

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JHONATAN GABRIEL MODOLO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA**

**CURITIBA**

**2021**

**JHONATAN GABRIEL MODOLO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA**

**Device development for power measurement**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira.

**CURITIBA**

**2021**

**JHONATAN GABRIEL MODOLO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecatrônica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 01/dezembro/2021

---

Valmir de Oliveira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Joel Gonçalves Pereira  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ubiradir Mendes Pinto  
Graduação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2021**

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Sergio e Shirley, e a meus irmãos, Eduardo e Karen (*in memoriam*), sem os quais não seria possível completar esta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado forças para concluir este trabalho. Aos meus pais pelo incentivo, pelo apoio financeiro e emocional.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Valmir de Oliveira, por suas contribuições para o desenvolvimento deste projeto e por disponibilizar o uso de seu laboratório para a execução prática deste trabalho.

Aos meus colegas de sala Augusto, Daniel, Felipe, Gabriel, Lorena, Lucas, Marcel, Mikael, Pedro e Rebeca.

Ao coordenador do curso Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues por toda a ajuda durante a graduação.

## RESUMO

Em um cenário onde procura-se otimizar processos produtivos, o monitoramento do consumo e da qualidade da energia elétrica são fundamentais. O fator de potência é um indicador da qualidade do consumo, sendo que um baixo fator de potência indica que a energia consumida está sendo mal aproveitada e causa problemas tanto para a distribuidora quanto para o consumidor. Visando o monitoramento destes problemas este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema capaz de medir as potências ativas e reativas em cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas bem como o fator de potência em sistemas trifásicos com cargas lineares e não lineares. O dispositivo é composto por um microcontrolador, sensores de corrente não invasivo, transformadores para aquisição de tensão, circuitos condicionadores de sinais e módulo para armazenamento de dados em cartão de memória. Tanto a potência quanto o fator de potência são calculados a partir de métodos numéricos. Após a montagem em placa de circuito impresso, o dispositivo foi utilizado para a realização de medições em circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos de três e quatro fios. Os resultados obtidos foram comparados com valores teóricos e os resultados foram considerados satisfatórios. Sendo que as maiores discrepâncias foram encontradas no circuito indutivo com erro no fator de potência de 5,65% e no circuito não linear com erro no fator de potência de 4,17%.

**Palavras-chave:** eletrônica de potência; fator de potência; microcontroladores.

## ABSTRACT

In a scenario where there is an attempt to optimize production processes, monitoring the consumption and quality of electricity are essential. The power factor is an indicator of the quality of consumption, with a low power factor indicating that the energy consumed is being poorly used and causing problems for both the distributor and the consumer. Aiming at monitoring these problems, this work proposes the development of a system capable of measuring active and reactive powers in single-phase, two-phase and three-phase loads, as well as the power factor in three-phase systems with linear and non-linear loads. The device comprises a microcontroller, non-invasive current sensors, voltage acquisition transformers, signal conditioning circuits and a module for storing data on a memory card. Both power and power factor are calculated using numerical methods. After mounting on a printed circuit board, the device was used to perform measurements on single-phase, two-phase and three-phase three- and four-wire circuits. The results obtained were compared with theoretical values and the results were considered satisfactory. The biggest discrepancies were found in the inductive circuit with a power factor error of 5.65% and in the non-linear circuit with a power factor error of 4.17%.

**Keywords:** power electronics; power factor; microcontrollers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas do conhecimento relacionadas ao projeto.....	16
Figura 2 - Corrente e tensão considerados para os cálculos do FP monofásico .....	18
Figura 3 - Triângulo de potências .....	20
Figura 4 - Tensões de um sistema trifásico equilibrado.....	21
Figura 5 - Gerador trifásico a quatro fios .....	21
Figura 6 - Gerador trifásico de três fios: (a) ligação em estrela, (b) ligação em delta.....	22
Figura 7 - Microcontrolador EK-TM4C1294XL .....	24
Figura 8 - Integração numérica pelo método do trapézio .....	26
Figura 9 - Sensor de corrente.....	26
Figura 10 - Circuito detector de cruzamento por zero .....	27
Figura 11 - Circuito somador não inversor .....	28
Figura 12 - Circuito regulador zener com <i>buffer</i> .....	29
Figura 13 - Filtro passa-baixas.....	30
Figura 14 - Transformador.....	31
Figura 15 - Optoacoplador.....	32
Figura 16 - Diagrama de blocos de fonte CC .....	32
Figura 17 - Retificador de onda completa em ponte .....	33
Figura 18 - Tensão de saída do filtro capacitivo.....	33
Figura 19 - Circuito regulador de tensão.....	34
Figura 20 - Módulo HW 125 de cartão micro SD .....	35
Figura 21 - Módulo DS1307 relógio.....	35
Figura 22 - Display LCD .....	35
Figura 23 - Diagrama representando os três circuitos condicionadores de tensão.....	37
Figura 24 - Circuito condicionador de tensão .....	37
Figura 25 - Sinal de entrada e sinal de tensão após condicionamento .....	38
Figura 26 - Circuito condicionador da corrente.....	39
Figura 27 - Detector de passagem por zero .....	40
Figura 28 - Sinal de saída do detector de passagem por zero .....	41
Figura 29 - Circuito de optoacoplamento com 4N25 linearizado .....	42
Figura 30 - Retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo.....	43
Figura 31 - Regulador de tensão de alta corrente .....	43
Figura 32 - Diagrama com etapas do <i>software</i> .....	44
Figura 33 - Circuito RC utilizado para a simulação .....	46
Figura 34 - Circuito RL utilizado para a simulação .....	46
Figura 35 - Circuito RMMO utilizado para a simulação .....	47
Figura 36 - Circuito trifásico a três fios utilizado para a simulação .....	48



<b>Figura 37 - Circuito trifásico a quatro fios utilizado para a simulação .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 38 - Diagrama de blocos do hardware .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 39 - Projeto lado superior .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 40 - Projeto lado inferior .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 41 - Vista superior da placa .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 42 - Circuito RC utilizado para a medições .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 43 - Visualização dos dados no display LCD .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 44 - Circuito RMMO utilizado para a medições .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 45 - Circuito RL utilizado para a medições .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 46 - Circuito trifásico três fios utilizado para a medições .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 47 - Circuito trifásico a quatro fios utilizado para a medições .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 48 - Arquivo de dados gerados .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 49 - Visualização dos dados no display LCD .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados teórico e simulado de circuito RC monofásico.....	46
Tabela 2 - Resultados teórico e simulado de circuito RL monofásico .....	47
Tabela 3 - Resultados teórico e simulado de circuito RMMO.....	47
Tabela 4 - Resultados teórico e simulado de circuito trifásico a três fios .....	48
Tabela 5 - Resultados teórico e simulado de circuito trifásico a quatro fios.....	49
Tabela 6 - Resultados teórico e medidos de circuito RC monofásico.....	53
Tabela 7 - Resultados teórico e medidos de circuito RMMO.....	55
Tabela 8 - Resultados teórico e medidos de circuito RL bifásico.....	55
Tabela 9 - Resultados teórico e medidos de circuito trifásico a três fios .....	56
Tabela 10 - Resultados teórico e medidos de circuito trifásico a quatro fios.....	57

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	PROBLEMA.....	14
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	Objetivo geral .....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	METODOLOGIA.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	ANÁLISE DE POTÊNCIA MONOFÁSICA .....	18
2.2	SISTEMA TRIFÁSICO.....	20
2.3	ANÁLISE DE POTÊNCIA EM SISTEMAS TRIFÁSICOS .....	22
2.4	MICROCONTROLADOR.....	23
2.5	TAXA DE AMOSTRAGEM .....	25
2.6	INTEGRAÇÃO NUMÉRICA.....	25
2.7	SENSOR DE CORRENTE .....	26
2.8	CIRCUITO DETECTOR DE PASSAGEM POR ZERO .....	27
2.9	CIRCUITO SOMADOR.....	28
2.10	CIRCUITO REGULADOR ZENER COM <i>BUFFER</i> .....	29
2.11	FILTRO PASSA-BAIXAS.....	30
2.12	TRANSFORMADOR ISOLADOR .....	30
2.13	CIRCUITO DE PROTEÇÃO – OPTOACOPLADOR.....	31
2.14	FONTE DE TENSÃO.....	32
2.14.1	Retificador de onda completa .....	33
2.14.2	Filtro capacitivo.....	33
2.14.3	Regulador de tensão .....	34
2.15	ARMAZENAMENTO DE DADOS .....	34
2.16	VISUALIZAÇÃO DE DADOS.....	35
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO <i>HARDWARE</i> E <i>SOFTWARE</i> .....</b>	<b>36</b>
3.1	CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAL .....	36
3.1.1	Circuito condicionador de tensão.....	36
3.1.2	Circuito condicionador de corrente .....	38
3.1.3	Detector de passagem por zero .....	39
3.2	CIRCUITO DE PROTEÇÃO .....	41
3.3	FONTE DE TENSÃO.....	42
3.4	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> .....	44
3.4.1	Testes de software .....	45
3.5	<i>HARDWARE</i> .....	50
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS MÉDIDOS.....</b>	<b>53</b>

4.1	CIRCUITO RC MONOFÁSICO.....	53
4.2	CIRCUITO RETIFICADOR MONOFÁSICO DE MEIA ONDA.....	54
4.3	CIRCUITO RL BIFÁSICO .....	55
4.4	CIRCUITO TRIFÁSICO A TRÊS FIOS .....	55
4.5	CIRCUITO TRIFÁSICO A QUATRO FIOS .....	56
4.6	ARMAZENAMENTO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS.....	57
4.7	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde que Andre-Marie Ampère definiu a corrente elétrica e criou uma maneira de mensurá-la no início do século XIX a utilização da energia elétrica e a medição das variáveis envolvidas tem evoluído e nos últimos anos o número de dispositivos para executarem essas mensurações tem crescido de maneira contínua (BELCHIOR *et al.*, 2009).

Segundo Alexander e Sadiku (2013) no final do século XIX houve uma disputa entre diversos cientistas sobre a forma da distribuição da eletricidade. A distribuição de energia na forma de corrente alternada (CA) tornou-se a principal forma de transmissão para se levar energia a longas distâncias devido a diferentes fatores, tais como a facilidade da alteração do nível da tensão com o uso de transformadores.

A qualidade da energia elétrica advém de um sistema elétrico que expressa conformidade no sinal transmitido. Tal qualidade é avaliada pela ausência ou restrição de desvios nos parâmetros de forma de onda de tensão e que possui frequência constante assim como ter fornecimento ininterrupto (OLIVEIRA, 2015).

Nos sistemas em corrente alternada as linhas de transmissão apresentam valores consideráveis de indutância e capacitância (SANTOS, 2010). Além disso com a crescente utilização de equipamentos eletrônicos de potência, com características não resistivas, resulta em perdas de eficiência na rede elétrica o que pode afetar o desempenho destes próprios equipamentos eletrônicos (OLIVEIRA, 2015).

Um dos parâmetros indicadores da perda de eficiência é o fator de potência (FP), que por definição é a razão entre a potência ativa (potência que efetivamente produz trabalho) e a potência total desenvolvida no sistema. A potência total é a soma geométrica da potência ativa e da potência reativa. A potência reativa não produz trabalho efetivo, mas é consumida para a geração do campo magnético (CELESC, 2002).

Um baixo fator de potência, ou seja, potência reativa com mesma ordem de magnitude que a potência ativa em uma carga, pode levar a diversas situações relacionadas a baixa qualidade no consumo da energia, tais como: aumento de perdas em máquinas elétricas, aquecimento de condutores e de dispositivos, impossibilidade do uso da capacidade total dos transformadores além de cobrança extra para fatores menores que 0,92 (COPEL, 2020).

Por estes motivos percebe-se a importância do monitoramento da qualidade da energia elétrica consumida sendo o fator de potência um ótimo indicador a ser mensurado. O valor do fator de potência não pode ser medido diretamente ele depende das características apresentadas pela corrente e tensão sobre a carga.

Portanto este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema microcontrolado capaz de mensurar o fator de potência em cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas através dos dados coletados da tensão e corrente das cargas.

## 1.1 PROBLEMA

Um baixo fator de potência é desencadeador de diversos problemas para a rede elétrica, tanto para o distribuidor quanto para o consumidor. O efeito Joule nas linhas e cabos de transmissão são proporcionais ao quadrado da corrente, que com o excesso de energia reativa, consumida esta corrente cresce aumentando as perdas e provocando aquecimento dos equipamentos. Essa elevação da corrente ocasiona também queda de tensão, que pode levar a interrupção na distribuição de energia. Outro problema é a subutilização dos equipamentos por conta da sobrecarga causada pela potência reativa (WEG, 2009).

Os principais causadores de um baixo fator de potência são: utilização de muitos motores de baixa potência, lâmpadas não resistivas, transformadores sobre dimensionados ou operando subcarregados, motores superdimensionados. Essas condições geram uma ineficiência na utilização da energia e uma sobretaxa quando o FP fica abaixo de 0,92 (COPEL, 2020).

Portanto este trabalho tem como objetivo a mensuração das potências ativas (Watt) e reativas (Var) e determinação do fator de potência em tempo real em redes monofásicas, bifásicas e trifásicas.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são abordados o objetivo geral deste trabalho e os objetivos específicos por meio dos quais o objetivo geral é alcançado.

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um dispositivo microcontrolado para cálculo do fator de potência que forneça ao usuário: o valor de potência consumida na carga em tempo real e de sua eficiência, por meio de um *display* LCD e que armazene em um cartão de memória os dados coletados e calculados.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Projetar os circuitos eletrônicos para aquisição dos sinais de tensão;
- Projetar os circuitos eletrônicos condicionadores dos sinais de corrente e tensão;
- Desenvolver os *softwares* para realizar os cálculos necessários;
- Desenvolver os *softwares* para realizar o armazenamento dos dados;
- Integrar os circuitos de aquisição e condicionadores com os *softwares*;
- Realizar testes do sistema após a integração.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A partir de 2015 começou a vigorar no Brasil o sistema de bandeiras tarifárias no sistema de cobrança da energia no Sistema Interligado Nacional onde, conforme a cor da bandeira tarifária, existe um acréscimo na cobrança do kWh (ANEEL, 2015). O sistema de bandeiras tarifárias foi adotado por conta do custo adicional na produção de energia elétrica com a utilização de usinas termoeletricas, que são acionadas em função do baixo nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas (G1, 2020).

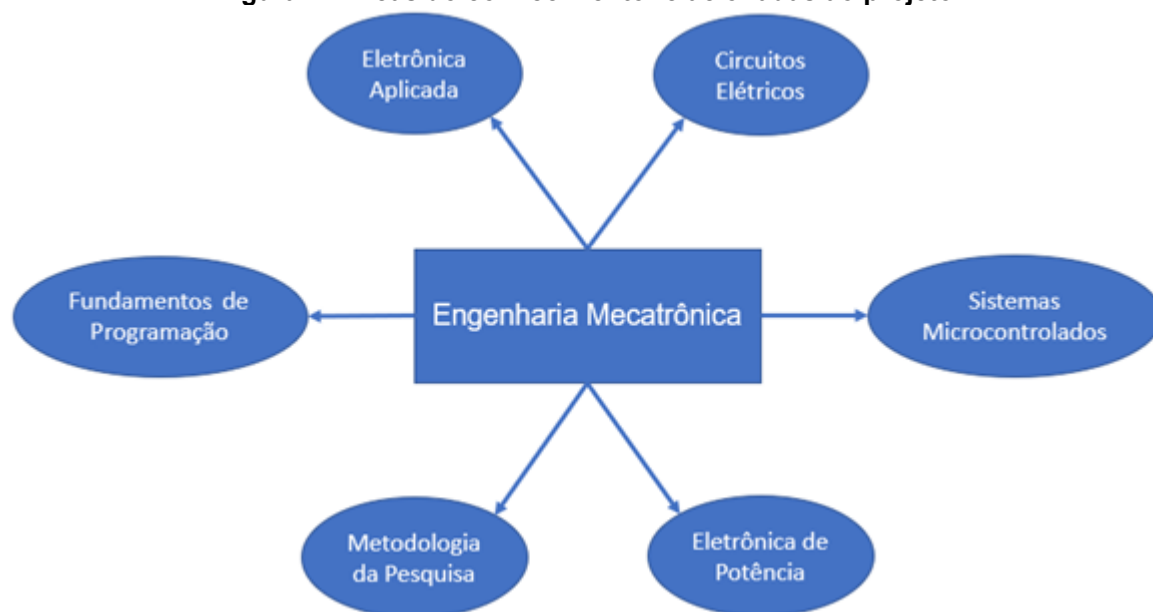
Neste contexto de escassez de energia é essencial que se tenha o máximo de aproveitamento da energia gerada. O fator de potência é um indicador da eficiência do consumo de energia elétrica (COPEL, 2020) mostrando, portanto, a importância do conhecimento deste dado para que, se necessário, ações sejam tomadas para melhorar o desempenho do consumo.

Portanto, o desenvolvimento de um medidor digital do fator de potência teve por motivação apresentar um método para se medir as potências consumidas e

calcular o fator de potência através de processo digital, visto que medições analógicas podem apresentar erros por conta do posicionamento do ponteiro e que os equipamentos de medição digital comerciais possuem seus projetos em sigilo.

Para o desenvolvimento deste medidor foram necessárias diversas áreas do conhecimento abordados no curso de Engenharia Mecatrônica, apresentadas na Figura 1.

**Figura 1 - Áreas do conhecimento relacionadas ao projeto**



**Fonte: Autoria própria**

#### 1.4 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se quanto a metodologia como quantitativo experimental (SIENA, 2007) e fundamenta-se nos conceitos revisados através de uma pesquisa bibliográfica (GIL, 2002) de onde partiu-se para a definição dos circuitos e parâmetros utilizados para a construção do protótipo e, posteriormente, da versão definitiva do produto.

Primeiramente foram projetados os circuitos necessários para a aquisição dos valores de tensão e de corrente. Em seguida foi necessária a adequação dos sinais de tensão e de corrente aos valores de leitura do microcontrolador. Além disso também foi projetado um circuito para a sincronização, para detectar a passagem pelo zero da tensão da rede elétrica.



Após a realização de testes dos circuitos em um *software* de simulação gratuito TINA-TI, foi desenvolvido um *firmware* para a realização dos cálculos de tensão e de corrente eficazes ( $V_{ef}$  e  $I_{ef}$ ) e do fator de potência.

Em seguida, os circuitos foram montados e testados em um *protoboard*. Os testes consistiram da utilização do medidor do fator de potência em três circuitos sendo dois deles lineares e um não linear. Foram medidos os valores de FP dos circuitos resistor-capacitor (RC), resistor-indutor (RL) e de um retificador monofásico de meia onda (RMMO). Após os testes foram realizadas eventuais correções nos circuitos e adaptações do código do microcontrolador.

Após a finalização dos testes e obtido o diagrama eletrônico definitivo, foi encomendada a fabricação da placa de circuito impresso para a montagem do sistema. Foram, então, realizadas as medições e os valores obtidos foram comparados com os valores teóricos para a determinação da taxa de erro do medidor desenvolvido.

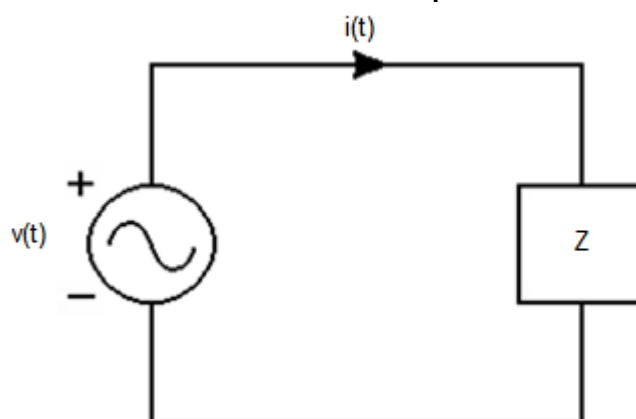
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os principais assuntos que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho, como conceitos envolvendo potência, sistemas trifásicos de energia elétrica e cálculo do fator de potência (FP). São abordados, também, conceitos sobre amostragem, integração numérica e são apresentadas características do microcontrolador utilizado. Por fim são descritos os circuitos condicionadores dos sinais e a construção de uma fonte de alimentação de corrente contínua (CC).

### 2.1 ANÁLISE DE POTÊNCIA MONOFÁSICA

Para tratar do fator de potência (FP) foi necessário apresentar uma visão geral sobre energia e potência elétricas. A forma mais comum de transmissão de energia a longas distâncias é a de corrente alternada a 50 ou 60 Hz (ALEXANDER; SADIKU, 2013). As análises realizadas para o cálculo da potência e do FP consideraram os circuitos em regime permanente. A corrente e tensão utilizadas inicialmente nos cálculos são as da fonte de alimentação de um circuito monofásico conforme Figura 2, sendo  $v(t)$  a fonte de tensão alternada,  $Z$  a impedância sob alimentação e  $i(t)$  a intensidade da corrente elétrica circulante.

Figura 2 - Corrente e tensão considerados para os cálculos do FP monofásico



Fonte: Autoria própria

A potência instantânea,  $p(t)$ , fornecida ou dissipada por um componente é o resultado do produto entre a tensão instantânea,  $v(t)$ , e a corrente instantânea,  $i(t)$ , desenvolvidas sobre o mesmo, conforme mostrado na equação (1). A tensão e a

corrente são funções periódicas, resultando em potência também variante no tempo e tem-se que a potência média ( $P$ ), também denominada potência ativa, é obtida pela integral da potência instantânea de um período da forma de onda dividida pelo período ( $T$ ) (DORF; SVOBODA, 2012), como apresentado na equação (2).

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt \quad (2)$$

O valor eficaz de uma corrente periódica ( $I_{ef}$ ), como apresentado na equação (3), é uma constante que dissipa potência média equivalente a uma corrente contínua em uma carga resistiva. O mesmo raciocínio é válido para a tensão eficaz ( $V_{ef}$ ) (IRWIN, 2000), dada pela equação (4). Após algumas manipulações algébricas tem-se:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \quad (3)$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (4)$$

A potência aparente ( $S$ ) é definida pelo produto entre a tensão eficaz e a corrente eficaz, equação (5), e representa a potência total liberada pela fonte. O fator de potência ( $FP$ ), que é um dos indicadores da qualidade do consumo, é definido como a razão entre a potência média ou ativa ( $P$ ) e a potência aparente, equação (6) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

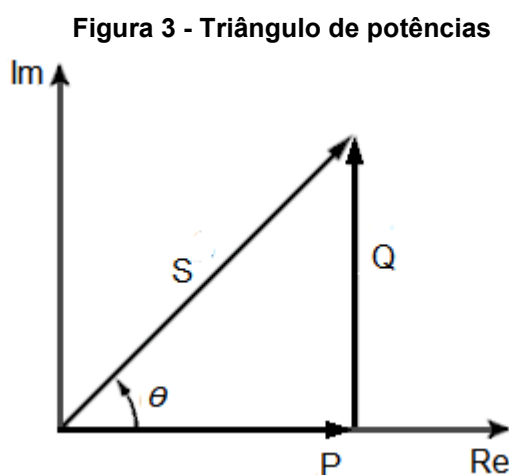
$$S = V_{ef}I_{ef} \quad (5)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

Em circuitos lineares a potência aparente ( $S$ ) também pode ser apresentada como a soma vetorial entre a potência ativa ( $P$ ) e a potência reativa ( $Q$ ), como mostrado pela Figura 3. A potência ativa é a responsável por efetivamente realizar trabalho. A potência reativa é utilizada para a geração de campo magnético (SCHNEIDER, 2015). A potência reativa ( $Q$ ) pode ser obtida pelo produto da potência aparente ( $S$ ) e o seno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão ( $\theta$ ), conforme a equação (7).

$$Q = S * \sin(\theta) \quad (7)$$

Na Figura 3, S corresponde à potência aparente expressa em volt-ampère (VA), P corresponde à potência ativa expressa em watts (W) e Q corresponde à potência reativa expressa em volt-ampère reativo (VAR). Im indica eixo dos números imaginários e Re o eixo dos números reais.



Fonte: Autoria própria

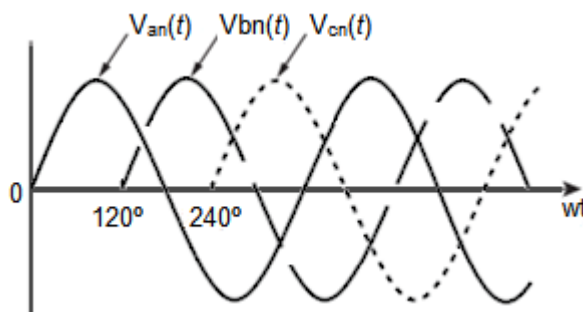
Quando o nível da energia reativa aumenta, como consequência, tem-se um menor fator de potência o que pode levar a uma série de problemas de perdas no sistema elétrico, tais como aquecimento da fiação, sobre dimensionamento de transformadores e chaves de comandos, além da possível cobrança extra para valores de FP inferiores a 0,92. O fator de potência em circuitos lineares também pode ser expresso pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão ( $\theta$ ), como apresentado na equação (8) (DORF; SVOBODA, 2012).

$$FP = \cos \theta \quad (8)$$

## 2.2 SISTEMA TRIFÁSICO

O método mais comum e mais econômico de transmissão de energia é através do sistema trifásico. No sistema trifásico a geração a transmissão e a distribuição de energia ocorrem por meio de três tensões com formas idealmente senoidais, defasadas em  $120^\circ$  entre si, conforme mostrado na Figura 4 onde  $V_{an}(t)$ ,  $V_{bn}(t)$  e  $V_{cn}(t)$  representam as três tensões de fase do sistema (medidas entre fase e neutro) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

**Figura 4 - Tensões de um sistema trifásico equilibrado**

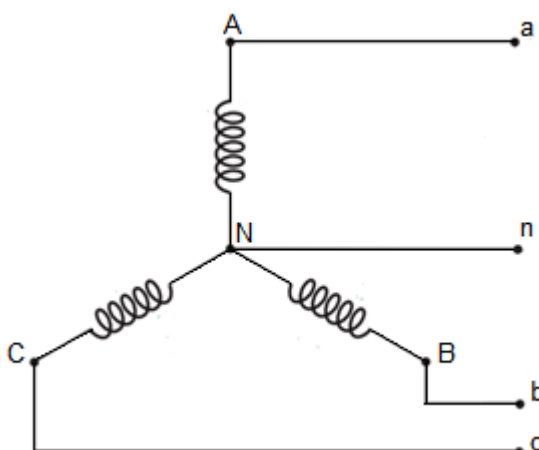


Fonte: Adaptado de Alexander e Sadiku (2013)

A geração de energia trifásica pode ocorrer de dois modos. O primeiro modo, denominado trifásico a quatro fios, consiste na presença de três conectores, apresentando potencial de fase em cada, e um neutro (potencial elétrico aproximadamente nulo) (BOYLESTAD, 2012), conforme a

Figura 5.

**Figura 5 - Gerador trifásico a quatro fios**



Fonte: Adaptado de Boylestad (2012)

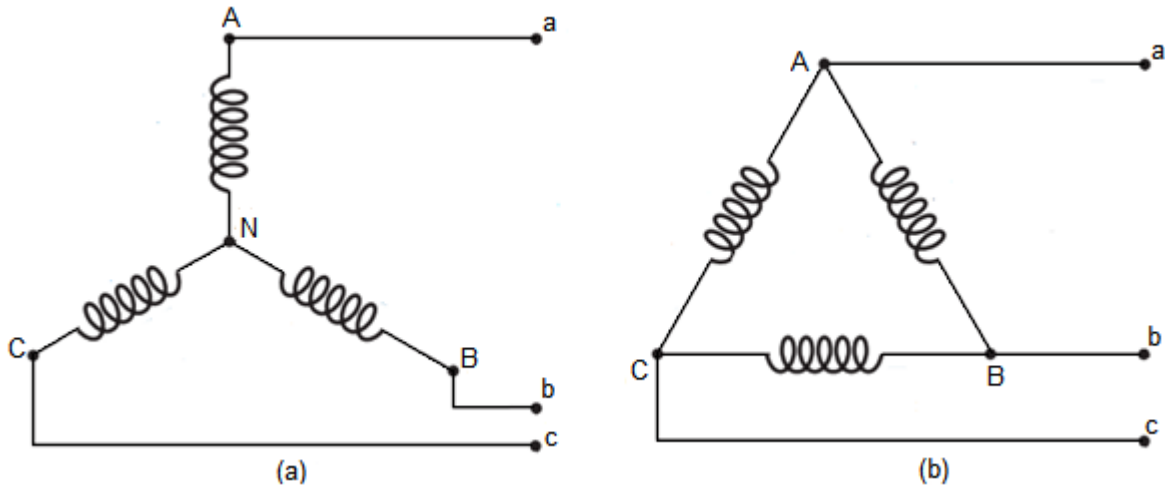
A partir deste gerador pode obter-se as tensões de fase ( $V_F$ ), que são a diferença de potencial entre qualquer fase e o neutro, e as tensões de linha ( $V_L$ ), que obtidas pela diferença de potencial entre duas fases. Quando as três fases são equilibradas existem relações entre as tensões de fase e de linha conforme a equação (9), onde  $V_F$  é a tensão de fase e  $V_L$  é a tensão de linha (DORF; SVOBODA, 2012).

$$|V_L| = \sqrt{3}|V_F| \quad (9)$$

O segundo modo de geração de energia trifásica é denominado trifásico a três fios, disponibiliza três fases, similar ao primeiro modo, mas sem disponibilizar o

condutor neutro. Nesse sistema a ligação das bobinas pode ser realizada em delta ou em estrela (BOYLESTAD, 2012), conforme a Figura 6.

Figura 6 - Gerador trifásico de três fios: (a) ligação em estrela, (b) ligação em delta



Fonte: Adaptado de Boylestad (2012)

### 2.3 ANÁLISE DE POTÊNCIA EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Para sistemas trifásicos a quatro fios a potência ativa total ( $P_T$ ) corresponde a soma das potências em cada fase, sendo que a potência em cada fase é calculada conforme a equação (10) (IRWIN, 2000), na qual  $P_a$ ,  $P_b$  e  $P_c$ , são, respectivamente, as potências fornecidas pelas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ ,

$$P_T = P_a + P_b + P_c \quad (10)$$

A potência aparente total ( $S_T$ ) é obtida pela soma das potências aparentes de cada fase, conforme mostrado na equação (11) (ALEXANDER; SADIKU, 2013), e a potência aparente de linha ( $S_{XY}$ ) é obtida pela equação (12). Combinando as equações (9) e (11) obtêm-se uma forma de calcular a potência ativa em função das tensões de linha, conforme a equação (13). Nas equações (11) a (13)  $S_a$ ,  $S_b$  e  $S_c$ , representa, respectivamente, as potências aparentes fornecidas pelas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , e  $S_{XY}$  representa a potência aparente de linha entre duas fases quaisquer X e Y.

$$S_T = S_a + S_b + S_c \quad (11)$$

$$S_{XY} = V_{XY\,ef} * I_{X\,ef} \quad (12)$$

$$S_T = \frac{S_{ab} + S_{cb} + S_{ba}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

O fator de potência pode ser calculado para cada fase conforme a equação (14), na qual  $FP_X$ ,  $P_X$  e  $S_X$  representam, respectivamente, o fator de potência, a potência ativa e a potência aparente da fase  $X$ .

$$FP_X = \frac{P_X}{S_X} \quad (14)$$

Para sistemas a três fios existem algumas mudanças nos cálculos visto que não se tem disponível a tensão de fase para a medição. Pode ser realizada a transformação da equação (10) utilizando as equações (15), (16) e (17) para que ela tenha dependência apenas de tensões de linha e então se possa determinar a potência ativa, conforme a equação (18). Sendo  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  as correntes de linha,  $V_{XY}$  a tensão entre as fases  $X$  e  $Y$ ,  $V_X$  e  $V_Y$  as tensões de fase  $X$  e  $Y$ ,  $P_{XY}$  a potência ativa entre as fases  $XY$ .

$$I_b = -(I_a + I_c) \quad (15)$$

$$V_{XY} = V_X - V_Y \quad (16)$$

$$P_{XY} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_{XY}(t) * I_X(t) dt \quad (17)$$

$$P_T = P_{ab} + P_{cb} \quad (18)$$

Para a potência aparente total ( $S_T$ ) pode ser utilizada a equação (13) também em sistemas a três fios (BOYLESTAD, 2012). Para determinar o fator de potência para cada uma das tensões de linha são combinadas as equações (9) e (14) para obter-se a equação (19), na qual  $FP_{XY}$ ,  $P_{XY}$  e  $S_{XY}$  representam, respectivamente, o fator de potência, a potência ativa e a potência aparente entre as fases  $X$  e  $Y$ .

$$FP_{XY} = \frac{P_{XY}}{S_{XY}} \quad (19)$$

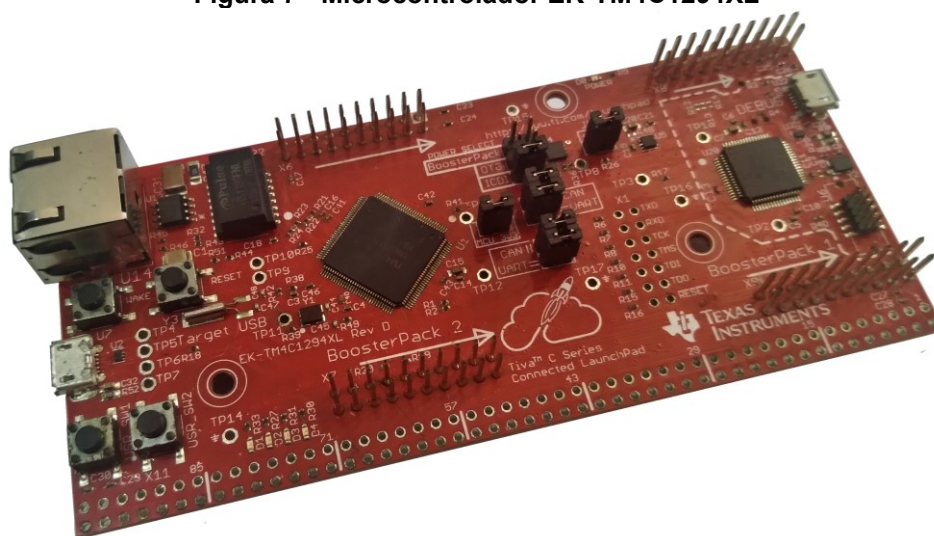
## 2.4 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador é o equipamento responsável pela leitura e processamento dos sinais da tensão e da corrente e pela realização dos cálculos para

a obtenção dos valores das potências ativa e reativa e do fator de potência. Neste trabalho foi utilizado o microcontrolador EK-TM4C1294XL (TEXAS, 2017).

O microcontrolador EK-TM4C1294XL, mostrado na Figura 7, faz parte de uma linha de *hardware* de baixo custo, apresenta razoável compatibilidade com a plataforma Arduino (sistema aberto), sendo que a programação realizada num pode ser executada no outro com pouca ou nenhuma modificação (TEXAS, 2017).

**Figura 7 - Microcontrolador EK-TM4C1294XL**



**Fonte: Autoria própria**

Algumas das principais vantagens do EK-TM4C1294XL é a programação em linguagem semelhante a C/C++ e a gravação através da porta USB por meio de um *software* gratuito disponível para os principais sistemas operacionais. (TEXAS, 2021).

Os principais componentes do *hardware* do microcontrolador EK-TM4C1294XL da Texas Instruments são (ENERGIA, 2021):

- 30 pinos de entrada e saída digital utilizados segundo a necessidade e conforme a escolha do modo dos mesmos no código;
- 20 pinos de entradas analógicas de 0 a 5V convertidos em valores de 0 a 4095;
- 19 pinos de saídas analógicas com modulação por largura de pulso (PWM);
- *clock* de 120 MHz;
- alimentação externa de 4,75 a 5,25V.



## 2.5 TAXA DE AMOSTRAGEM

Amostragem é o processo pelo qual ocorre a representação de um sinal contínuo através de um número finito de números, sendo aquelas amostras representativas do valor do sinal analógico. O sinal é amostrado com intervalos constantes sendo estes denominados de período de amostragem e seu inverso a frequência de amostragem (HIGUTI, 2021).

Segundo o teorema de Nyquist a frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da frequência do sinal de que se deseja obter a representação discreta (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010). Como são processados sinais senoidais em 60 Hz, a mínima taxa de amostragem teórica é de 120 Hz. Porém, na prática, quanto maior a frequência da amostragem maior a qualidade da representação discretizada do sinal.

## 2.6 INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

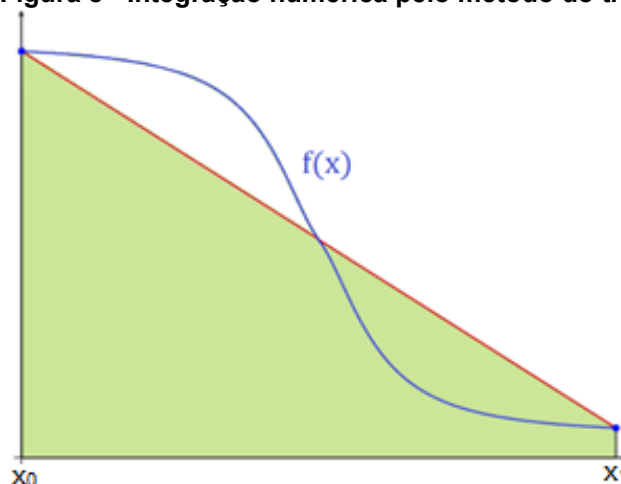
Como apresentado na seção 2.3, para obtenção do fator de potência (FP) é necessário realizar operações de integração nas equações da corrente e da tensão. Para situações em que há apenas o valor discreto da função é necessário fazer uso de métodos de integração numérico, já que não pode ser obtida uma antiderivada explícita (WILHELM, 2017).

Utilizou-se o método de integração do trapézio, que aproxima a integral pela área dos trapézios, sendo os vértices do trapézio os pontos discretos da função. A integração numérica do trapézio respeita a regra de Newton-Cotes e, portanto, os pontos a serem integrados estão igualmente espaçados (ÁVILA, 2019). A equação (20) mostra a função representativa da integração pelo método do trapézio, na qual  $f(x)$  é a função a ser integrada,  $x_0$  e  $x_1$  são os pontos inicial e final de integração e  $f(x_0)$  e  $f(x_1)$  são os valores da função nestes pontos.

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) = (x_1 - x_0) \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} \quad (20)$$

A Figura 8 mostra a representação da área do trapézio pela qual a integral de da função  $f(x)$  é aproximada entre os pontos  $x_0$  e  $x_1$ .

**Figura 8 - Integração numérica pelo método do trapézio**



Fonte: Adaptado de Wilhelm (2017)

## 2.7 SENSOR DE CORRENTE

O sensor de corrente não invasivo SCT-013-020, mostrado na Figura 9, é um transformador de corrente apresentando saída em tensão. O cabo sob corrente a ser monitorado funciona como o primário do transformador e por tratar-se de corrente alternada, a variação da corrente gera um campo elétrico proporcional a esta corrente que induz no enrolamento secundário do sensor uma diferença de potencial apresentada sobre um resistor de carga interno (CHAGURY, 2017).

**Figura 9 - Sensor de corrente**



Fonte: Autoria própria

Segundo o YHDC (2021) a saída do sensor varia de -1 V até 1 V proporcionalmente a corrente de entrada de 20 A<sub>ef</sub>. A tensão de entrada do microcontrolador é de 0 a 5 V e, portanto, é necessário aplicar uma tensão de

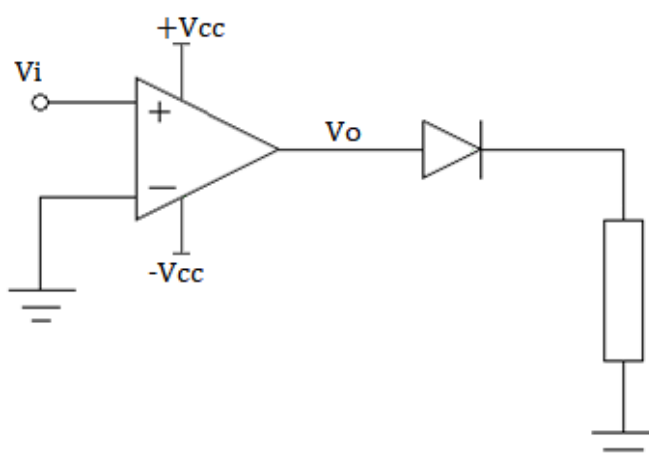
polarização de 1 V e um ganho de tensão de 2,5 realizado por meio dos amplificadores operacionais, adequando o sinal de saída do sensor para leitura do microcontrolador.

## 2.8 CIRCUITO DETECTOR DE PASSAGEM POR ZERO

Para o cálculo do fator de potência (FP) é necessário amostrar ao menos um ciclo completo da tensão e da corrente (POMILIO, 2014), uma maneira para obtermos os ciclos completos é a sincronização através do cruzamento da tensão pelo zero, determinando o início e o final de um período.

O amplificador operacional (AmpOp) quando utilizado na condição de comparador (sem realimentação), compara os valores das entradas não-inversora e inversora. Para a detecção do zero compara-se o valor da entrada não-inversora com a entrada inversora ligada ao potencial terra, conforme mostrado na Figura 10. Quando o sinal da entrada não inversora ( $V_i$ ) é maior que zero se tem o sinal de saída igual a alimentação positiva do AmpOp ( $+V_{cc}$ ) e para o sinal da entrada não inversora ( $V_i$ ) menor que zero temos o sinal de saída ( $V_o$ ) igual a alimentação negativa do AmpOp ( $-V_{cc}$ ). A presença do diodo efetua a retificação do sinal da saída, permitindo a passagem apenas do sinal positivo para o microcontrolador (WENDLING JR, 2010).

**Figura 10 - Circuito detector de cruzamento por zero**

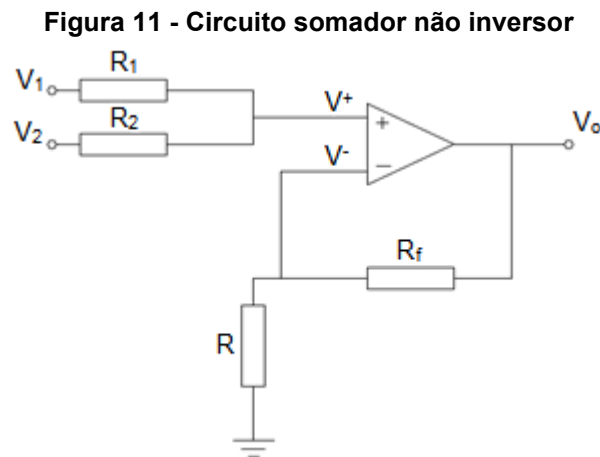


Fonte: Autoria própria

## 2.9 CIRCUITO SOMADOR

A entrada analógica do microcontrolador suporta tensões de 0 a 5 V. Como foi-se realizadas medições em corrente alternada é necessário adicionar uma tensão depolarização as tensões provenientes das leituras de tensão e corrente (ENERGIA, 2021), conforme descrito na seção 2.4.

A adição de tensão, sobre um sinal, pode ser realizada através do circuito somador não inversor, mostrado na Figura 11. No circuito o AmpOp possui realimentação negativa obtida através do resistor ( $R_f$ ) ligando saída e entrada inversora, o que faz com que a diferença de potencial entre as entradas inversora e não inversora seja idealmente nula (WENDLING JR, 2010).



Fonte: Autoria própria

Considerando as correntes de entrada nulas (elevada impedância de entrada do AmpOp) obtêm-se as equações (21) e (22), nas quais  $V_1$  é o sinal de entrada no resistor  $R_1$ ,  $V_2$  é o sinal de entrada no resistor  $R_2$ ,  $V^+$  é a tensão na entrada não-inversora,  $V^-$  é a tensão na entrada inversora,  $V_o$  é a tensão de saída e  $R$  e  $R_f$  são os valores dos resistores de ganho

$$V^+ = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (21)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) V^- \quad (22)$$

Como a diferença de potencial entre a entrada inversora e não-inversora é zero tem-se  $V^- = V^+$ , obtêm-se então a equação (23)

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left(\frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}\right) \quad (23)$$

## 2.10 CIRCUITO REGULADOR ZENER COM *BUFFER*

Para realizar a amostragem da tensão é necessário adequar o sinal compatibilizando com a faixa de leitura do microcontrolador (0 a 5V), sendo necessário um sinal de polarização para transformar o sinal CA em CC. Um método simples para gerar o sinal de polarização consiste em utilizar-se um circuito regulador zener.

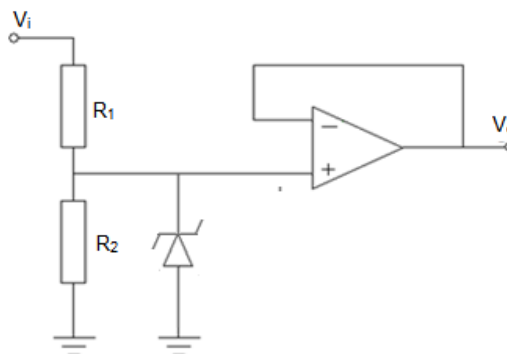
Resistores quando acoplados em série dividem a tensão proporcionalmente às suas resistências. Através da utilização de dois resistores consegue-se ajustar o valor de tensão.

Para maior confiabilidade juntamente ao divisor de tensão acrescenta-se um diodo zener na configuração de regulador sendo com um dos resistores funcionando como carga para o regulador. Além disso é necessário utilizar um circuito *buffer*, o qual isola as impedâncias de entrada e saída do AmpOp sendo possível adicionar uma outra carga a este regulador sem interferir no funcionamento do zener (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

A Figura 12 mostra o circuito regulador zener com *buffer* ou seguidor de tensão, obtido pelo AmpOp configurado para ganho unitário. O valor da tensão de saída ( $V_o$ ) é o menor valor entre a tensão zener nominal e o resultado da equação (24) em função dos valores das resistências e da tensão da entrada ( $V_i$ )

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i \quad (24)$$

**Figura 12 - Circuito regulador zener com *buffer***



Fonte: Autoria própria

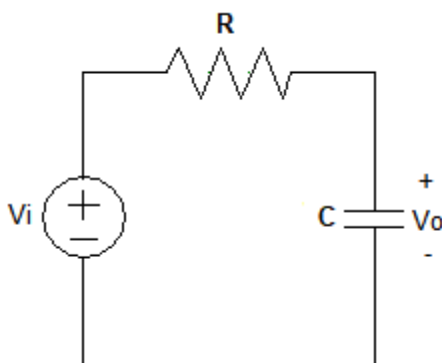
## 2.11 FILTRO PASSA-BAIXAS

Filtros são circuitos utilizados para a atenuação de frequências indesejadas que são captadas durante a aquisição de sinais por interferência do ambiente. Os filtros passivos passa-baixas são compostos que resistores, capacitores e/ou indutores e tem como função a eliminação de altas frequências (BOYLESTAD, 2012).

O filtro passa-baixas resistivo-capacitivo (RC) é obtido pela relação entre a tensão de entrada e a tensão sobre o capacitor conforme a Figura 13. A equação (25) apresenta a expressão para a obtenção da frequência de corte ( $\omega_c$ ) a partir da combinação dos valores da resistência (R) e da capacitância (C).

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (25)$$

**Figura 13 - Filtro passa-baixas**



**Fonte: Autoria própria**

## 2.12 TRANSFORMADOR ISOLADOR

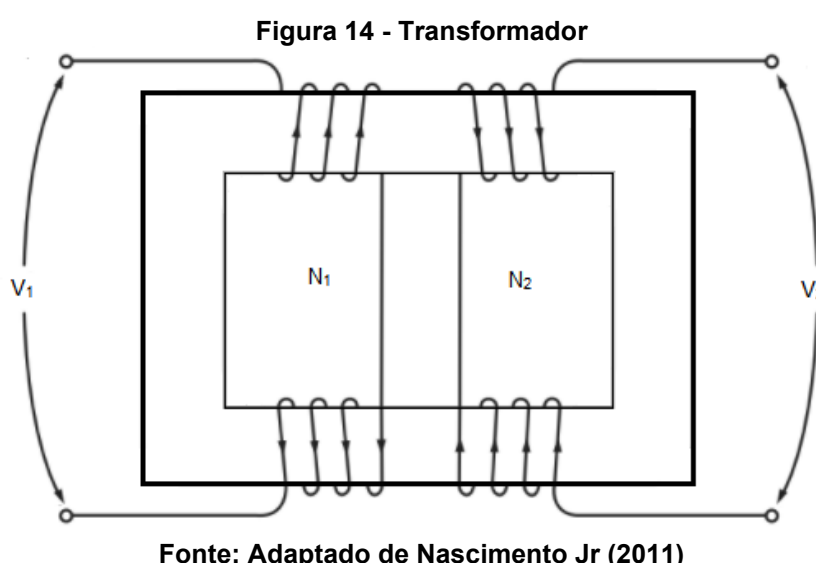
Para a realização da aquisição dos sinais de tensão é necessária sua adequação a faixa de leitura do microcontrolador (0 a 5V). A utilização de transformadores abaixadores de tensão atende a estes requisitos pois reduz o nível de grandeza da tensão.

Transformadores são equipamentos compostos de enrolamentos (primário e secundário) em torno de um núcleo de aço. Na Figura 14 é possível observar uma representação de um transformador. Quando se alimenta o primário com uma tensão alternada esta induz uma tensão alternada no enrolamento secundário. Outra

característica presente em parte dos transformadores é o isolamento galvânico, visto que não existe ligação elétrica entre o primário e o secundário (CHAPMAN, 2013).

Idealmente a relação entre a tensão de entrada e saída é dada pela relação entre o número de espiras do primário e do secundário conforme a equação (26), sendo  $N_1$  e  $N_2$  o número de espiras do primário e do secundário,  $V_1$  e  $V_2$  a tensão do primário e do secundário (NASCIMENTO Jr, 2011)

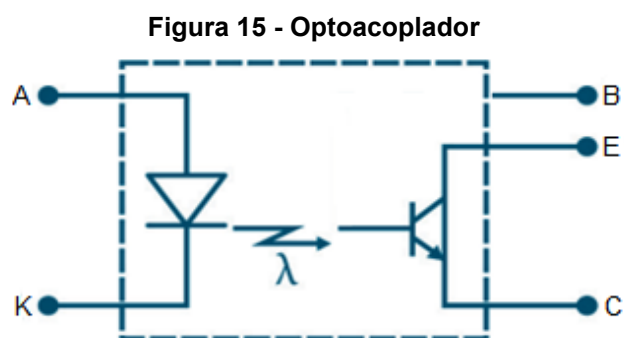
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (26)$$



Fonte: Adaptado de Nascimento Jr (2011)

### 2.13 CIRCUITO DE PROTEÇÃO – OPTOACOPLADOR

Quando se trabalha com circuitos de potência e sistemas microcontrolados é importante contar com circuitos de proteção que impeçam a transferência de valores elevados de correntes/tensões entre o circuito de potência e o circuito de controle pois este pode ser facilmente danificado. Os optoacopladores são componentes que proporcionam isolamento elétrico adequado entre circuitos de comando e de potência, pois o acionamento é realizado através da luz e não por corrente ou tensão (RODRIGUES; SEGUNDO, 2015). A Figura 15 apresenta o diagrama esquemático interno de um optoacoplador.



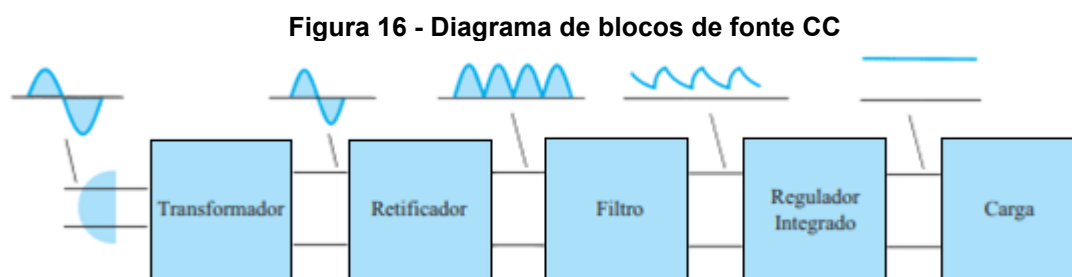
Fonte: Adaptado de Rodrigues e Segundo (2015)

O optoacoplador é composto de um diodo emissor de luz (LED), normalmente na faixa do infravermelho e um foto-transistor. Quando o LED é polarizado diretamente emite luz e aciona o foto-transistor que passa para o estado de condução (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2013).

## 2.14 FONTE DE TENSÃO

A grande maioria dos circuitos e dispositivos eletrônicos necessitam de alimentação em corrente contínua (CC) para seu funcionamento e como a energia disponível na rede de distribuição é em corrente alternada (CA), são necessários sistemas de retificação e regulação de tensão. Nesse projeto também foi desenvolvida a fonte de alimentação dos módulos eletrônicos (AmpOp e optoacoplador).

Para a conversão da corrente CA para CC são necessárias várias etapas, conforme mostrado na Figura 16: Um transformador para adequar o nível da tensão, um retificador, um filtro e um regulador (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



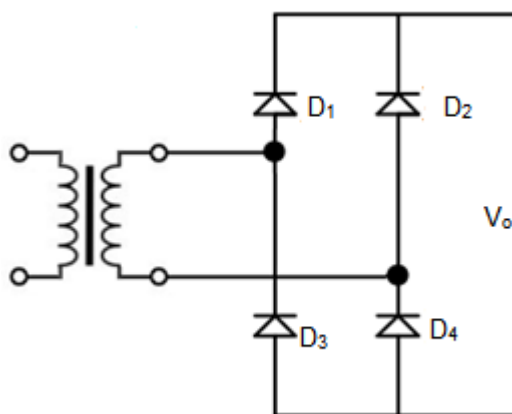
Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashelsky (2013)



### 2.14.1 Retificador de onda completa

O retificador de onda completa tem como objetivo converter os semi-ciclos da tensão senoidal para que resultem em um sinal que mantém a mesma polaridade. Na retificação de onda completa em ponte durante o ciclo positivo os diodos  $D_1$  e  $D_4$  conduzem e no ciclo negativo os diodos  $D_2$  e  $D_3$  conduzem, conforme a Figura 17 (RASHID, 1999).

Figura 17 - Retificador de onda completa em ponte

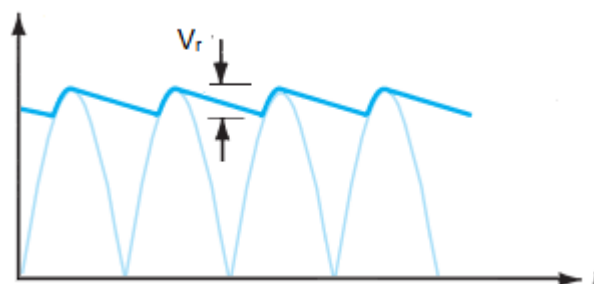


Fonte: Autoria própria

### 2.14.2 Filtro capacitivo

O filtro capacitivo tem por objetivo a redução da ondulação da tensão proveniente do retificador. Esta redução ocorre devido ao capacitor armazenar energia na forma de campo elétrico e descarregar para a carga, durante parte do ciclo de operação. O capacitor, montado paralelo à saída do retificador, provoca redução na variação da tensão conforme apresentado na Figura 18 (OLIVEIRA, 2013).

Figura 18 - Tensão de saída do filtro capacitivo



Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashlisky (2013)

A equação (27) apresenta a expressão para determinação da amplitude da ondulação (*ripple*) em função da corrente na carga ( $I_{carga}$ ), da frequência da rede elétrica ( $f_{rede}$ ) e da capacitância ( $C$ ).

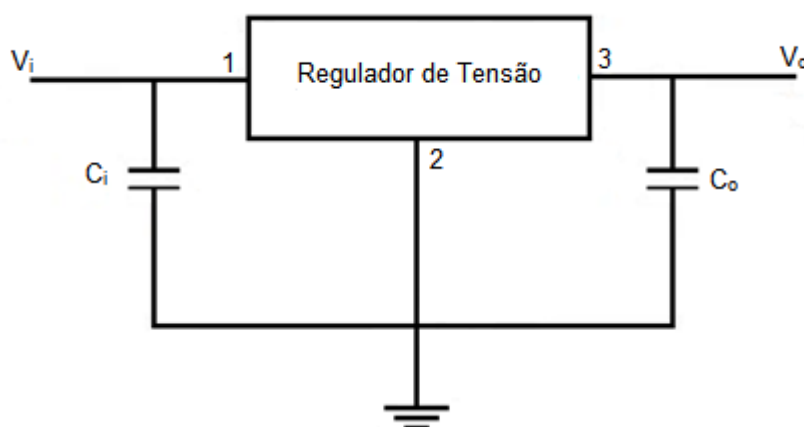
$$V_r = \frac{I_{carga}}{2f_{rede}C} \quad (27)$$

### 2.14.3 Regulador de tensão

Os reguladores de tensão são dispositivos que servem para o fornecimento de uma tensão CC com baixo *ripple*, fixa ou variável. A tensão de entrada nestes dispositivos deve possuir pequena variação em amplitude (*ripple*). Portanto devem ser usados após o filtro capacitivo, que devem apresentar capacitância adequada ao valor máximo especificado de *ripple* (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Os reguladores de tensão fixa positiva mais comuns possuem três terminais e são da série 7800, encapsulamento TO-220. Estes reguladores fornecem tensão de 5 a 24 V. De forma similar há reguladores da série 7900 que possuem características semelhantes, mas com regulação de tensão negativa (TEXAS, 2016). A Figura 19 mostra a forma de aplicação típica para os reguladores de família 7800.

Figura 19 - Circuito regulador de tensão



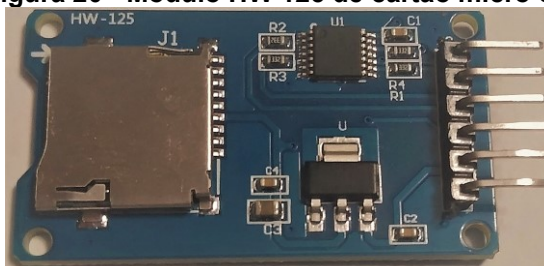
Fonte: Autoria própria

## 2.15 ARMAZENAMENTO DE DADOS

Para realizar-se o armazenamento dos dados foi necessário a utilização do módulo HW - 125 para micro cartão digital seguro (SD) que possibilita a gravação dos

dados no cartão pelo microcontrolador utilizando o protocolo de comunicação de interface periférica serial (SPI) (CATALEX, 2021). O módulo pode ser visto na Figura 20.

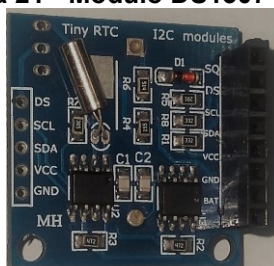
**Figura 20 - Módulo HW 125 de cartão micro SD**



**Fonte: Autoria própria**

Para o registro de data e horário da obtenção das medidas foi utilizado o módulo DS1307 (DALLAS, 2021) que funciona como um relógio em tempo real e um calendário. O módulo pode ser visto na Figura 21.

**Figura 21 - Módulo DS1307 relógio**



**Fonte: Autoria própria**

## 2.16 VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Para a visualização dos dados fez-se necessário a utilização de um módulo de display LCD 16x2 que pode ser visto na Figura 22. Este módulo possui o controlador HD44780 e dezesseis pinos sendo quatro de dados e dois de controle (RUIITE, 2021).

**Figura 22 - Display LCD**



**Fonte: Autoria própria**

### 3 DESENVOLVIMENTO DO *HARDWARE* E *SOFTWARE*

Neste capítulo são descritos o desenvolvimento, partindo dos conceitos do referencial teórico para o planejamento, a construção e os testes em *hardware* e *software* utilizados para o desenvolvimento do projeto.

#### 3.1 CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAL

O desenvolvimento dos circuitos de condicionadores de sinal foi realizado em três etapas: projeto eletrônico com base nas especificações requeridas, simulação dos circuitos em versão gratuita do *software* TINA-TI (TEXAS, 2020), montagem em *protoboard* e realização de testes e ajustes.

##### 3.1.1 Circuito condicionador de tensão

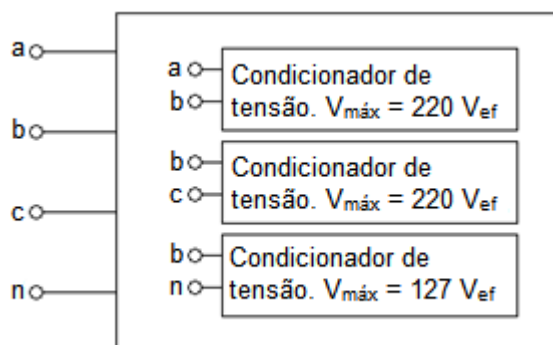
O circuito condicionador de tensão tem a função de transformar o sinal obtido da rede trifásica em sinal com amplitude compatível com a entradas do microcontrolador. Este projeto contém quatro entradas de tensão (a, b, c e n) indicando cada fase e o neutro, sendo duas delas selecionadas para tensão de linha com entradas de até 220  $V_{ef}$  e uma para até 127  $V_{ef}$  em tensão de fase, conforme mostrado na Figura 23.

Para a realização de medições de diferentes tipos de circuitos sem a utilização de chave seletora é necessário a ligação de cada circuito em diferentes entradas para que o *software* realize a identificação de qual tipo de circuito está conectado. Os circuitos monofásicos devem ter ligados aos conectores “b” e “n”, bifásicos aos “a” e “b”, trifásicos a três fios aos “a”, “b” e “c”, e trifásicos a quatro fios a todos os conectores.

O circuito de condicionador da tensão pode ser visto na Figura 24, onde foi utilizado um circuito regulador de tensão zener com *buffer*, apresentado na seção 2.10, e um transformador, apresentado na seção 2.12. O transformador reduz a tensão proveniente da rede para adequá-la a faixa de tensão aceita pelo microcontrolador e aplicá-la ao *buffer* U1A, parte do CI TL074BCN, o qual foi escolhido devido a seu alto valor de taxa de comutação (SR) (14V/ $\mu$ s). O regulador de tensão

zener com *buffer* utiliza os resistores R5 e R6 para efetuar a divisão da tensão proveniente da fonte de 12 V<sub>CC</sub>, que é regulada pelo zener e aplicada ao *buffer* U1A gerando o sinal de polarização.

Figura 23 - Diagrama representando os três circuitos condicionadores de tensão

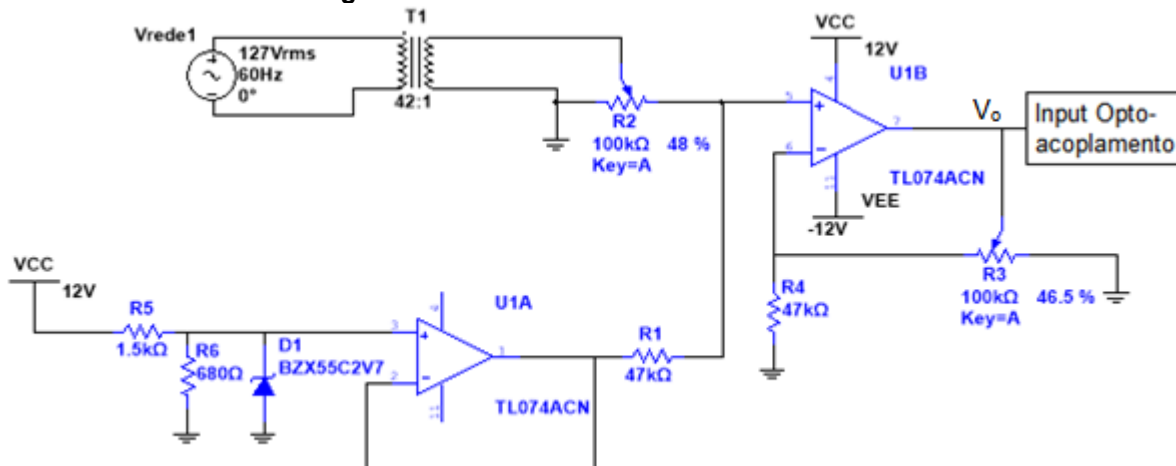


Fonte: Autoria própria

O modelo de transformador escolhido foi o com maior relação de transformação disponível com o primário 127 V<sub>ef</sub>/220 V<sub>ef</sub> e o secundário 3V<sub>ef</sub>. O divisor de tensão foi dimensionado de forma a obter tensão de carga de aproximadamente 3,7 V<sub>CC</sub> o que permite a polarização do diodo.

O sinal CA na saída do transformador T1, Figura 24, é aplicado no potenciômetro R2, propiciando ajuste na amplitude desse sinal e posterior soma ao nível CC na saída do *buffer* U1A, parte do CI TL074BCN. O AmpOp U1B realiza a soma dos sinais anteriores e o potenciômetro R3 controla o ganho do correspondente circuito somador. Desta forma obtem-se um circuito somador não inversor, conforme apresentado em 2.9, sendo a saída V<sub>o</sub> determinada pela equação (23).

Figura 24 - Circuito condicionador de tensão

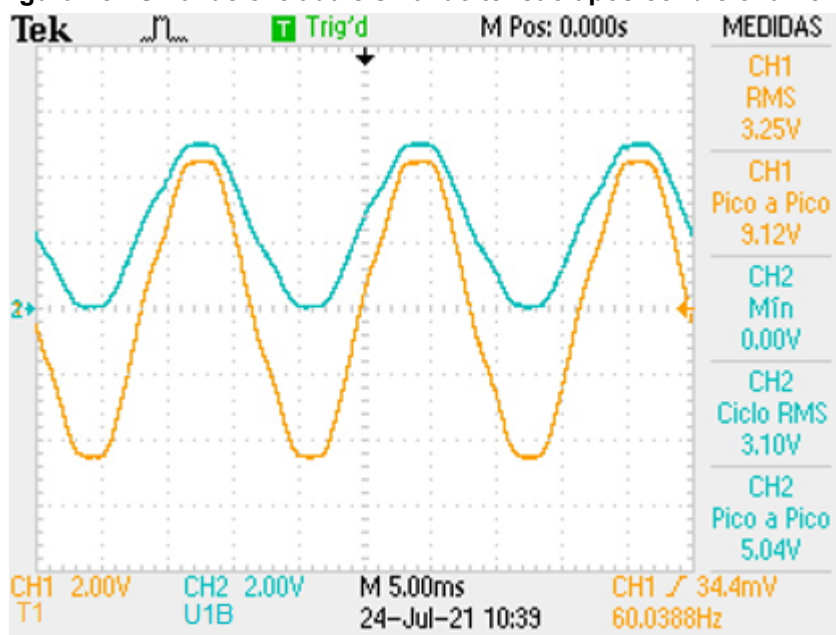


Fonte: Autoria própria

Dois dos resistores, no circuito somador, são ajustados em potenciômetros (R2 e R3), permitindo um controle razoavelmente fino e dessa forma compensando possíveis variações dos outros resistores (R1 e R4) devido a tolerância. O circuito completo com os valores dos resistores é mostrado na Figura 24.

O circuito condicionador de tensão após montagem em *protoboard* foi testado com a aplicação de tensão de 127 V<sub>ef</sub> a 60 Hz proveniente da rede e de 12 V<sub>CC</sub> gerado por uma fonte chaveada. A Figura 25 mostra o sinal de saída de U1B e o sinal do secundário do transformador T1, conforme Figura 24, medidos com o osciloscópio, sendo a saída de U1B representada em azul (CH2) e a saída de T1 representada em laranja (CH1). O circuito condicionador tem na entrada a tensão alternado proveniente do transformador e em sua saída o sinal com o nível adequado para a leitura do microcontrolador (0 a 5V).

Figura 25 - Sinal de entrada e sinal de tensão após condicionamento



Fonte: Autoria própria

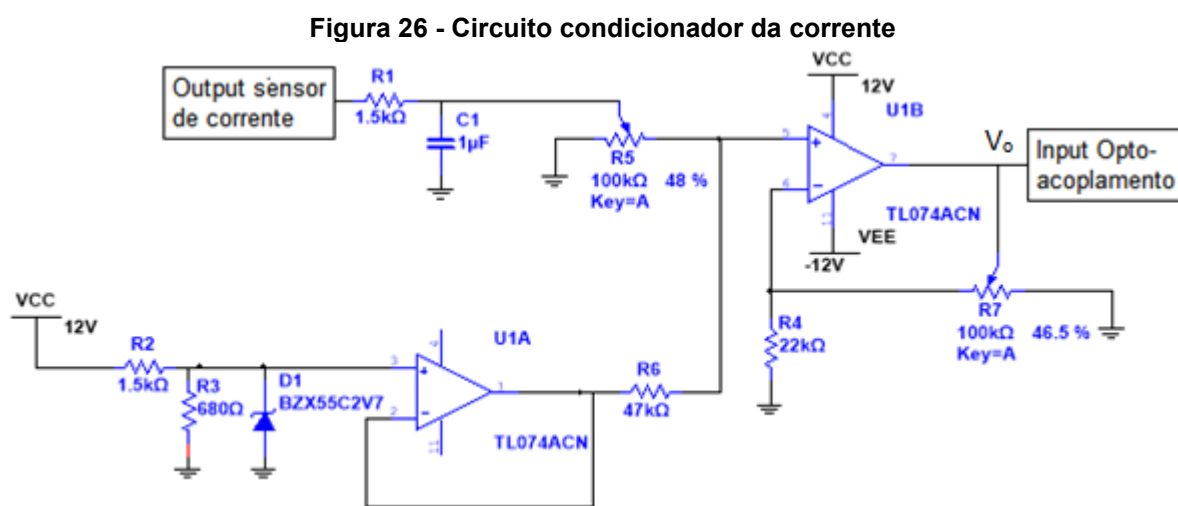
### 3.1.2 Circuito condicionador de corrente

O circuito condicionador de sinal de corrente tem como objetivo a adequação do sinal proveniente do sensor de corrente, conforme apresentado seção 2.7. Neste projeto foram utilizados três sensores de corrente, um em cada fase, sendo a corrente máxima suportada pelo sensor 20 A.

O circuito condicionador da corrente pode ser visto na Figura 26, onde foi utilizado um filtro passa baixas para eliminação de ruídos de alta frequência. Ele utiliza um regulador de tensão zener com *buffer*, os resistores R2 e R3 efetuam a divisão da tensão proveniente da fonte de 12 V<sub>CC</sub>, que é regulada pelo zener e aplicada ao *buffer* U1A, parte do CI TL074, gerando o sinal de polarização.

O sinal CA proveniente do filtro passa-baixas é aplicado no potenciômetro R5, propiciando ajuste na amplitude desse sinal e posterior soma ao nível CC na saída do *buffer* U1A. U1B realiza a soma dos sinais anteriores e o potenciômetro R7 controla o ganho do respectivo circuito somador. Desta forma obtem-se um circuito somador não inversor como já descrito na seção 2.9, sendo a saída V<sub>o</sub> determinada pela equação (23).

Assim como no circuito condicionador de tensão visto na seção 3.1.1 o circuito condicionador de corrente utiliza dois dos resistores ajustados em potenciômetros (R5 e R7), permitindo dessa forma compensar possíveis variações dos outros resistores (R4 e R6) devido a tolerância. O circuito condicionador pode ser observado na Figura 26.



Fonte: Autoria própria

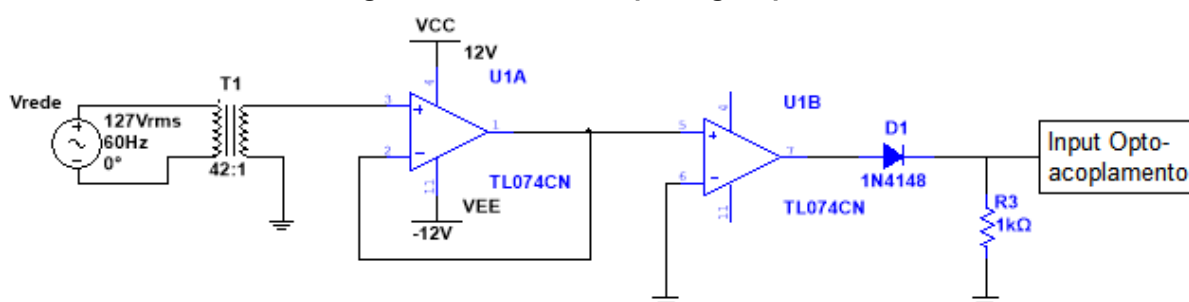
### 3.1.3 Detector de passagem por zero

O circuito detector de passagem por zero tem por objetivo a detecção do instante de cruzamento da tensão por zero, fornecendo a referência para sincronismo entre os sinais, detectando o instante de início de cada ciclo nos sinais, permitindo a

amostragem em ciclos completos. Foram utilizados três circuitos idênticos, sendo um para cada uma das fases.

O circuito consiste em um detector de passagem por zero, conforme apresentado na seção 2.8. O transformador T1, apresentado na Figura 27, reduz o nível de tensão e este é então aplicado no *buffer* U1A. O sinal proveniente de U1A é aplicado no comparador U1B que fornece  $12 V_{CC}$  durante o ciclo positivo da senoide da rede e  $-12V_{CC}$  durante o ciclo negativo. O diodo N4148 responsável por permitir a passagem apenas da tensão positiva, sendo este diodo escolhido por possuir baixo *recovery time* (2 ns), que é a taxa de tempo necessário para a mudança de estado do diodo. O resistor R3 tem a função de drenar corrente e assim permitir que o diodo possa se polarizar durante o ciclo positivo.

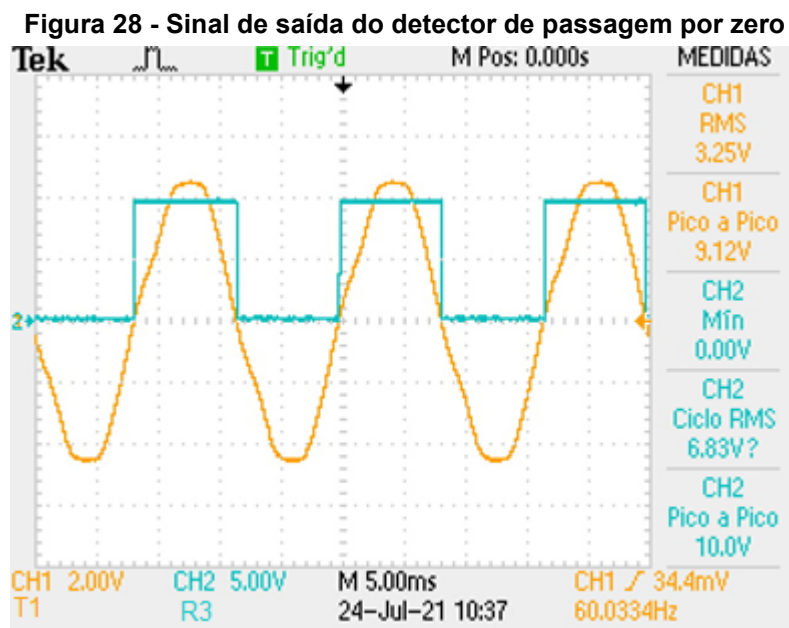
Figura 27 - Detector de passagem por zero



Fonte: Autoria própria

O circuito da Figura 27 foi montado em *protoboard* e testado utilizando como sinal de entrada uma senoide de 127 V<sub>ef</sub> a 60 Hz. A Figura 28 mostra o sinal de tensão sobre o resistor R3 medido com um osciloscópio em comparação com o sinal de tensão do secundário do transformador T1, sendo a tensão sobre R3 representada em azul (CH2) e a tensão do secundário de T1 representada em laranja (CH1). O circuito detector de passagem por zero tem na entrada a tensão alternada proveniente do transformador e a saída é de  $12 V_{CC}$  quando a tensão de entrada é positiva e  $0 V_{CC}$  quando a tensão de entrada é negativa.





Fonte: Autoria própria

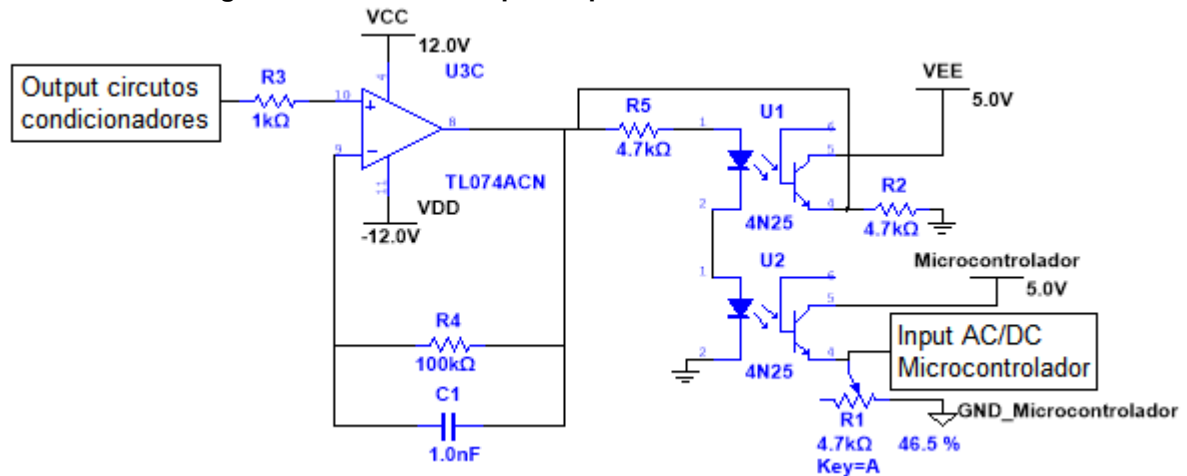
### 3.2 CIRCUITO DE PROTEÇÃO

O circuito de proteção tem como objetivo isolar eletricamente o microcontrolador dos circuitos de potência, evitando danos por sobretensão ou transitórios em corrente. O método de isolamento escolhido para este projeto foi através de optoacoplador como apresentado na seção 2.13.

Este isolamento se dá pela utilização do componente 4N25. O optoacoplador 4N25 é constituído de um diodo emissor de luz (LED) na banda do infravermelho e um foto-transistor. Tal componente tem aplicação facilitada em comando digital, mas também permite controle proporcional com alguns ajustes na polarização devido a condição de linearidade em faixa restrita. Apesar destas características este componente foi escolhido pois optoacopladores analógicos como o HCPL – 2530 custam dez vez mais.

Para solucionar o problema de linearidade utilizou-se um circuito que possui dois optoacopladores juntamente com um AmpOp. O optoacoplador U2 desempenha a função de isolar o circuito e o outro foi conectado com a saída de U3C que também está conectado em realimentação negativa através de um resistor e um capacitor. A conexão no modo realimentação negativa faz com que o AmpOp varie sua saída de modo que a diferença do sinal das duas entradas do AmpOp tenda a ser zero. O circuito pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 - Circuito de optoacoplamento com 4N25 linearizado



Fonte: Autoria própria

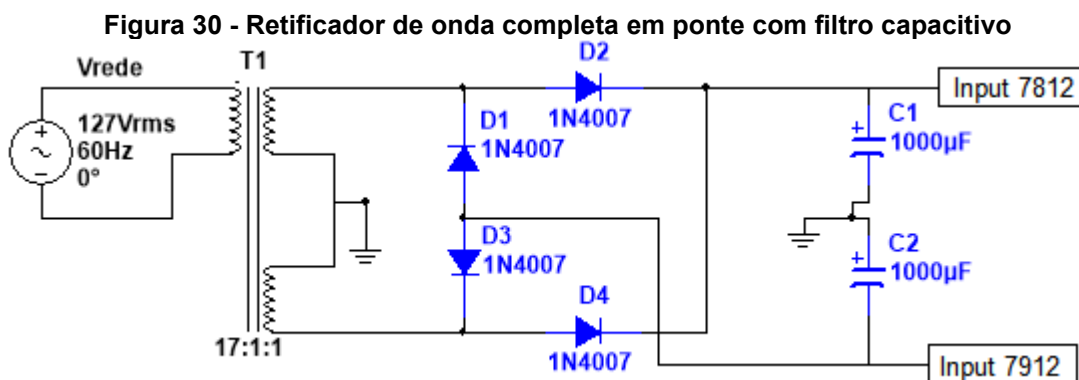
Como U1 está com seu LED conectado em série com o LED de U2 a corrente que passa por ambos é a mesma e, portanto, a excitação gerada por eles no fototransistor é a mesma. Como o AmpOp está no modo realimentação negativa U3C gera a mesma queda de tensão da entrada do circuito, U1 também gera esta queda de tensão pois está conectado em serie a U2. O resistor(R1) ligado ao fotoacoplador U2 é um potenciômetro para que seja possível um ajuste fino e ele tenha a mesma resistência que R2. A função de R4 e C1 é garantir um ganho alto ao AmpOp e R5 permite a polarização dos dois diodos.

### 3.3 FONTE DE TENSÃO

Como apresentado na seção 2.14, tanto os AmpOp quanto os optoacopladores necessitam de alimentação em CC sendo que o AmpOp escolhido para este projeto, o TL074, necessita de +12 V<sub>CC</sub> e -12 V<sub>CC</sub> e o circuito de isolamento necessita de +5 V<sub>CC</sub>. Para atender a estas exigências foi desenvolvido uma fonte de tensão simétrica de 12 V<sub>CC</sub> e uma de 5 V<sub>CC</sub>.

Para o desenvolvimento da fonte foram utilizados os reguladores de tensão LM7812 e LM7912 que forneceram as tensões necessárias para os AmpOp e o LM7805 que fornece a tensão utilizado pelos optoacopladores. Segundo o fabricante, Texas Instruments (2016), tais reguladores necessitam de tensão mínima de entrada de ±14,5 V<sub>CC</sub> e a tensão de entrada ideal é de ±19 V<sub>CC</sub>. Portanto o transformador

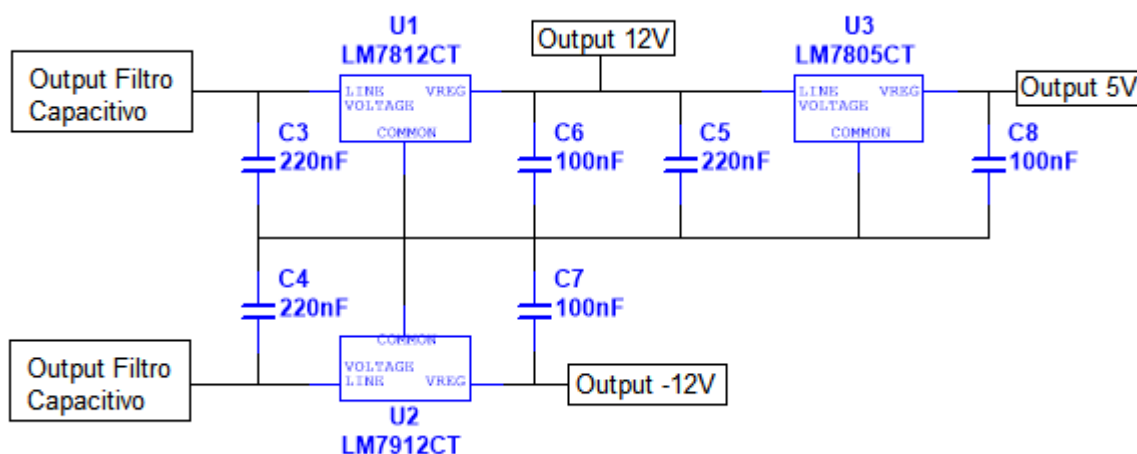
escolhido foi o 15 V +15 V que será retificado por uma ponte de diodos 1N4007 e tem a ondulação reduzida por um filtro capacitivo, conforme a Figura 30.



Fonte: Autoria própria

O valor da capacitância do filtro foi calculado conforme a equação (27), e para um *ripple* de 2 V, resultou-se em 1000  $\mu\text{F}$ . Os reguladores necessitam de valores baixos de capacitância na entrada e na saída, sendo na entrada 220 nF e na saída 100 nF. Tais capacitores reduzem o nível de ruído de alta frequência na tensão de saída (TEXAS, 2016). A disposição dos capacitores e dos reguladores pode ser vista na Figura 31.

**Figura 31 - Regulador de tensão de alta corrente**

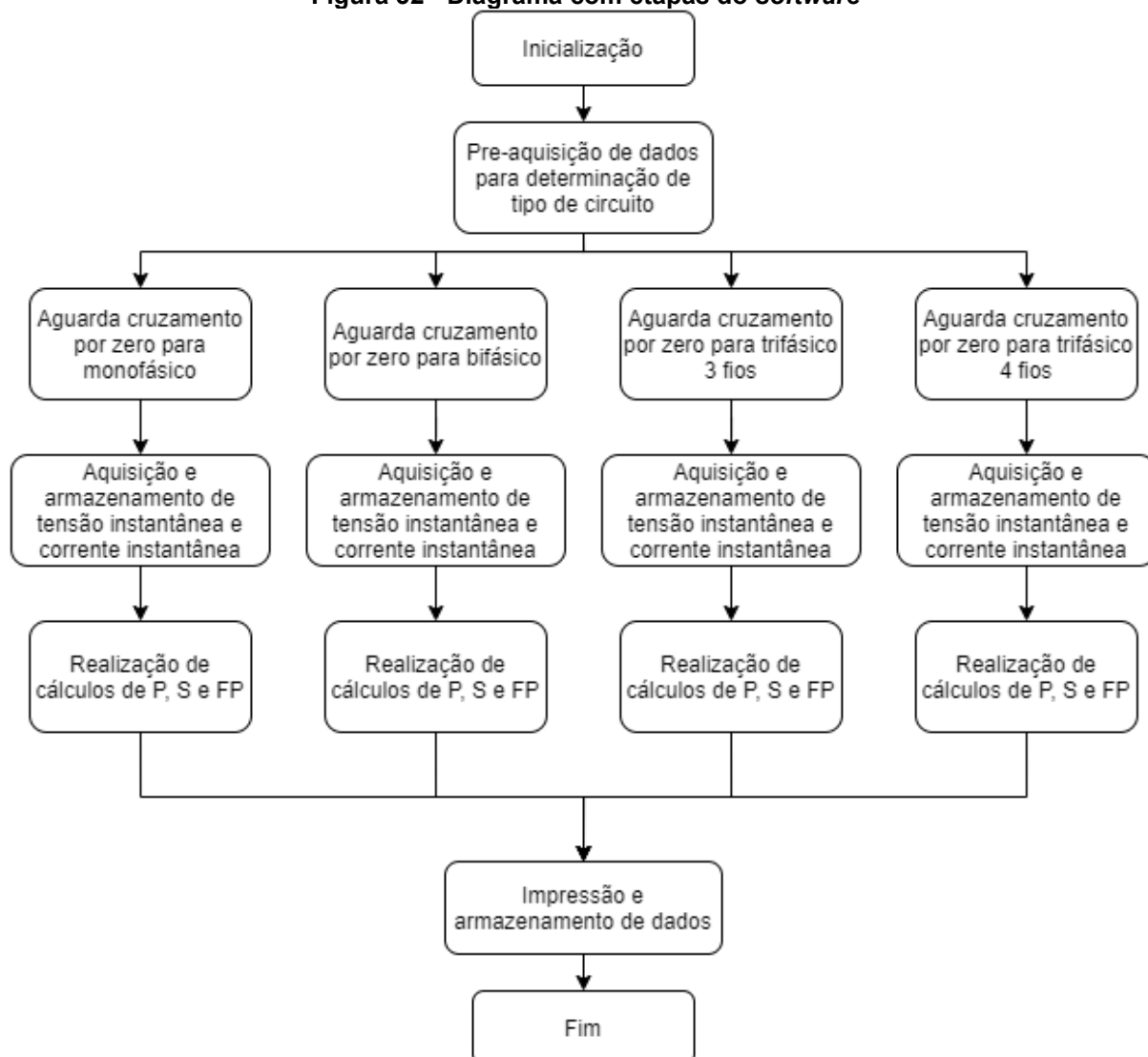


Fonte: Autoria própria

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O *software* foi dividido em cinco etapas: inicialização, pré-aquisição, aquisição e processamento, realização dos cálculos, impressão e armazenamento dos dados. A Figura 32 apresenta o diagrama com as etapas do *software*.

**Figura 32 - Diagrama com etapas do *software***



**Fonte: Autoria própria**

A etapa da inicialização consiste na configuração das portas do microcontrolador e na criação das variáveis e dos vetores necessários a realização das medições e dos cálculos.

A pré-aquisição se inicia após a inicialização e determina qual entrada é usada para a sincronização para o circuito detector de passagem por zero. A partir disto o microcontrolador passa a armazenar em vetores os valores das entradas dos

conversores analógico-digitais (ADC), sendo três entradas de corrente, convertidas em tensão e outras três de tensão, proporcionais a cada uma das fases da rede. Os valores armazenados nos vetores podem variar de 0 a 4095 e, portanto, precisam de um processamento para serem representados como valores reais.

Os dados dos vetores são submetidos a equação (28), para que os seus valores representem em verdadeira grandeza a tensão e a corrente, onde  $x$  representa o valor do dado em verdadeira grandeza,  $d$  o dado lido pela entrada ADC e  $k$  o valor de pico a pico do sinal lido. Para a tensão tem-se  $k$  como 622,25 ou 359,21 e para a corrente tem-se 56,56.

$$x = \left( \frac{d}{4095} - 0,5 \right) * k \quad (28)$$

Conforme determinado na etapa de pré-aquisição o *software* realiza os cálculos conforme o tipo de circuito conectado. São realizadas as integrais, através por meio da equação (29) onde  $f(i)$  representa a função a ser integrado para que se possa obter os valores das potências e do fator de potência. Em seguida, os resultados são gravados no cartão micro SD e impressos no display LCD.

$$\sum_{i=0}^{62} \frac{f(i) + f(i + 1)}{2 * 64 * 60} \quad (29)$$

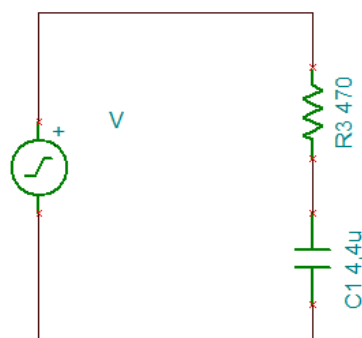
#### 3.4.1 Testes de software

A validação do *software* deu-se inicialmente através do *software* Energia com um código desenvolvido para a determinação do FP, da potência ativa e reativa de circuitos monofásicos. Os dados de tensão e de corrente foram gerados de forma analítica através das funções senoidais em um software de planilha, Excel, simulando os dados de aquisição. Em seguida, os dados foram inseridos ao código através de vetores cujos valores estavam entre 0 e 4095 que são os valores de saída do conversor analógico/digital do microcontrolador.

Foram simulados três circuitos monofásicos, um circuito RC, um RL e um retificador monofásico de meio onda (RMMO) com carga resistiva. A tensão de entrada foi considerada como de 127 V. No circuito RC foram utilizados um resistor de 470  $\Omega$  e um capacitor de 4,4  $\mu\text{F}$ , conforme a Figura 33. No circuito RL foram

utilizados um resistor de  $500 \Omega$  e um indutor de  $1 \text{ H}$ , conforme a Figura 34. O circuito RMMO tem uma carga de  $470 \Omega$ , conforme a Figura 35. Os valores do FP, da potência ativa e da potência passiva, teóricos, determinados via simulação e o valor do erro podem ser vistos nas Tabela 1, 2 e 3.

**Figura 33 - Circuito RC utilizado para a simulação**



Fonte: Autoria própria

Os resultados da simulação do circuito RC monofásico são apresentados na Tabela 1, sendo o maior erro encontrado na potência ativa  $1,15\%$ .

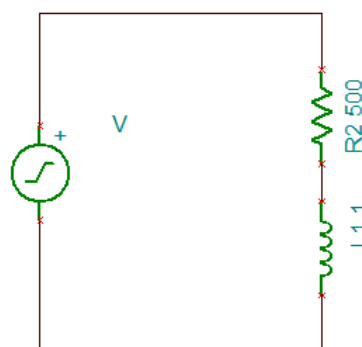
**Tabela 1 - Resultados teórico e simulado de circuito RC monofásico**

	Teórico	Simulado	Erro (%)
FP	0,6148	0,6196	0,77%
Potência ativa	12,9729	13,1243	1,15%
Potência aparente	21,0996	21,1810	0,38%

Fonte: Autoria própria

O segundo circuito simulado foi o circuito RL onde utilizados um resistor de  $500 \Omega$  e um indutor de  $1 \text{ H}$ , conforme a Figura 34.

**Figura 34 - Circuito RL utilizado para a simulação**



Fonte: Autoria própria

Os resultados da simulação do circuito RL monofásico são apresentados na Tabela 2, sendo o maior erro encontrado na potência aparente 0,83%.

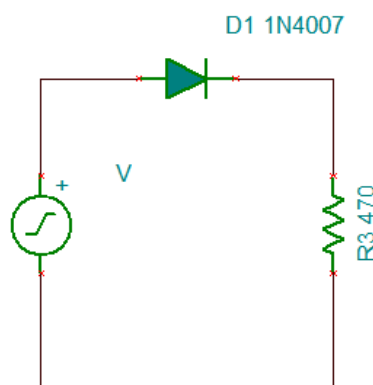
**Tabela 2 - Resultados teórico e simulado de circuito RL monofásico**

	Teórico	Simulado	Erro (%)
FP	0,7994	0,7997	0,16%
Potência ativa	20,4003	20,7191	0,74%
Potência aparente	25,5276	25,9726	0,83%

Fonte: Autoria própria

O terceiro circuito simulado foi o circuito RMMO tem uma carga de 470  $\Omega$ , conforme a Figura 35.

**Figura 35 - Circuito RMMO utilizado para a simulação**



Fonte: Autoria própria

Os resultados da simulação do circuito RC monofásico são apresentados na Tabela 3, sendo o maior erro encontrado no fator de potência 2,36%.

**Tabela 3 – Resultados teórico e simulado de circuito RMMO**

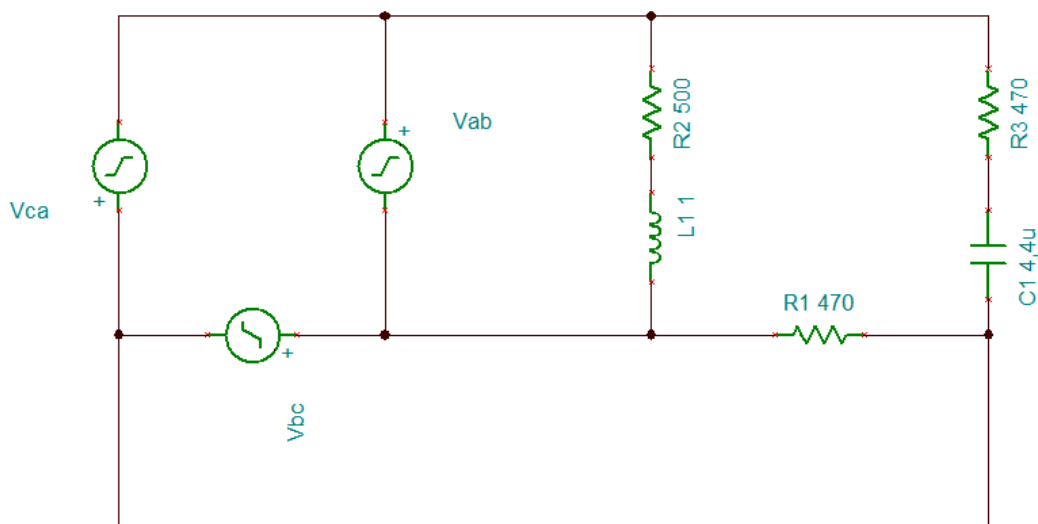
	Teórico	Simulado	Erro (%)
FP	0,7071	0,6908	2,36%
Potência ativa	17,1585	17,1240	0,20%
Potência aparente	24,2657	24,7884	2,11%

Fonte: Autoria própria

Após os testes iniciais do software com circuitos monofásicos o software foi modificado para que seja capaz de realizar as medições em circuitos trifásicos. Foram utilizados para a simulação trifásica a três fios um circuito com a carga ligada em delta e no trifásico a quatro fios uma carga ligada em estrela conforme a Figura 36 e Figura

37. Os valores comparativos teóricos e obtidos via simulação são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5.

**Figura 36 - Circuito trifásico a três fios utilizado para a simulação**



Fonte: Autoria própria

Os resultados da simulação do circuito trifásico a três fios são apresentados na Tabela 4, sendo o maior erro encontrado na potência ativa e na potência aparente 1,59%.

**Tabela 4 - Resultados teórico e simulado de circuito trifásico a três fios**

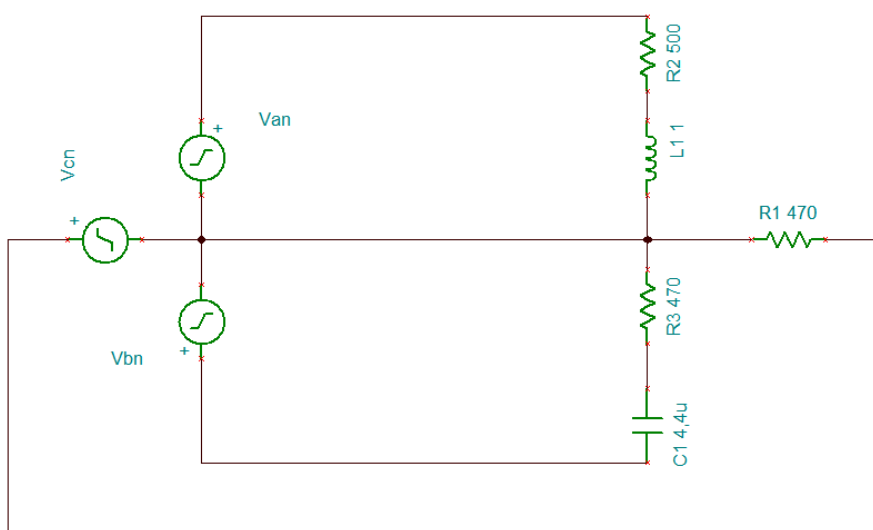
	Teórico	Simulado	Erro (%)
FPab	0,9523	0,9511	0,13%
FPbc	0,5449	0,5431	0,33%
FPca	0,9853	0,9969	1,16%
Potência ativa total	203,5688	205,9898	1,18%
Potência ativa ab	37,9258	37,6771	0,66%
Potência ativa cb	165,6430	168,3126	1,59%
Potência aparente Total	220,7672	222,7649	0,90%
Potência aparente ab	39,8230	39,6118	0,53%
Potência aparente bc	165,8736	168,5522	1,59%
Potência aparente ca	176,6832	177,6761	0,56%

Fonte: Autoria própria

O quinto circuito simulado foi o circuito trifásico a quatro fios tem uma carga em estrela RC, RL e R conforme a Figura 37.



**Figura 37 - Circuito trifásico a quatro fios utilizado para a simulação**



**Fonte: Autoria própria**

Os resultados da simulação do circuito trifásico a três fios são apresentados na Tabela 5, sendo o maior erro encontrado na potência ativa 2,49%.

**Tabela 5 - Resultados teórico e simulado de circuito trifásico a quatro fios**

	Teórico	Simulado	Erro (%)
FPa	0,7984	0,7885	1,26%
FPb	0,6148	0,6150	0,03%
FPc	1,0000	0,9986	0,14%
Potência ativa total	67,8562	67,3384	0,77%
Potência ativa a	20,5662	20,0674	2,49%
Potência ativa b	12,9729	12,8633	0,85%
Potência ativa c	34,3170	34,4076	0,26%
Potência aparente total	81,1737	80,8188	0,44%
Potência aparente a	25,7570	25,4484	1,21%
Potência aparente b	21,0996	20,9151	0,88%
Potência aparente c	34,3170	34,4552	0,40%

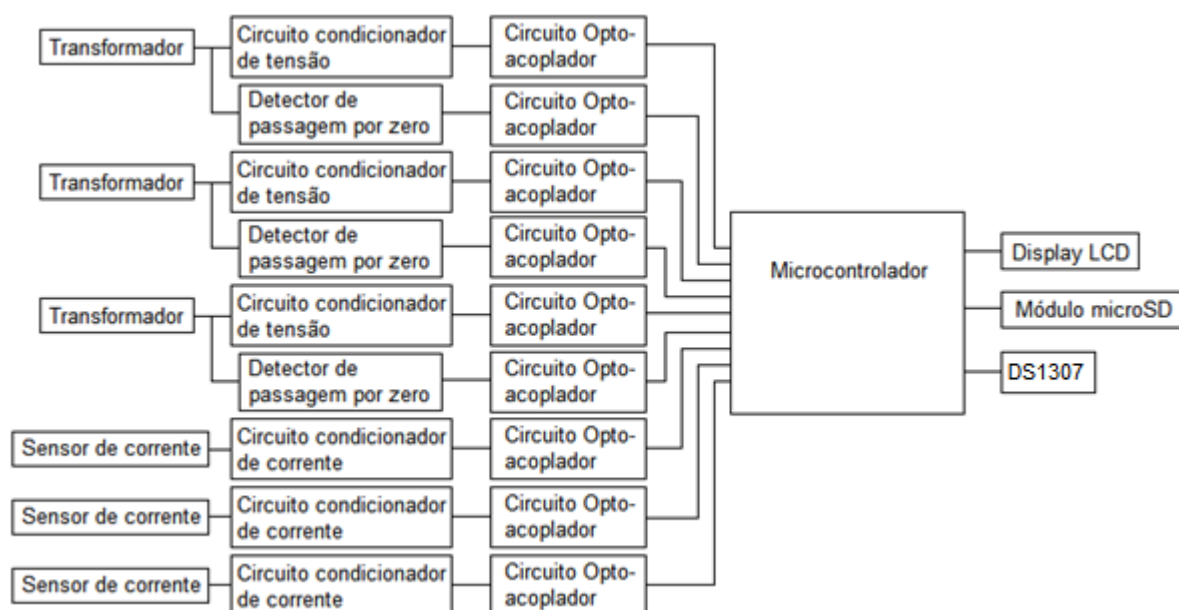
**Fonte: Autoria própria**

O *software* demonstrou-se capaz de realizar os cálculos das variáveis pretendidas, sendo os valores de erro provenientes das limitações da conversão analógico/digital.

### 3.5 HARDWARE

Os circuitos condicionadores dos sinais de tensão e de corrente, bem como proteção e a fonte de tensão, após os testes em *protoboard* foram montados em placa de circuito impresso (PCI). Para que fossem gerados os arquivos para a fabricação da PCI foi utilizado o *software* gratuito EasyEDA. Na Figura 38 é apresentado um diagrama esquemático do circuito desenvolvido.

**Figura 38 - Diagrama de blocos do hardware**

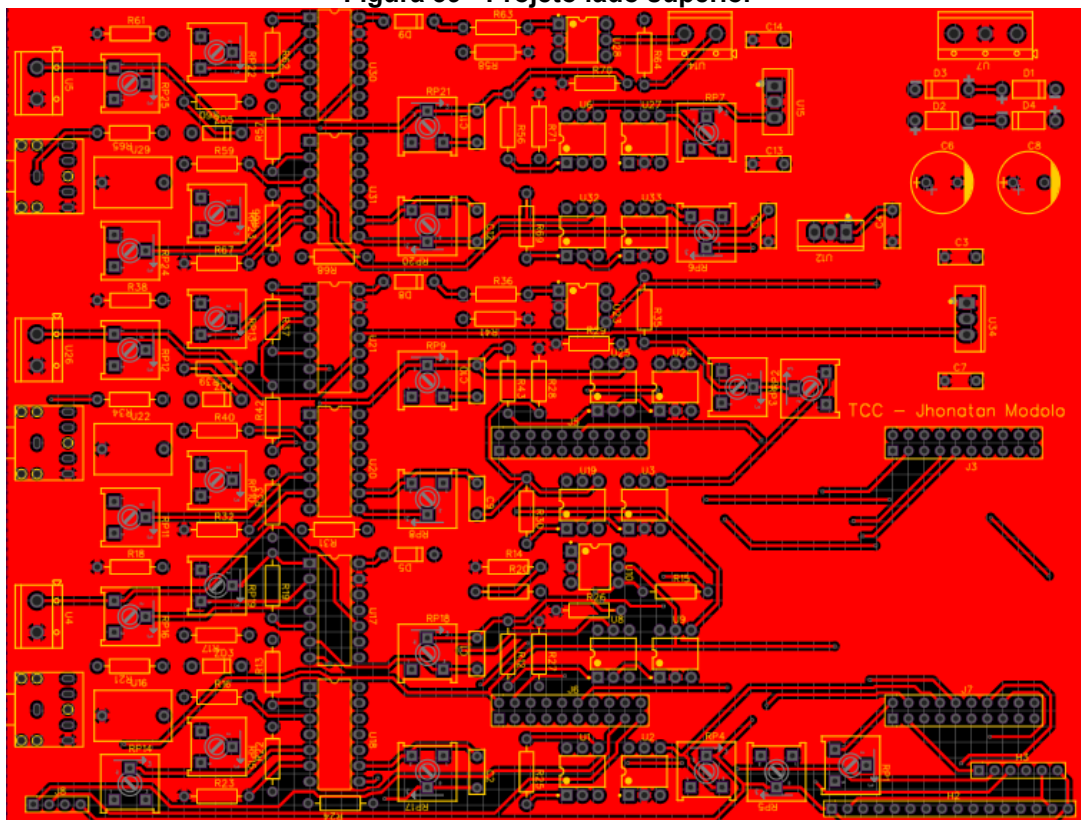


**Fonte: Autoria própria**

Foram gerados arquivos para a fabricação de uma placa dupla face conforme a Figura 39 e a Figura 40. Nela foram posicionados os componentes conforme os circuitos apresentados nas seções 3.1, 3.2 e 3.3 além disto foram utilizados conectores parafusáveis para a conexão dos transformadores a placa e conectores *headers* para a conexão do microcontrolador e dos módulos DS1307 e do cartão SD.

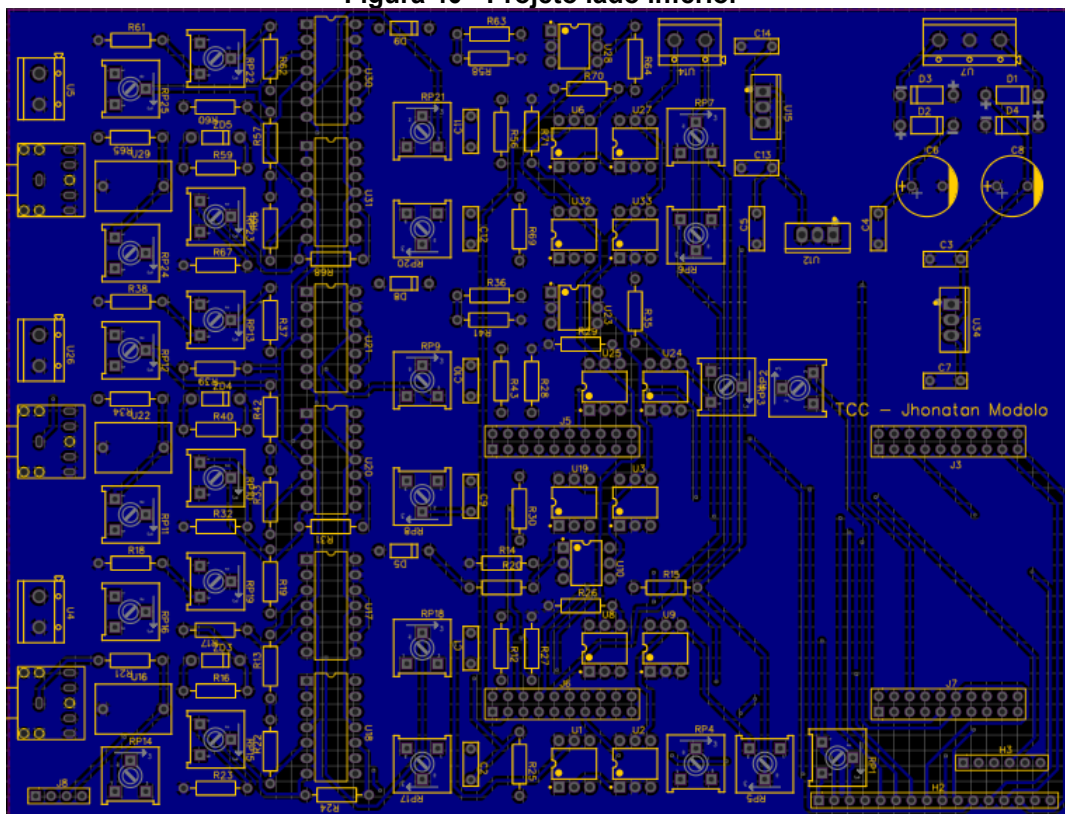
Os arquivos de projeto foram enviados ao laboratório de Fabricação Eletrônica (eFAB) da UTFPR, onde a placa foi produzida. A Figura 41 mostra a fotografia da placa após sua completa montagem.

Figura 39 - Projeto lado superior



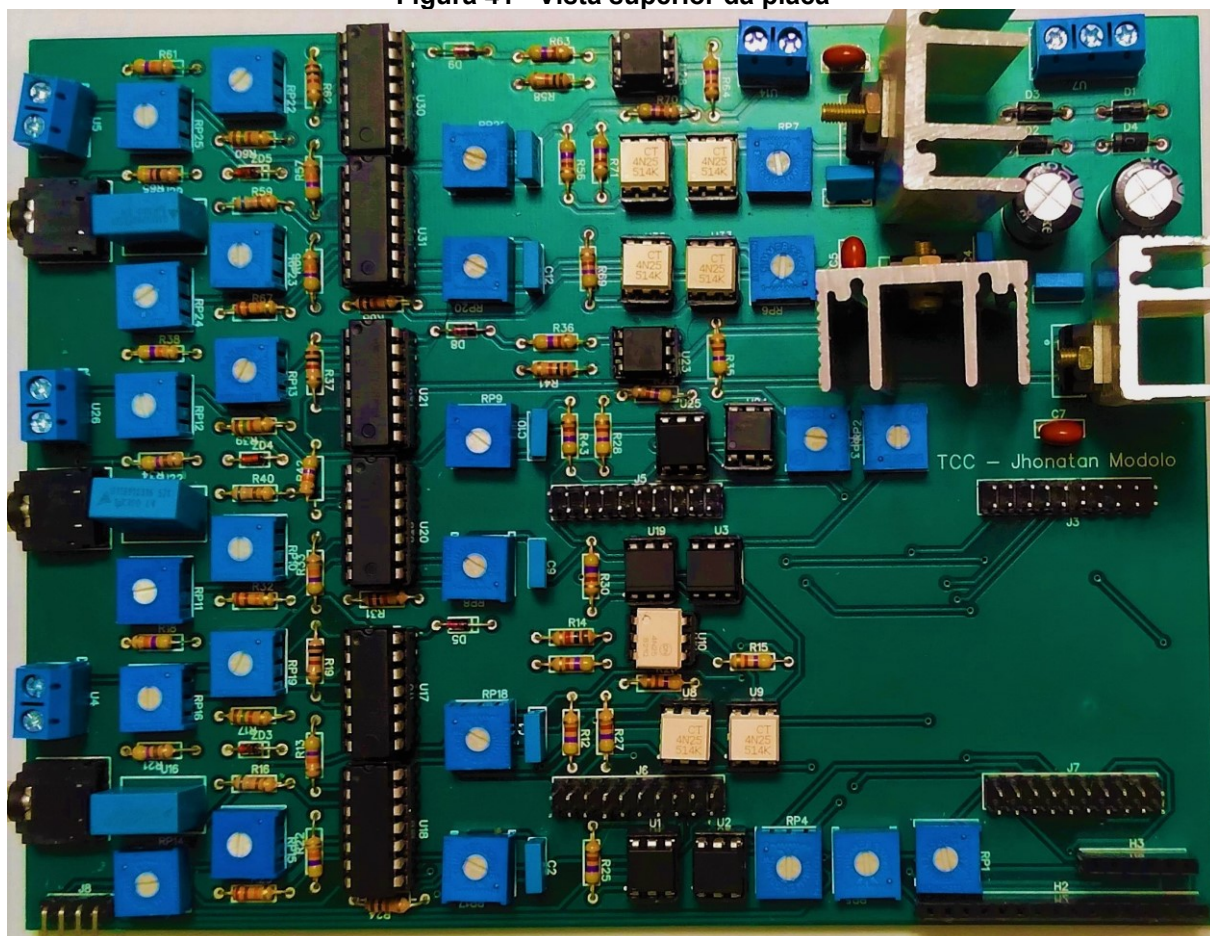
Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Projeto lado inferior



Fonte: Autoria própria

Figura 41 - Vista superior da placa



Fonte: Autoria própria

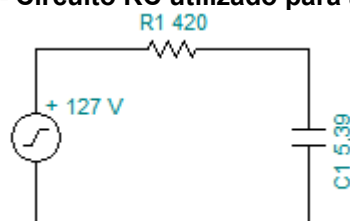
## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS MEDIDOS

Com a placa montada, foram realizados os ajustes das resistências variáveis (*trimpots*). Para tais ajustes, foram necessários instrumentos de bancada tais como osciloscópio e multímetro. Finalmente passou-se então às medições práticas. Foram realizadas medições em cinco circuitos, caracterizando tipos distintos de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas.

### 4.1 CIRCUITO RC MONOFÁSICO

O primeiro circuito em que foram realizadas as medições trata-se de um circuito RC série, onde uma lâmpada representa a carga resistiva, com resistência equivalente de  $420 \Omega$  e uma associação em paralelo de capacitores com capacitância equivalente de  $5,39 \mu\text{F}$ , alimentados pela rede monofásica de  $127 \text{ V}_{\text{ef}}$ , conforme a Figura 42.

Figura 42 - Circuito RC utilizado para a medições



Fonte: Autoria própria

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 6 em comparação com os valores teóricos, o maior erro encontrado foi na potência ativa  $4,92\%$ . A Figura 43 mostra os dados sendo visualizados no display LCD.

Tabela 6 - Resultados teórico e medidos de circuito RC monofásico

	Teórico	Prático	Erro (%)
FP	0,6495	0,6627	1,98%
Potência ativa	16,2006	17,0388	4,92%
Potência aparente	24,9427	25,7115	2,99%

Fonte: Autoria própria



**Figura 43 - Visualização dos dados no display LCD**

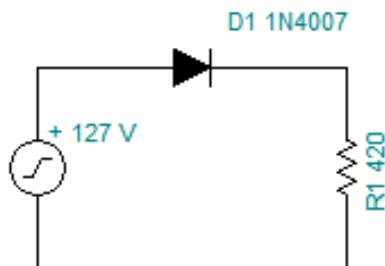


Fonte: Autoria própria

#### 4.2 CIRCUITO RETIFICADOR MONOFÁSICO DE MEIA ONDA

O segundo circuito trata-se de um retificador monofásico de meia onda (RMMO). Nele foram utilizados um diodo 1N4007 e a mesma lâmpada usado no circuito RC série, sendo alimentados pela rede monofásica de 127 V<sub>ef</sub> conforme a Figura 44.

**Figura 44 - Circuito RMMO utilizado para a medições**



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7 em comparação com os respectivos valores teóricos, o maior erro encontrado foi na potência aparente 8,91%.

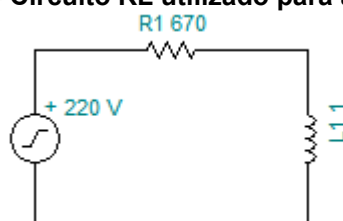
**Tabela 7 - Resultados teórico e medidos de circuito RMMO**

	Teórico	Medido	Erro (%)
FP	0,7071	0,6788	4,17%
Potência ativa	19,2011	20,2360	5,11%
Potência aparente	27,1525	29,8079	8,91%

Fonte: Autoria própria

#### 4.3 CIRCUITO RL BIFÁSICO

O terceiro circuito trata-se de um RL bifásico onde foram utilizados um indutor de 1 H e uma lâmpada com resistência equivalente de 670  $\Omega$ , sendo alimentados pela rede bifásica de 220 V<sub>ef</sub>, conforme a Figura 45.

**Figura 45 - Circuito RL utilizado para a medições**

Fonte: Autoria própria

Os resultados estão apresentados na Tabela 8 em comparação com os valores teóricos, o maior erro encontrado foi na potência ativa 10,27%.

**Tabela 8 - Resultados teórico e medidos de circuito RL bifásico**

	Teórico	Medido	Erro (%)
FP	0,8715	0,8360	5,65%
Potência ativa	54,8676	48,2249	10,27%
Potência aparente	62,9569	57,6805	4,38%

Fonte: Autoria própria

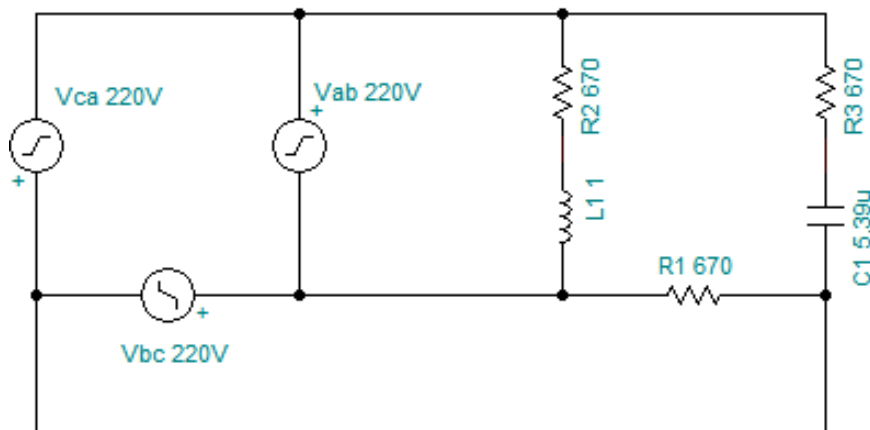
Vale ressaltar a razoável diferença entre os valores teóricos e práticos nesse circuito, provavelmente devido a maior discrepância entre parâmetros reais e teóricos no indutor, devidos a resistência do fio, dentre outros fatores.

#### 4.4 CIRCUITO TRIFÁSICO A TRÊS FIOS

O quarto circuito é trifásico desequilibrado a três fios (Delta). A carga é composta de três lâmpadas com resistência equivalente de 670  $\Omega$ , sendo um indutor

de 1 H em série com uma lâmpada em um dos ramos, uma associação de capacitores com capacitância equivalente de  $5,39 \mu\text{F}$  em série com uma lâmpada em outro ramo e no último ramo somente uma lâmpada, conforme a Figura 46.

**Figura 46 - Circuito trifásico três fios utilizado para a medições**



Fonte: Autoria própria

Os resultados estão apresentados na Tabela 9 em comparação com os valores teóricos, o maior erro encontrado foi no fator de potência 8,47%.

**Tabela 9 - Resultados teórico e medidos de circuito trifásico a três fios**

	Teórico	Medido	Erro (%)
FPab	0,8582	0,8391	2,28%
FPbc	0,6976	0,6431	8,47%
FPca	0,9830	0,9385	4,74%
Potência ativa total	171,2062	175,5694	2,49%
Potência ativa ab	45,6507	47,7548	4,41%
Potência ativa bc	125,5555	127,8146	1,77%
Potência aparente total	185,9378	187,6350	3,49%
Potência aparente ab	55,5216	56,9150	2,45%
Potência aparente bc	127,7237	129,9286	1,70%
Potência aparente ca	130,4162	138,1497	5,60%

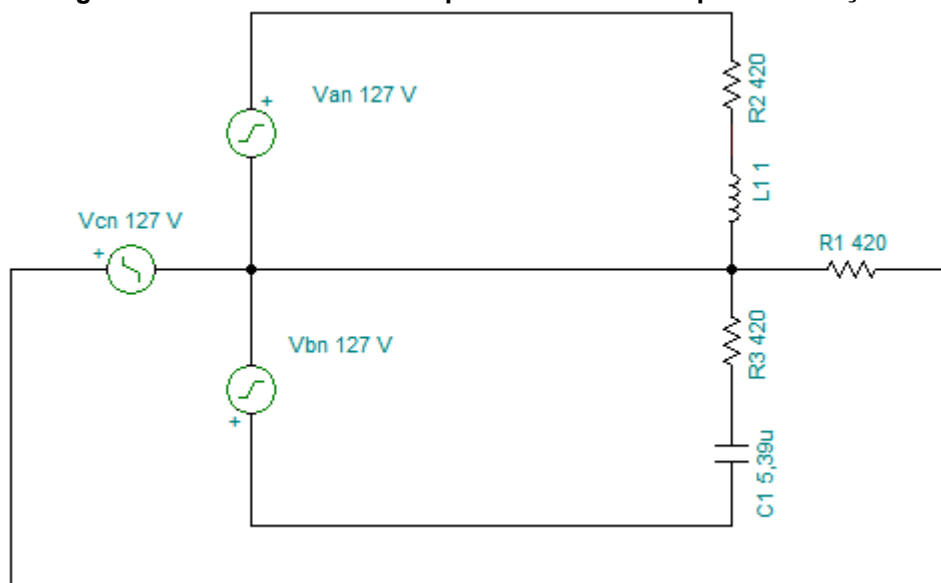
Fonte: Autoria própria

#### 4.5 CIRCUITO TRIFÁSICO A QUATRO FIOS

O quinto circuito é o trifásico a quatro fios (carga trifásica ligada em estrela). A carga é composta pelos mesmos elementos por ramo já descritos na seção 4.4, porém ligada em estrela, conforme mostrado na Figura 47.



**Figura 47 - Circuito trifásico a quatro fios utilizado para a medições**



Fonte: Autoria própria

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 10 em comparação com os valores teóricos, o maior erro encontrado foi na potência aparente 4,56%.

**Tabela 10 - Resultados teórico e medidos de circuito trifásico a quatro fios**

	Teórico	Medido	Erro (%)
FPa	0,7441	0,7208	3,23%
FPb	0,6495	0,6350	2,28%
FPc	1	0,9832	1,71%
Potência ativa total	75,8704	76,9995	1,47%
Potência ativa a	21,2675	21,0851	0,87%
Potência ativa b	16,2006	16,5952	2,38%
Potência ativa c	38,4023	39,3192	2,33%
Potência aparente total	91,9233	95,3799	3,62%
Potência aparente a	28,5783	29,2529	2,31%
Potência aparente b	24,9427	26,1342	4,56%
Potência aparente c	38,4023	39,9928	3,98%

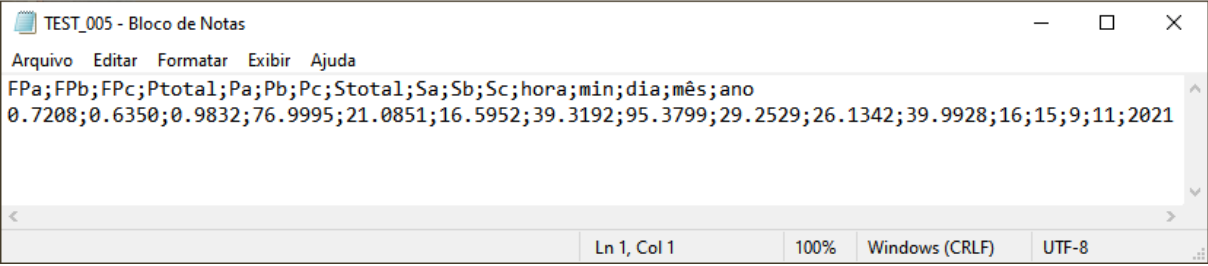
Fonte: Autoria própria

#### 4.6 ARMAZENAMENTO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Os valores calculados foram armazenados em um cartão SD, sendo que o formato escolhido para a gravação dos dados foi o “csv” que facilita a posterior análise em *softwares* de planilhas. Foram gravados os dados do fator de potência, assim

como os dados da potência ativa e da potência aparente. O arquivo gerado pela medição do circuito trifásico de quatro fios pode ser visto na Figura 48.

**Figura 48 - Arquivo de dados gerados**



```
TEST_005 - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
FPa;FPb;FPc;Ptotal;Pa;Pb;Pc;Stotal;Sa;Sb;Sc;hora;min;dia;mês;ano
0.7208;0.6350;0.9832;76.9995;21.0851;16.5952;39.3192;95.3799;29.2529;26.1342;39.9928;16;15;9;11;2021
Ln 1, Col 1  100%  Windows (CRLF)  UTF-8
```

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O dispositivo construído mostrou-se capaz de calcular e armazenar o fator de potência de diferentes tipos de circuitos conforme os objetivos iniciais. O maior erro encontrado na medição do fator de potência chegou a 8,47%. Dois fatores que podem contribuir para estes erros são a baixa precisão do sensor de corrente e possíveis imprecisões no sistema de proteção mesmo sendo utilizado o artifício, apresentado na seção 2.13, para a linearização dos CI's. Mostrou-se também a possibilidade da geração de arquivos com os dados calculados.

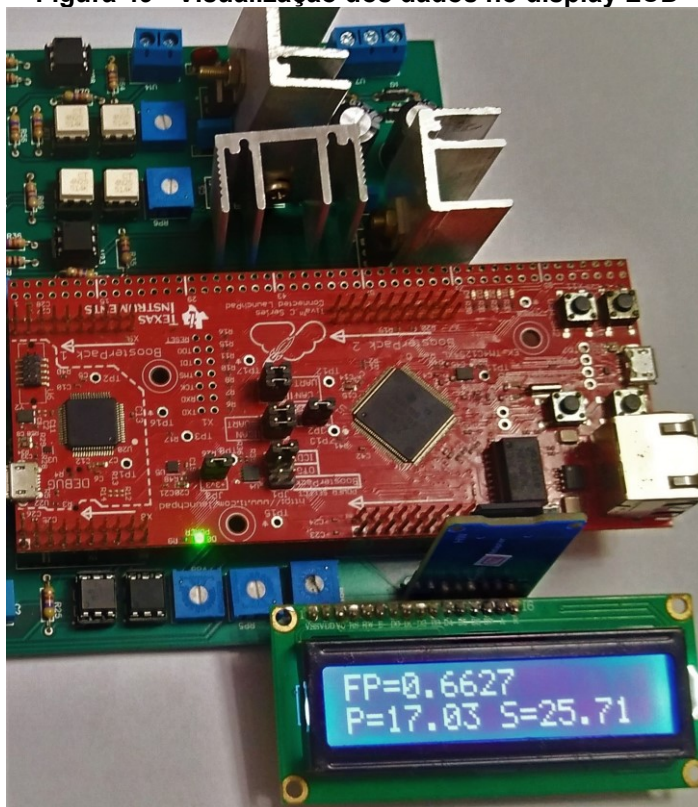
## 5 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho foi a medição do fator de potência, da potência ativa e da potência aparente por meio de amostras de tensão e de corrente em diferentes tipos de circuitos sejam eles monofásicos, bifásicos ou trifásicos.

Mostrou-se possível a utilização de um mesmo *software* para a realização das medidas (sem a necessidade de chave seletora física) de diferentes tipos de circuitos utilizando-se de diferentes entradas de tensão. As medidas apresentaram erros em sua maioria menores que 5% quando comparados aos valores teóricos, porém as maiores discrepâncias, ocorreram no circuito não linear (RMMO) e nos circuitos com ramo RL, monofásico e polifásico. Tais diferenças podem estar ligadas as aproximações utilizadas para o modelo do diodo, as divergências entre o indutor real e o indutor ideal (resistência de fio entre outros fatores) e também as diferenças entre a rede elétrica teórica e prática (diferenças de amplitude entre fases e distorções).

Além disso, realizou-se a gravação dos dados em cartão micro SD em arquivos do tipo “csv” e a visualização dos resultados por meio do display LCD. conforme a Figura 49.

Figura 49 - Visualização dos dados no display LCD



Fonte: Autoria própria

O FP apresentou erro de 5,65% no circuito RL e 4,17% no circuito RMMO, tendo um erro menor no circuito RC 1,98%. Nos circuitos trifásicos o erro foi de 3,23% no circuito a três fios e de 8,47% no a quatro fios. Quanto a potência ativa, o maior erro foi no circuito RL com 10,27%. Um dos fatores que podem ter contribuído é a diferença entre o valor da indutância teórico e pratico do componente usado, bem como possível resistência interna.

O trabalho mostrou-se útil para a aquisição didática de valores de FP e potência ativa e passiva. Para uso em dispositivo de correção de fator de potência seriam necessários alguns aprimoramentos nas técnicas de aquisições e/ou qualidade dos componentes (menor faixa de tolerância) e também no processamento dos dados, porém o trabalho mostrou-se funcional e com precisão e exatidão por volta de 5% de erro.

## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração do projeto novas questões surgiram e algumas delas são listadas para trabalhos futuros:

- Acoplamento de *shield* para a transmissão de dados via *wi-fi* ou *bluetooth*;
- Amostrar mais períodos para obtenção de dados mais robustos;
- Identificação de tipo de carga;
- Medições de taxa de distorção harmônica;
- Transformação em controlador de banco de capacitores;
- Adequar o estudo para controle de descarga, carga e regeneração de bancos de baterias em veículos elétricos.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ANEEL. **Bandeiras tarifárias**. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 10 dez. 2020.

ÁVILA, Sérgio Luciano. **Cálculo numérico aplicado à engenharia elétrica com Matlab**. 1. ed. Florianópolis: IFSC, 2019. Disponível em: [https://www.ifsc.edu.br/documents/30701/523474/livro\\_calculo\\_numerico\\_AVILA\\_final.pdf/73592cec-4ae3-4f43-98ff-5da567c1a60e](https://www.ifsc.edu.br/documents/30701/523474/livro_calculo_numerico_AVILA_final.pdf/73592cec-4ae3-4f43-98ff-5da567c1a60e). Acesso em: 15 jan. 2021.

BELCHIOR, F. N.; BONATTO B. D; BRONZEADO H. S.; CAMARGO, J.; MERTENS, E. A.; J.; SUEMATSU A. K.; AHN S. U.; SOLETTI, K. T. **Medição da qualidade da energia elétrica: Protocolo, Padronização e Certificação**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8. 2009, Blumenau. Disponível em: [http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE\\_VIII\\_2009/web/docs/133.pdf](http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE_VIII_2009/web/docs/133.pdf). Acesso em: 6 de dez. de 2020.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuito**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2012.

CATALEX. **Datasheet HW-125**. 2021. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/Datasheet-MicroSD-Module.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2021.

CELESC. **Normas para instalação de capacitores**. Florianópolis: CELESC, 2002. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/NT02.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2020.

CHAGURY, Michel. **Protótipo para correção de fator de potência em baixa tensão usando Arduino**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/dissertacao/prototipo-para-controle-de-fator-de-potencia-em-baixa-tensao-usando-arduino>. Acesso em: 11 jan. 2021.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COPEL. **Fator de potência**: Em busca da eficiência energética nas instalações elétricas. Curitiba: COPEL, 2020. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator\\_de\\_potencia/\\$FILE/fator\\_potencia.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf). Acesso em: 6 dez. 2020.

DALLAS. **Datasheet DS1307**. 2021. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58481/DALLAS/DS1307.html>. Acesso em: 7 dez. 2021.

DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. **Introdução aos circuitos elétricos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ENERGIA. **Guide to the TM4C129 connected launchpad**: EK-TM4C1294XL. 2021. Disponível em: <https://energia.nu/pinmaps/ek-tm4c1294xl/>. Acesso em: 14 abr. 2021.

G1. **Conta de luz terá cobrança extra a partir desta terça, decide ANEEL**. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/11/30/conta-de-luz-tera-cobranca-extra-a-partir-desta-terca-feira-decide-aneel.ghtml>. Acesso em: 10 dez. 2020.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HIGUTI, Ricardo Tokio. **Amostragem e reconstrução de sinais**. 2021. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/ele1095\\_3\\_amos/tragem.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/ele1095_3_amos/tragem.pdf). Acesso em: 13 jan. 2021.

IRWIN, J. D. **Análise de circuitos em engenharia**. 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.

NASCIMENTO Jr, Geraldo C. do. **Máquinas elétricas**: teoria e ensaios. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

OLIVEIRA, Filipe Dias de. **Monitoramento e análise de afundamentos momentâneos de tensão**. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1045M.PDF>. Acesso em: 8 dez. 2020.

OLIVEIRA, Thiago Ribeiro. **Eletrônica geral**. 2013. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/e/eb/ApostilaEG1.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.

OPPENHEIM, Alan V. WILLSKY, Alan S. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

POMILIO, José A. **Eletrônica de potência**. Campinas: Unicamp, 2014. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/elpot.html>. Acesso em: 8 jan. 2021.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivo e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

RODRIGUES, Cristiano I. C.; SEGUNDO, Alan K. R. **Eletrônica de potência e acionamentos elétricos**. 1. ed. Ouro Preto: IFMG, 2015.

RUIE. **Datasheet RT-LCD162-7**. 2021. Disponível em: [https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet\\_Display\\_16x2.pdf](https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet_Display_16x2.pdf). Acesso em: 7 dez. 2021.

SANTOS, M. L dos. **Avaliação do desempenho de linhas de transmissão de energia elétrica de meia onda**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-12112010-175512/publico/MilanaLSantos.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2020.

SCHNEIDER Electric. **Gerenciamento de energia reativa: capacitores de baixa tensão**. São Paulo: Schneider, 2015. 32 p. Disponível em: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_File\\_Id=1129287856&p\\_File\\_Name=catalogo\\_capacitores\\_2015.pdf](https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=1129287856&p_File_Name=catalogo_capacitores_2015.pdf). Acesso em: 7 jan. 2021.

SIENA, Osmar. **Metodologia da pesquisa científica: elementos para a elaboração e apresentação de trabalhos**. Porto Velho: UNIR, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **User's guide**: EK-TM4C1294XL. Dallas: Texas, 2017. 42p. Disponível em:  
[https://www.ti.com/lit/ug/spmu365c/spmu365c.pdf?ts=1618294697562&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ug/spmu365c/spmu365c.pdf?ts=1618294697562&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). Acesso em: 14 abr. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet LM7800**. Dallas: Texas, 2016. 34p. Disponível em: <https://www.ti.com/document-viewer/LM7800/datasheet/thermal-information-snosbt07606#SNOSBT07606>. Acesso em: 14 abr. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **EK-TM4C1294XL**. 2021. Disponível em:  
<https://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL#related-design-resources>. Acesso em: 14 abr. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **TINA-TI**. 2020. Disponível em:  
<https://www.ti.com/tool/TINA-TI>. Acesso em: 7 dez. 2021.

WENDLING JR., J. M. A. **Amplificadores operacionais**. Guaratinguetá: UNESP, 2010. Disponível em:  
<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2021.

WEG. **Manual para a correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul: WEG 2009. 40 p. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2020.

WILHELM, Volmir Eugenio. **Análise numérica**: notas de aula. Curitiba: UFPR, 2017. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~volmir/MNE707.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

YHDC. **Datasheet SCT-013-020**. Disponível em:  
<https://datasheetspdf.com/datasheet/SCT-013-020.html>. Acesso em: 16 jan. 2021.