixa precisão dos resistores utilizados e também em função da corrente primária no sensor de tensão que tem relação direta com a exatidão do sensor.

4.2.2 Medição de corrente

A medição da corrente foi inicialmente realizada através de uma sonda de corrente plugada ao osciloscópio, cujo gráfico obtido pode ser visto na Figura 36. A escala utilizada na sonda foi de 100 mV/A, ou seja, o valor de pico a pico de 348 mV trata-se de uma corrente de 3,48 A.

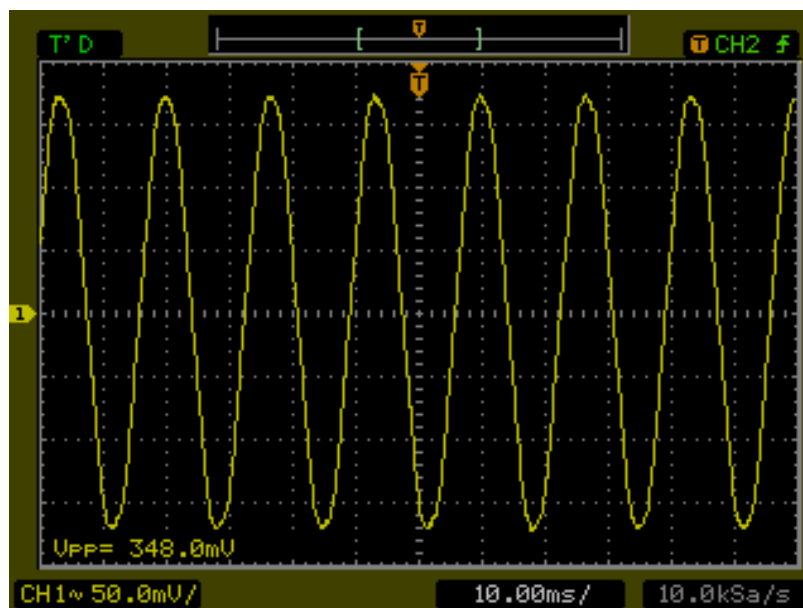


Figura 36 - Gráfico obtido através da sonda de corrente no osciloscópio na escala de 100 mV/A.

O valor teórico esperado para a corrente é igual a: $(150/127) \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 3,3407 A_{pp}$. No que diz respeito à placa, a saída em tensão encontrada através do resistor de medição utilizado é a mostrada na Figura 37. E esse valor pode ser comprovado através da Equação (17).

$$V_m = I'_{pp} \cdot N_{voltas} \cdot K_{N-LA} \cdot R_{M-LA} = 3,34075 \cdot \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot 20 = 334,07 \text{ mV} \quad (17)$$

O gráfico contendo a leitura no Arduino, já com a conversão realizada é apresentado na Figura 38. O valor medido com o sensor de corrente apresentou diferença de 1,15% em relação ao valor medido utilizando a ponta de prova de corrente.

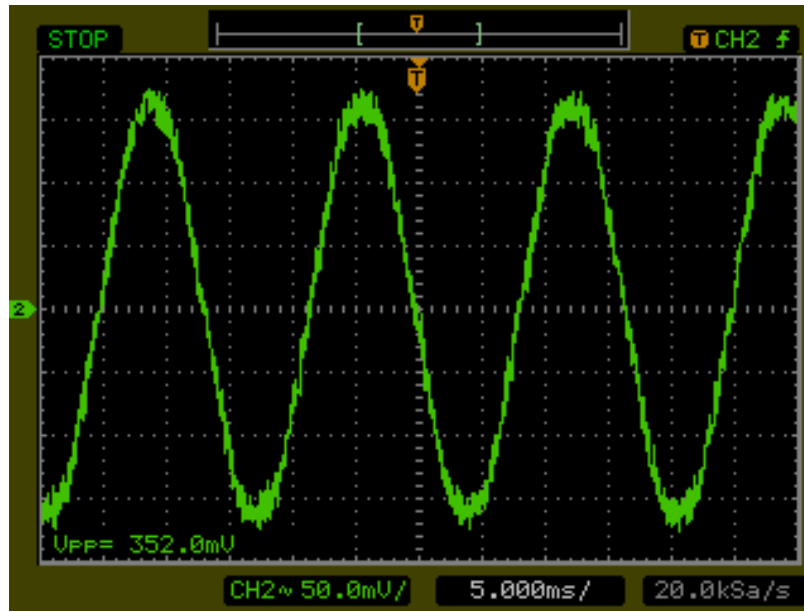


Figura 37 - Valor de tensão encontrado no resistor de medição do sensor de corrente.

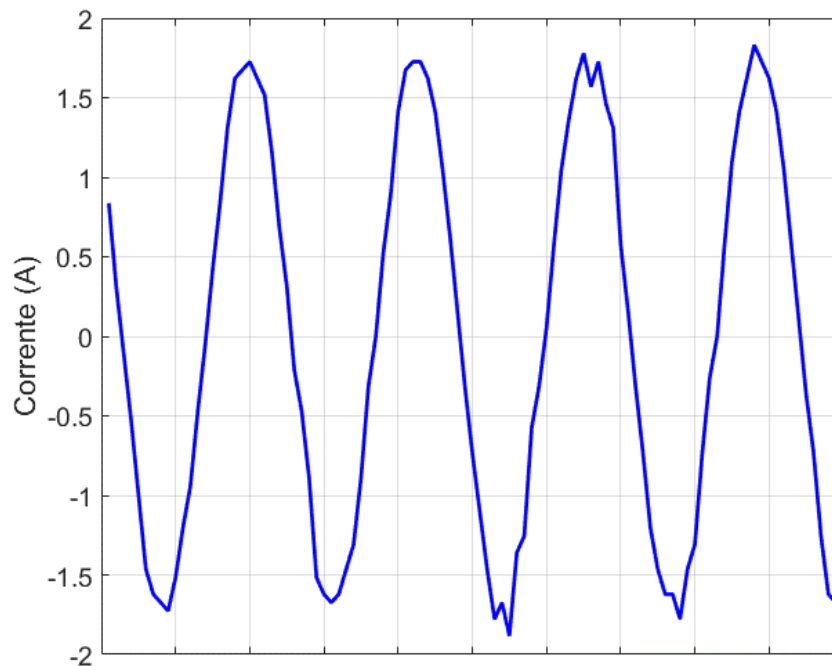


Figura 38 - Corrente obtida através do Arduino referente à saída da placa de medição.

Através dos gráficos apresentados acima pode-se observar que a placa realiza a medição com valores bem próximos dos esperados. O erro presente na medição de validação deve-se ao fato da não linearidade da lâmpada em função do seu aquecimento.

5 *Conclusões*

Primeiramente foi possível concluir que os sensores utilizados apresentam excelente funcionamento no que diz respeito às transduções de corrente e tensão. Além de possuírem boa linearidade e pouca influência à ruídos. Os ruídos presentes, principalmente (e quase que exclusivamente) na saída de corrente possivelmente serão amenizados através da inserção dos capacitores de desacoplamento e bulk.

No que diz respeito à placa construída, a mesma foi elaborada levando-se em conta os vários critérios transcritos no Capítulo 2 assim como também já mostrado no Capítulo 3.

A validação da placa deu-se através de cargas não majoritariamente lineares, porém, mesmo assim houve grande proximidade em relação aos valores teóricos nominais (esperados) e os valores encontrados através da aferição de corrente e tensão por meio da placa.

Portanto, pode-se dizer que os objetivos esperados foram alcançados com sucesso. Ficando como pendência apenas o fato dos resistores de medição calculados como mínimos para os dois tipos de sensores estarem com valores fora da faixa descrita nos respectivos *datasheets*, fato esse que, aparentemente, não influenciou na medição, visto que, como já dito, os valores encontrados estão bem próximos dos esperados.

5.1 *Propostas de continuidade e melhorias*

Em relação às melhorias que podem ser realizadas, a primeira diz respeito ao dimensionamento ótimo do resistor limitador de corrente e consequente alteração dos resistores de medição dos sensores de tensão para valores mais adequados além da utilização de resistores de precisão para um melhor resultado.

Uma importante continuidade diz respeito à adição dos capacitores de desacoplamento e de bulk, bem como a adição de um quarto sensor de corrente para que seja possível a medição da corrente de neutro (no caso da ligação estrela). Como esses componentes já foram previstos em projeto, porém não executados (em função da falta dos componentes), os seus respectivos furos e trilhas fazem parte da placa para adições futuras.

Além dessas adições descritas acima, a transformação da placa em um módulo de medição pode também ser realizada através da inserção da placa em uma “caixa”, deixando

expostos apenas os conectores (os quais podem ser trocados por bornes 90° para facilitar no projeto da caixa), tomando-se cuidado com o aquecimento gerado.

Em relação à proteção da placa, pode-se adicionar ainda varistor na entrada dos sensores e fusível. Além de possíveis melhoras no *design* da PCI, principalmente no que diz respeito ao tamanho da placa.

Referências Bibliográficas

1. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. **A Beginner's Guide to Measurement**. Londres: Queen's Printer and Controller of HMSO, 2010.
2. HELFRIK, A. D.; COOPER, W. D. **Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição**. Tradução de Antônio Carlos Inácio Moreira. [S.l.]: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
3. INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS. Instrumentação de Medidas Elétricas I. **IFSC**. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2010-2%20FFI0106%20LabFisicaIII/08-InstrumentosdeMedidasEletricas-I.pdf>>. Acesso em: Outubro 2016.
4. TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Physics for scientists and Engineers with Modern Physics**. 6ª. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2008.
5. MINIPA. Minipa - Solução em instrumentos de medição - multímetros e alicates, 2012. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/MO-2025-2032-2061-2100-2200-1103-BR.pdf>>. Acesso em: Novembro 2016.
6. LEM. LA 55-P. **LEM Website**, 2015. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/la_55-p_e.pdf>. Acesso em: Outubro 2016.
7. LEM. LV 25-P. **LEM Website**, 2014. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf>. Acesso em: Outubro 2016.
8. HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Campos Cruzados: O Efeito Hall. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. III, 2009. Cap. 28, p. 208-209.
9. HONEYWELL. Hall Effect Sensing and Application. Disponível em: <<http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magnetoresistive-hall-effect-applications-005715-2-en.pdf>>. Acesso em: Outubro 2016.
10. MEHL, E. L. D. M. PCI_Conceitos_fundamentais. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf>. Acesso em: Outubro 2016.
11. ABNT. ABNT Catálogo. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=009252>>. Acesso em: Outubro 2016.
12. COOMBS, C. F. J. (Ed.). **Printed Circuits handbook**. 6ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008.
13. MONTROSE, M. I. **Printed circuit board design techniques for EMC compliance: a handbook for designers**. 2ª. ed. [S.l.]: IEEE Press, 2000.
14. FORD MOTOR COMPANY. EMC Design Guide for Printed Circuit Boards, Outubro 2002. Disponível em: <<http://www.fordemc.com/docs/Downloads.htm>>. Acesso em: Outubro 2016.
15. IPC-2221 TASK GROUP. Generic Standard on Printed Board Design, Maio 2003.
16. LIMA, C. B. D. Apêndice D - Projeto de Placas de Circuito Impresso - Básico. In: LIMA, C. B. D. **Técnicas de Projetos Eletrônicos com os Microcontroladores AVR**. do autor. ed. Florianópolis: [s.n.], 2010. p. 389-408.
17. TRACO POWER. Traco Power products. **Traco Power**, 2016. Disponível em: <<http://assets.tracopower.com/20161031120609/TMP-TMPM/documents/tmp-tmpm-datasheet.pdf>>. Acesso em: Outubro 2016.

18. DIGI-KEY ELETRONICS. LV 25-P LEM USA Inc. | Sensors, Transducers | DigiKey. Disponível em: <<http://www.digikey.com/product-detail/en/lem-usa-inc/LV-25-P/398-1019-ND/409832>>. Acesso em: Outubro 2016.
19. TEXAS INSTRUMENTS. LM 741 Operational Amplifier, 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>>. Acesso em: Outubro 2016.
20. BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. Tradução de Alberto Gaspar Guimarães e Luiz Alves de Oliveira. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998. 455-456 p.
21. CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
22. TAMBARA, R. V.; FLORA, L. D.; GRÜNDLING, H. A. Projeto de Implementação de Instrumentação para Medição de Corrente Elétrica em uma Máquina de Vibração Eletromecânica. **Disciplinarium Scientia**, Santa Maria - RS, v. VI, p. 41-52, 2005.