

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE  
MINAS GERAIS**  
*CAMPUS DIVINÓPOLIS*  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Guilherme de Moraes Bessa

**Desenvolvimento de Sistema de Aquisição de Dados de  
Ponteiras de Medição de Corrente com controle de Ganhos  
de Conversão**

Divinópolis.  
2019.

Guilherme de Morais Bessa

Desenvolvimento de Sistema de Aquisição de Dados de  
Ponteiras de Medição de Corrente com controle de Ganhos de  
Conversão

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Colegiado de Graduação em  
Engenharia Mecatrônica como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de  
Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Eletrônica e Controle

Orientador: Prof. Doutor Claudio Henrique  
Gomes dos Santos

Divinópolis.  
2019.

## AGRADECIMENTOS

a Deus primeiramente e prioritariamente, por me prover todos os dias forças para me levantar e encarar todos os meus desafios;

aos meus familiares, que me forneceram as condições necessárias para a realização de minha graduação;

a meus amigos queridos, que se fizeram presentes em minha caminhada, por me ajudarem a crescer como pessoa e por todos os sorrisos que vocês me proporcionaram;

a meu orientador Claudio Henrique Gomes dos Santos, por sempre se mostrar solícito e presente e

a meu saudoso avô João Alves da Silva, um homem tão simples quanto seu nome. Obrigado por me mostrar o valor que as coisas simples da vida possuem. Essa é para você....

*“Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”*

*Rocky Balboa*

## RESUMO

O trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de uma ponteira de medição de corrente elétrica através de um condicionador eletrônico com controle de ganho de conversão auto-calibrável por um sistema automático. O intuito do desenvolvimento do projeto é controlar, para diferentes níveis escalares de corrente elétrica, o fator de conversão do sistema aferido, sem a necessidade da troca de ponteira de medição ou intervenção física no circuito eletrônico. Tal ação confere à grandeza mensurada maior resolução de medida se comparada a uma medição comum, para um mesmo alcance de aferição, o que a qualifica mais a ser empregada em análises de qualidade de energia. Correntes harmônicas presentes em redes de distribuição deformam a onda fundamental da corrente. Um ganho em resolução de medida em equipamentos comuns facilita a identificação dessas anomalias indesejadas, pela deformação de amplitude, o que valida a intervenção de elementos atuadores diretos no controle da qualidade de energia na rede analisada. O sistema será composto de um circuito que receberá dados de uma ponteira de medição eletrônica, com um estágio condicionador, que transmitirá a unidade medida para o circuito principal, em grandeza adequada. Atuará no controle do ganho do circuito condicionador principal um atuador eletrônico. Esse dispositivo controlará o nível escalar do sinal medido a fim de transmiti-lo ao microcontrolador do sistema numa faixa de boa leitura, tal como faz a função *Auto SET* em leituras com osciloscópio. No microcontrolador será desenvolvido e embarcado um código para o controle do dispositivo, o qual receberá o sinal sensoriado, executará a comparação com a referência ótima definida e acionar as saídas do atuador, fechando a malha de controle do sistema. Além desse sistema principal, será desenvolvido uma interface com o usuário que possibilitará a visualização do valor escalar do sinal medido, bem como informações adicionais do estado do estágio de conversão. Espera-se com o desenvolvimento desse projeto a capacidade de auxiliar no monitoramento de variações inesperadas de corrente, de qualquer grandeza, sem a necessidade de interferência humana para ajustes de escala de leitura, uma vez que necessitaria de atenção constante de um operador ou da aquisição de dispositivos sofisticados e de custo elevado como analisadores de qualidade de energia.

**Palavras-chave:** Controle de ganho, Autocalibração, Resolução, qualidade de energia.

## ABSTRACT

The work consists in the development of a data acquisition system of an electric current measuring tip through an electronic conditioner with self-calibrating conversion gain control by an automatic system. The purpose of the project development is to control, for different scalar levels of electric current, the conversion factor of the calibrated system, without the need of changing the measuring tip or physical intervention in the electronic circuit. This action gives measured magnitude greater measurement resolution when compared to a common measurement, for the same calibration range, which qualifies it more to be used in energy quality analyzes. Harmonic currents present in distribution networks deform the fundamental wave of the current. A gain in measurement resolution in common equipment facilitates the identification of these unwanted anomalies by the amplitude deformation, which validates the intervention of direct actuators in the control of the power quality in the analyzed network. The system will consist of a circuit that will receive data from an electronic measuring tip with a conditioner stage, which will transmit the unit measured to the main circuit in a suitable magnitude. An electronic actuator will act on the gain control of the main conditioner circuit. This device will control the scaled level of the measured signal in order to transmit it to the microcontroller of the system in a good read range, as does the Auto SET function on oscilloscope readings. In the microcontroller will be developed and shipped a code for the control of the device, which will receive the sensed signal, perform the comparison with the defined optimal reference and actuate the outputs of the actuator, closing the system control loop. In addition to this main system, a user interface will be developed that will allow visualization of the scalar value of the measured signal as well as additional information on the state of the conversion stage. The development of this project is expected to be capable of assisting in the monitoring of unexpected current variations of any magnitude without the need for human interference for read-scale adjustments since it would require constant attention from an operator or from the acquisition of sophisticated and cost-effective devices such as power quality analyzers.

**Keywords:** gain control, self-calibration, resolution, power quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluke 435-II Power Quality. (FLUKE, 2018).....	4
Figura 2 - Alteração em uma forma de tensão. (PRÓPRIO AUTOR).....	6
Figura 3 - Sinal fundamental superposto à harmônicos ímpares. (DUGAN et al., 2004).....	8
Figura 4 - Comparativo entre a fundamental e onda com DTH = 57.28%. (ROLIM, 2015).....	9
Figura 5 - Sag na tensão de rede. (DIAS, 2002).....	10
Figura 6 - S $\acute{w}$ ee/ na tensão de rede. (DIAS, 2002).....	11
Figura 7 – Interrupção na tensão de rede. (DIAS, 2002).....	11
Figura 8 - Exemplo de Onda com Cintilação. (SINUS, 2013).....	12
Figura 9 - Transitório Impulsivo por descarga elétrica. (DUGAN et al., 2004).....	13
Figura 10 - Transitório Oscilatório de Baixa Frequência advindo de energização de Banco de Capacitores. (DUGAN et al., 2004).....	14
Figura 11 - Transitório oscilatório de corrente causado por chaveamento de banco de capacitores.(DUGAN et al., 2004).....	14
Figura 12 - Exemplo de Microcontrolador. (MICROCHIP, 2018).....	15
Figura 13 - Ampop básico. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).....	16
Figura 14 – Configuração Inversora. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).....	17
Figura 15 - Configuração Não Inversora. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)....	18
Figura 16 - Seguidor de Tensão. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).....	19
Figura 17 - Amplificador de diferença ou Subtratora. (PRÓPRIO AUTOR).....	19
Figura 18 - Amplificador de Instrumentação. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013) .....	21
Figura 19 - Diagrama de Bode de um sensor. (FUENTES, 2005).....	23
Figura 20 - Resistor Shunt. (EBAY, 2018).....	24
Figura 21 - Regra da Mão Direita. (MUSSOI, 2007).....	25
Figura 22 - Diagrama conceitual do Transformador de Corrente. (CHAVES, 2008) .....	26
Figura 23 - Transformador de Corrente. (MYELECTRICAL, 2018).....	27
Figura 24 - Princípio <i>hall</i> sem campo magnético. (HONEYWELL, 2010).....	28
Figura 25 - Princípio <i>hall</i> com campo magnético. (HONEYWELL, 2010).....	28

Figura 26 - Sensor <i>Hall</i> ACS712.(COMMUNICA, 2018)	Figura 27 - Sensor <i>Hall</i> LA55P.(LEM, 2018) .....	29
Figura 28 – Projeto Simples de uma Bobina de Rogowski. (PINHEIRO, 2011) ....		30
Figura 29 - Integrador aplicado à bobina de Rogowski. (WIKIPÉDIA, 2018) .....		31
Figura 30 – Organização do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR).....		33
Figura 31 - Arduino <i>UNO</i> . (EMBARCADOS, 2013).....		35
Figura 32 - Pinos e Sentido de Uso do Dispositivo.(TAMBARA; FLORA; GRÜNDLING, 2015) .....		38
Figura 33 - Circuito Condicionador Projetado. (PRÓPRIO AUTOR) .....		39
Figura 34 - Placa do Circuito Projetado. (PRÓPRIO AUTOR) .....		39
Figura 35 - Projeto Desenvolvido. (PRÓPRIO AUTOR).....		40
Figura 36 - Potenciômetro Digital X9C103.(ALIBABA, 2019).....		41
Figura 37 - Pinagem do X9C103.(RENESAS, 2019) .....		41
Figura 38 - Diagrama Interno X9C103.(RENESAS, 2019).....		42
Figura 39 - Configurações do Dispositivo.(RENESAS, 2019) .....		43
Figura 40 - Módulo Potenciômetro Digital X9C103.(SOLTAU, 2018).....		43
Figura 41 - Topologia Subtratora. (PRÓPRIO AUTOR) .....		44
Figura 42 - Potenciômetros Digitais no Circuito de Amplificação. (PRÓPRIO AUTOR) .....		45
Figura 43 - Resposta em Frequência do TL071.(TEXAS INSTRUMENTS, 2017)		46
Figura 44 - Circuito com Isolamento das Entradas. (PRÓPRIO AUTOR) .....		47
Figura 45 - Circuito Amplificador de Instrumentação Desenvolvido. (PRÓPRIO AUTOR) .....		48
Figura 46 - Circuito com <i>Offset</i> . (PRÓPRIO AUTOR) .....		51
Figura 47 - Proteção para o microcontrolador. (PRÓPRIO AUTOR) .....		52
Figura 48 - Fonte de Alimentação. (PRÓPRIO AUTOR).....		53
Figura 49 - Circuito Finalizado. (PRÓPRIO AUTOR) .....		54
Figura 50 - Placa de Circuito Projetada. (PRÓPRIO AUTOR) .....		55
Figura 51 - Transferência térmica para a placa de Cobre. (PRÓPRIO AUTOR)...		55
Figura 52 - Placa Corroída e Estanhada. (PRÓPRIO AUTOR).....		56
Figura 53 - Placa do Circuito Amplificador Finalizada. (PRÓPRIO AUTOR) .....		57
Figura 54 - Display LCD e Módulo <i>I2C</i> . (PRÓPRIO AUTOR) .....		58
Figura 55 - Dispositivo Interconectado. (PRÓPRIO AUTOR) .....		59
Figura 56 - Amostragem do Sinal. (PRÓPRIO AUTOR) .....		60
Figura 57 - Circuito de Teste Projetado. (PRÓPRIO AUTOR).....		61



Figura 58 - Circuito de Testes. (PRÓPRIO AUTOR).....	62
Figura 59 – Aferição 1 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR) ..	63
Figura 60 - Aferição 2 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR) ...	64
Figura 61 - Aferição 3 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR) ...	64
Figura 62 - Resposta do dispositivo em malha fechada. (PRÓPRIO AUTOR) .....	66
Figura 63 - Módulos de Tempo e Gravação para Arduino. (ELETROGATE, 2019) .....	68
Figura 64 - Plataforma de desenvolvimento ESP32.(FILIPEFLOP, 2018) .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Projeto. ....	34
Tabela 2 - Valores Assumidos pelo Potenciômetro Digital.....	49
Tabela 3 - Ganhos Possíveis do Dispositivo.....	49

## LISTA DE ACRÔNIMOS

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<i>rms</i>	<i>root mean square</i>
<i>IoT</i>	Internet of Things
Hz	Hertz
DTH	Distorção Harmônica Total
DTI	Distorção Harmônica Individual
<i>pu</i>	por unidade
V	Tensão Elétrica / Volts
i	Corrente Elétrica
A	Ampère
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
Ampop / AOP	Amplificador Operacional
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
GPIO	General Purpose Input Output
ADC	Analog to Digital Converter
( - )	Entrada Inversora de ampop
( + )	Entrada não inversora de ampop
$V_o$	Tensão de saída de ampop
$V_i$	Tensão de entrada de ampop
$R_1$	Resistência de entrada de tensão no ampop
$R_f$	Resistência de feedback do ampop
<i>PWM</i>	Modulação por Largura de Pulso
GND	Referencial nulo (Terra/Ground)
Tc	Transformador de Corrente
$B$	Campo Magnético

# SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1- Definição do Problema .....	1
1.2- Motivação .....	1
1.3- Objetivo Geral .....	2
1.4- Objetivos Específicos .....	2
1.5- Estado da Arte.....	3
1.6- Escopo do Trabalho .....	5
2- REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1- Qualidade de Energia Elétrica .....	6
2.1.1- Harmônicos e Inter-harmônicos.....	8
2.1.2 - Distorção Harmônica Total .....	8
2.1.3- Variação na Tensão Nominal de Rede .....	10
2.1.4- Flicker .....	11
2.1.5- Transitórios .....	12
2.2- Microprocessadores e Microcontroladores.....	15
2.3- Amplificadores Operacionais.....	16
2.3.1- Amplificador Inversor .....	17
2.3.2- Amplificador não inversor .....	18
2.3.3- Amplificador seguidor de tensão ( <i>buffer</i> ) .....	18
2.3.4 – Amplificador de Diferença ou Subtrator .....	19
2.3.5 – Amplificador de Instrumentação.....	21
2.4- Medidores de Corrente elétrica .....	22
2.4.1- Medição de corrente por Resistor Shunt.....	23
2.4.2- Medição de Corrente com Transformadores de Corrente.....	24
2.4.3- Medição de Corrente por Efeito Hall.....	27
2.4.4- Medidores por Bobina de Rogowski .....	29
3- DESENVOLVIMENTO .....	32
3.1- Descrição do sistema .....	32
3.2 - Definição das faixas de aplicação do dispositivo.....	33

3.3 - Definição do Microcontrolador do Dispositivo .....	34
3.3.1 - Arduino <i>UNO</i> .....	35
3.4 - Definição do Sensor de corrente .....	36
3.4.1 - Características e Funcionamento do Sensor .....	37
3.5 - Circuito Conversor.....	38
3.6 - Circuito Amplificador.....	40
3.6.1 - Definição do Atuador do Circuito .....	40
3.6.2 - Potenciômetro Digital X9C103.....	41
3.6.3 – Projeto do Circuito.....	44
3.6.4 – Ganhos do Circuito Projetado .....	48
3.6.5 - Proteções no Circuito Amplificador .....	50
3.7- Alimentação do Dispositivo .....	52
3.8 – Projeto da Placa do Circuito .....	53
3.9 – Interação com o usuário. ....	57
3.10 – Integração do Dispositivo. ....	58
4- RESULTADOS.....	61
5- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	67
5.1 – Conclusões.....	67
5.2 – Propostas de Continuidade .....	68
5.2.1 – Armazenamento dos Valores de Corrente .....	68
5.2.2 – Remoção dos dados do Dispositivo .....	68
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXOS .....	74
Anexo 1 – Código embarcado no Microcontrolador.....	74

# 1- INTRODUÇÃO

O termo qualidade de energia elétrica, abreviada como QEE, se tornou uma expressão usual no setor elétrico ultimamente. Tem sido usado para expressar as mais diversas características da energia elétrica fornecida por concessionárias aos consumidores (DECKMANN; POMILIO, 2010). Em termos gerais, esta designação compreende a qualidade das formas de onda da tensão e corrente elétricas em um sistema elétrico (MENDES et al., 2015).

A qualidade de energia é uma área bastante ampla e interdisciplinar. Devido à ampla abrangência, foi notada a necessidade de regulamentação da QEE, o que foi feito pela ANEEL. O ato especifica os principais distúrbios englobados pela regência da qualidade da energia elétrica, dentre eles o afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupções temporárias e sustentadas e distorção harmônica (ANEEL, 2018).

As distorções harmônicas são sinais periódicos e senoidais que se associam a um sinal também senoidal de amplitude maior e com uma frequência fundamental. Pelo conceito de Linearidade e Superposição (ROLIM, 2015), a contribuição dos sinais harmônicos não é desprezível, tornando o sinal distorcido, e com incremento nos valores de pico, médio e *rms*, os quais são mensurados por medidores de corrente elétrica. De diversas formas, os harmônicos podem afetar uma instalação e os equipamentos nela instalados.

## 1.1- Definição do Problema

O problema abordado nesse trabalho é a limitação que equipamentos de medição de corrente possuem para grandes variações escalares e a importância que um sinal de boa resolução possui na identificação de distorções de corrente.

## 1.2- Motivação

A motivação do trabalho resulta do desejo da implementação de um sistema eletrônico que, de forma sucinta, desempenhasse aplicações robustas como aferição de correntes elétricas de diversos valores escalares e que fosse, de certa forma, economicamente viável e implementável. Com a apresentação do problema, já descrita, ocorreu o interesse de investigação na área e na aplicação

de um sistema para identificação desse problema que envolvesse a aplicação eletrônica e viabilidade de desenvolvimento.

### **1.3- Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema de aquisição de dados de medição de corrente elétrica auto-calibrável que aumente a resolução de medida da grandeza através de controle do ganho de amplificação.

### **1.4- Objetivos Específicos**

- Analisar sensores primários de corrente e definir o sensor mais hábil para a aplicação;
- Projetar e construir um circuito de aquisição de dados de elementos primários de detecção de corrente elétrica;
- Projetar e construir um circuito amplificador que condicionará o sinal aferido convertendo-o em valores de boa resolução para leitura em microcontrolador;
- Projetar e desenvolver placas eletrônicas para os circuitos;
- Projetar um código de controle para receber os dados do circuito amplificador e autocalibrar o ganho desse circuito;
- Projetar, Programar e Desenvolver uma interface de comunicação visual do processo com o usuário;
- Testar o dispositivo em linhas com presença de equipamentos geradores de distúrbios de corrente.

## 1.5- Estado da Arte

Atualmente, diversos trabalhos de pesquisa investigam a influência de variações de corrente em redes de distribuição de energia elétrica, principalmente voltados à otimização e correção da energia presente nas linhas. Essas pesquisas são amparadas por modernos dispositivos que investigam e detectam diversos parâmetros da onda fornecida pelas concessionárias, como as deformações advindas de harmônicos, os analisadores de qualidade de energia elétrica.

No mercado atual, destacam-se no segmento equipamentos modernos que conseguem integrar em um só dispositivo as ferramentas necessárias para a realização da análise de qualidade, como o Dispositivo Fluke 435 Serie II. Este equipamento e seus demais acessórios capturam e armazenam em tempo real tanto as formas de onda de Corrente e Tensão elétrica, quanto seus parâmetros de amplitude, fase, frequência e as variações periódicas, caracterizadas pelas ondas harmônicas. O dispositivo além de realizar manutenção preditiva, detecta e previne problemas relacionados aos parâmetros analisados antes de causarem interrupções nas operações onde o analisador foi instalado; análises e previsões à longo prazo e estudos de carga, como prevê sua folha de dados (FLUKE, 2018).

O medidor também é capaz de analisar correntes com grandes variações escalares, de 0 à 6000A, desde que alteradas suas pinças de aferição, as quais acompanham o conjunto. Tal tecnologia possui custo elevado ao solicitante, que pode desembolsar em torno de R\$ 65.000,00, como levantado em fevereiro de 2018, para a aquisição do equipamento, o que torna comum no meio a prática do aluguel do analisador. Um equipamento como o mencionado pode ser visualizado na figura 1.

Assim como o modelo apresentado acima, diversas fabricantes como a Minipa e seu equipamento ET-5061C propõe soluções inovadoras e tecnológicas para a detecção de problemas elétricos (MINIPA, 2018). Ambos os equipamentos se caracterizam por possuir grande faixa de atuação, mas ainda necessitam de trocas das ponteiros de aferição quando a corrente medida é muito elevada ou possui valores baixos.





Figura 1 - Fluke 435-II Power Quality. (FLUKE, 2018)

A adequação das ponteiros bem como a análise e manuseio dos equipamentos são realizados por especialistas que se deslocam às linhas analisadas para verificar e coletar os dados obtidos das medições. Com o avanço da *IoT*, descrito em Siow et al., (2018), ações de automação e intercomunicação tem sido implementadas a fim de obter esses parâmetros em tempo real e possibilitar a redução do tempo de análise humano, tornando todas as decisões de intervenção mais homogêneas, focando na qualidade de experiência do usuário através de softwares (ROCHA et al., 2017).

Além de ações como a citada, a tentativa de automatização da detecção das falhas presentes em redes elétricas, como as distorções harmônicas, está em constante crescente. Um dos métodos analisados pela academia trata da previsão de harmônicos de corrente de carga injetados em sistemas de energia (HATATA; ELADAWY, 2015). O estudo realizado em micro redes de energia, utiliza redes neurais não lineares de regressão automática com entrada exógena, a qual propõe a modelagem das não linearidades de cargas elétricas. A rede é treinada usando dados obtidos de medições de campo e se mostrou rápida e preciso em relações a otimizações computacionais anteriores.

## 1.6- Escopo do Trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, de forma a oferecer um entendimento lógico e organizado do objeto de estudo.

- Capítulo 1 – composto por introdução ao assunto, com contextualização, motivação, definição do problema, objetivos de desenvolvimento e o estado da arte;
- Capítulo 2 – Apresenta a base de conhecimento necessária, disposto em uma revisão da literatura, bem como os conhecimentos teóricos a serem aplicados no projeto proposto;
- Capítulo 3 – Trata da metodologia a ser utilizada no projeto, desenvolvimento e confecção do dispositivo;
- Capítulo 4 – Apresenta resultados obtidos referentes a testes desenvolvidos nos circuitos projetados e
- Capítulo 5 – Considerações finais do trabalho apresentando conclusão e propostas de continuidade.

## 2- REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1- Qualidade de Energia Elétrica

De acordo com Rolim, (2015), a qualidade de energia elétrica, representada pela sigla *QEE* está correlacionada a garantia e manutenção dos padrões e níveis de tensão e corrente adequadas para o suprimento dos mais diversos setores da economia, principalmente a indústria. A *QEE*, em síntese, pode ser atrelada a uma medida de excelência do produto Energia Elétrica. O termo começou a ser discutido e trabalhado, como em Simões e Pereira, (1989), quando se foi observada a alteração que os níveis de tensão e corrente em equipamentos industriais sofriam quando expostos a distorções indesejadas, advindas da própria linha de alimentação. A figura 2 abaixo demonstra uma alteração de nível de tensão causada por distorções indesejadas em uma linha de alimentação.

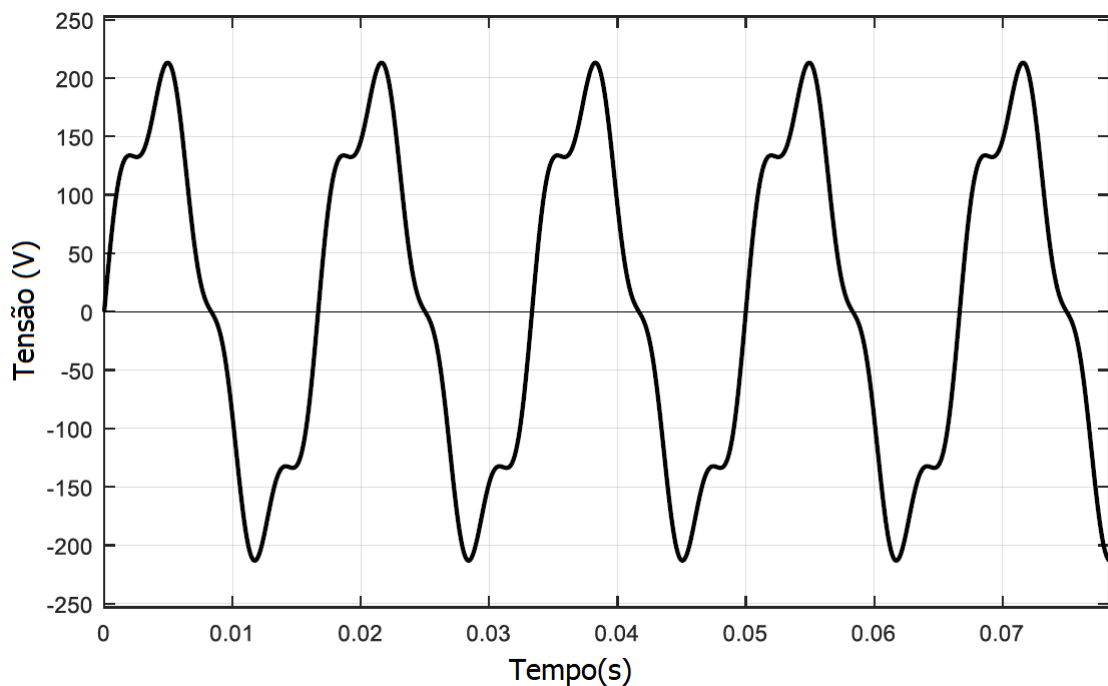


Figura 2 - Alteração em uma forma de tensão. (PRÓPRIO AUTOR)

Em tempos passados, como descreve Bucci et al., (2001), a qualidade de energia não era uma preocupação para consumidores do produto das concessionárias, uma vez que seus efeitos pouco afetavam as cargas, as quais comumente eram caracterizadas por motores de indução. Tal preocupação é recorrência atual devido à exposição dos sistemas de potência a inúmeras formas

e níveis de distorções que deterioram a qualidade de fornecimento. Neste contexto, destaca-se o desenvolvimento e uso de inversores de frequência e conversores de acionamento de grandes cargas, as quais cada vez mais drenam corrente de elevado conteúdo harmônico na linha, advindo do seu caráter não linear.

Concomitante a ascensão da demanda acima descrita, caracterizada por ações poluidoras de rede, ocorreu grande avanço nos sistemas microprocessadores, presentes de forma maçante em todos os contextos elétricos atuais. Esses sistemas são categorizados por sua estabilidade e são sensíveis as perturbações presentes na rede elétrica.

Como consequência aos aumentos apresentados, a *QEE* vem problematizando a necessidade cada vez maior do fornecimento elétrico com a sensibilidade demandada. Para tanto, ela requer constante monitoramento, tanto para a investigação de problemas quanto a avaliação de soluções. Isso só se faz possível através de equipamentos que possuem capacidade de relatar o comportamento completo da rede elétrica.

Equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica, ainda segundo Koizumi, (2012), são equipamentos sofisticados que se assemelham a osciloscópios digitais portáteis, baseados no princípio da aferição das grandezas da rede elétrica, a qual a investigação deste trabalho abordará, e possibilitam a geração de relatórios da rede no momento da medição ou a gravação desses dados para análises e relatos posteriores.

Com o diagnóstico acusado pelos analisadores da *QEE*, é possível identificar e atuar nos problemas e causas de distorções presentes na rede analisada. Descrita a problematização e atuação da qualidade de energia elétrica, os sub tópicos seguintes tratam dos fundamentos analisados e conceituados pelas análises de *QEE* e o tópico subsequente traz de forma detalhada um dos princípios dos analisadores apresentados que consiste na aferição de corrente, a qual possui aplicações muito anteriores ao dispositivo relatado e que será enfoque deste trabalho.

### 2.1.1- Harmônicos e Inter-harmônicos

Segundo Koizumi, (2012), os harmônicos são sinais periódicos e de comportamento senoidal com seus componentes múltiplos inteiros da frequência fundamental, 50 ou 60Hz usualmente.

Os sinais Inter-harmônicos são sinais que apresentam frequências entre as frequências harmônicas, não sendo múltiplas da frequência fundamental. O resultado da associação dessas frequências com a fundamental provoca a distorção do sinal inicial de tensão e corrente.

Na figura 3 pode ser visualizada uma onda senoidal superposta de harmônicos de ordem ímpares. As distorções harmônicas se originam da utilização de cargas ou dispositivos não lineares e são resultantes da queda de tensão advinda das correntes não lineares que circulam sobre as impedâncias do sistema.

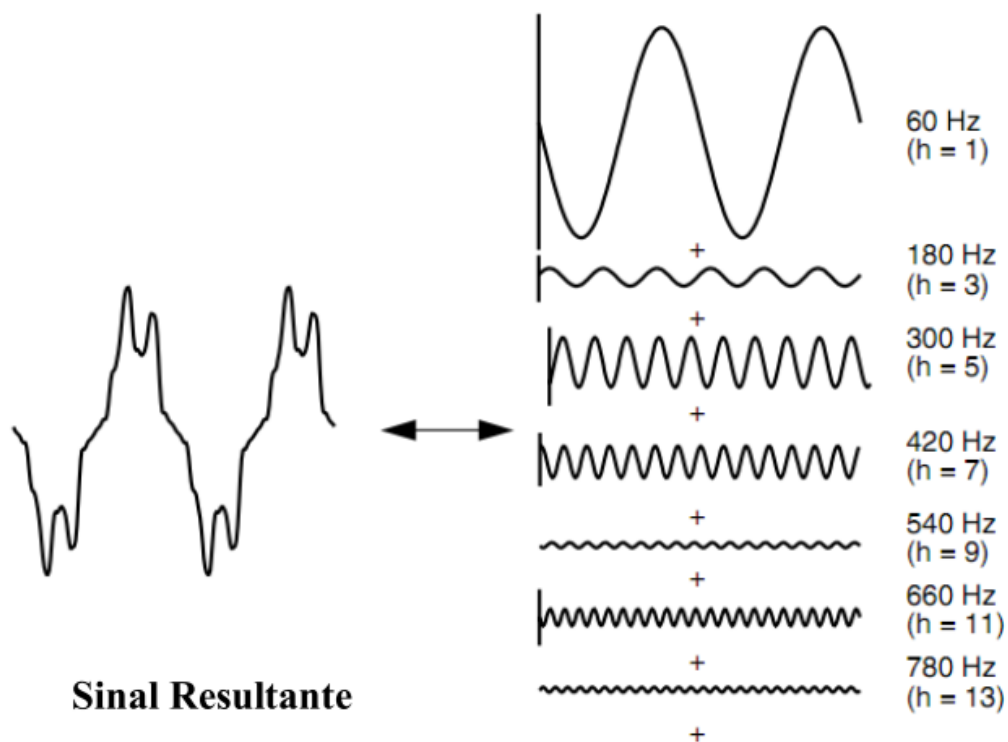


Figura 3 - Sinal fundamental superposto à harmônicos ímpares. (DUGAN et al., 2004)

### 2.1.2 - Distorção Harmônica Total

Em relação à análise de QEE, segundo Rolim, (2015), é de extrema importância quantificar o quanto um sinal de corrente ou tensão é distorcido por influência de harmônicos, pois a partir do cálculo de distorção harmônica total (DHT) é possível os relacionar com os valores regulamentados pela ANEEL em

seus Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, denominada PRODIST (ANEEL, 2018). De acordo com esta norma, o indicador é expresso em porcentagem. Além de expressar as distorções totais, a norma também prevê a distorção harmônica individual, a DHI, a qual quantifica a magnitude harmônica em relação ao sinal fundamental. Conforme a seção 8.1 do módulo 8 da PRODIST, vigente a partir de 01 de janeiro de 2018, as equações para o cálculo das grandezas da DHT e da DHI, em percentuais, são expressas nas equações 1 e 2 abaixo.

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (1)$$

$$DHI\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (2)$$

Onde

$h$  = todas as ordens harmônicas de dois até  $h_{max}$  ;

$V_h$  = amplitude da harmônica de ordem  $n$  e

$V_1$  = amplitude da tensão de sinal fundamental.

Como forma de ilustrar o conceito citado, é apresentada na figura 4 uma onda fundamental sobreposta de uma onda superposta com harmônicas com um DTH=57.28%.

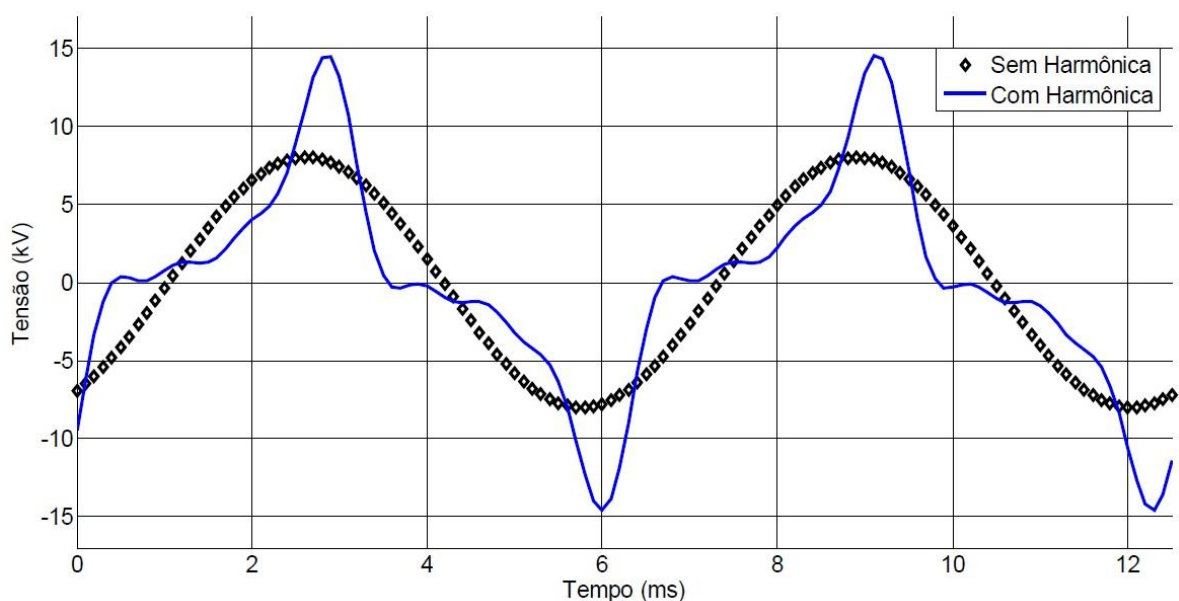


Figura 4 - Comparativo entre a fundamental e onda com DTH = 57.28%. (ROLIM, 2015)

### 2.1.3- Variação na Tensão Nominal de Rede

Segundo Koizumi, (2012), as variações na tensão nominal de rede podem ser classificadas como eventos de curta duração ou fenômenos sustentados. As alterações na tensão de curta duração estão relacionadas a distúrbios com tempo de duração inferiores a um minuto, geralmente causadas por energização ou desconexão de grandes cargas com altas correntes de partida.

Estas variações acontecem geralmente de três formas, sendo do tipo afundamento de tensão (*Sags*), elevação de tensão (*Swells*) ou interrupções de tensão.

Os *sags*, mostrados na figura 5, podem ser provocados por falhas não contínuas nas conexões de cabos do sistema, manobras da concessionária de energia ou curtos-circuitos. Esse efeito é, segundo a norma IEEE 1159:2009, categorizado como um afundamento de tensão por unidade (*pu*) entre 0.1 e 0.9*pu* do valor eficaz.

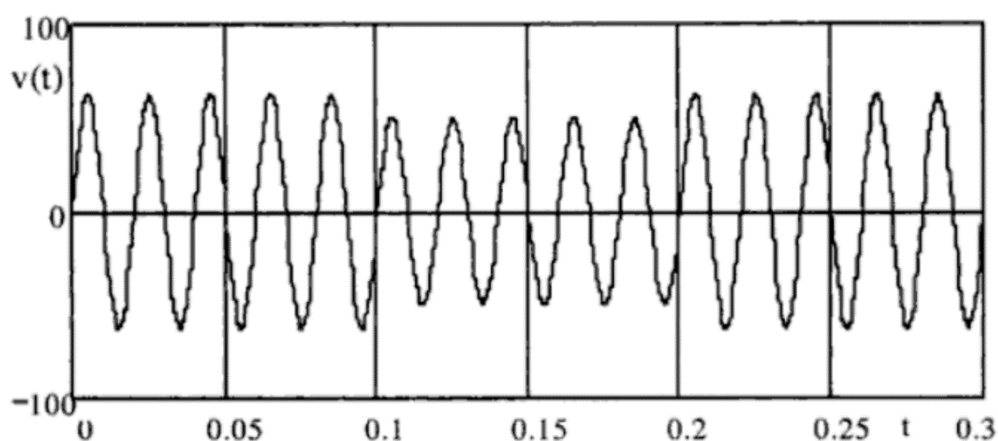


Figura 5 - Sag na tensão de rede. (DIAS, 2002)

Os *swells*, como exemplificado pela figura 6, são distúrbios oriundos da mesma origem apresentada pelos *sags*, mas segundo sua mesma norma regulamentadora, são categorizados por uma elevação do valor eficaz maior que 1.1*pu*.

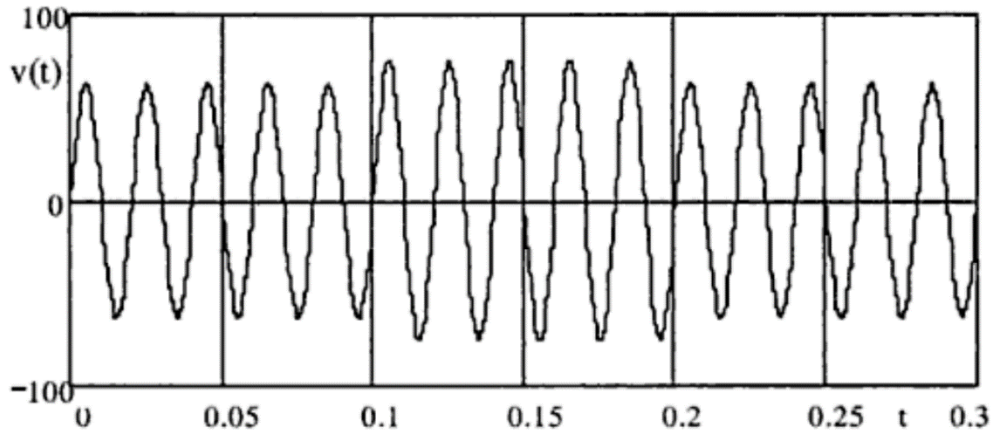


Figura 6 - *Swell* na tensão de rede. (DIAS, 2002)

Na figura 7 é apresentado um exemplo de variação de tensão, a qual é caracterizada por um valor aferido inferior a  $0,1 pu$ . Essa variação de tensão abaixo da escala indicada é denominada interrupção de tensão.

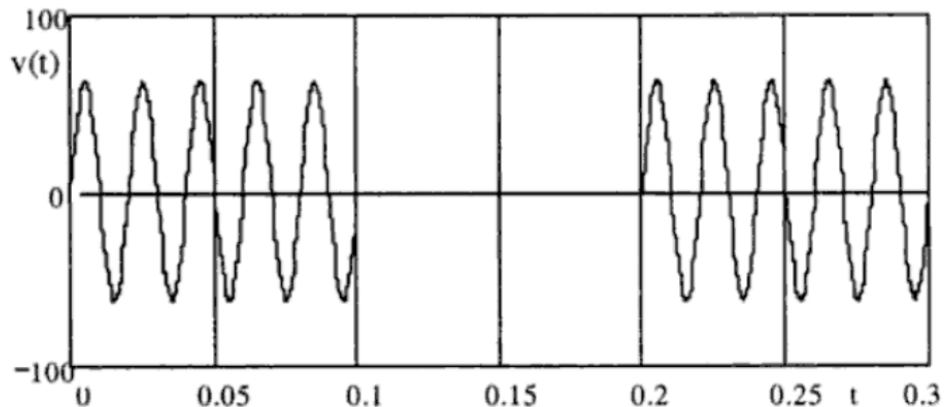


Figura 7 – Interrupção na tensão de rede. (DIAS, 2002)

#### 2.1.4- Flicker

O fenômeno Flicker, segundo Koizumi, (2012), também conhecido como cintilação, é advindo do impacto da flutuação de tensão na intensidade luminosa e não são geradas por variações instantâneas como os sags.

A figura 8 a seguir mostra um exemplo de onda da rede elétrica com flutuação de tensão. De acordo com Mehl, (2012), este efeito é basicamente constatado através da impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso de lâmpadas, principalmente as do tipo incandescentes. A flutuação



geradora do efeito pode ser causada por cargas na rede com ciclo variável, nas frequências de operação as quais produzem modulação da magnitude da tensão na faixa de 0 a 30Hz, faixa a qual o olho humano é sensível a variações, tendo na frequência de 10Hz uma sensibilidade máxima.

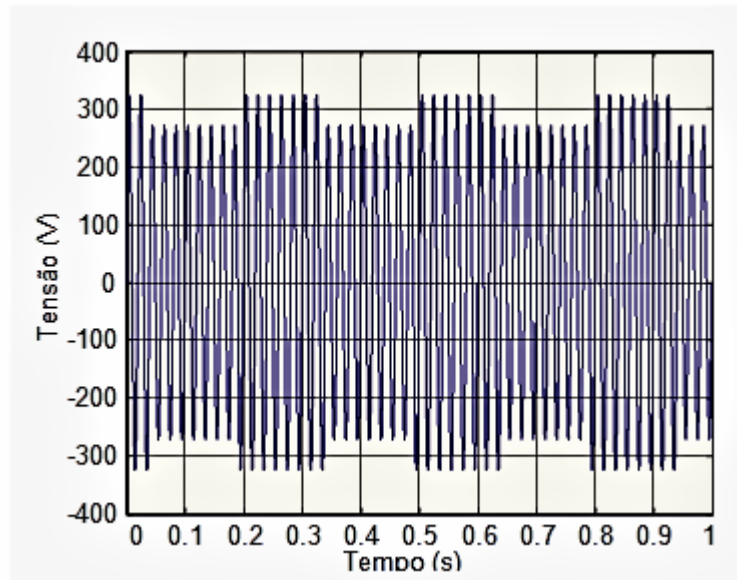


Figura 8 - Exemplo de Onda com Cintilação. (SINUS, 2013)

### 2.1.5- Transitórios

De acordo com Dugan et al., (2004), os transitórios são variações momentâneas que provocam rápida variação na forma da onda de corrente ou tensão de maneira indesejada. Tais transientes podem ser advindos de descargas atmosféricas ou chaveamento de cargas muito grandes ou reativas. Muitas vezes é considerado sinônimo de surtos elétricos.

Estes transitórios podem ser classificados em duas categorias, os transitórios impulsivos e os transitórios oscilatórios.

#### 2.1.5.1- Transitório impulsivos

A figura 9 apresenta uma forma de onda de corrente com um caso de transiente impulsivo provocado por um relâmpago. É categorizado como transitório impulsivo, por Dugan et al., (2004), uma variação brusca de tensão, corrente ou ambos, no qual corre durante o regime permanente um pulso de curta duração, polarizado positiva ou negativamente, com significativa amplitude sem

alterar a frequência do sinal, podendo excitar a frequência natural do sistema elétrico.

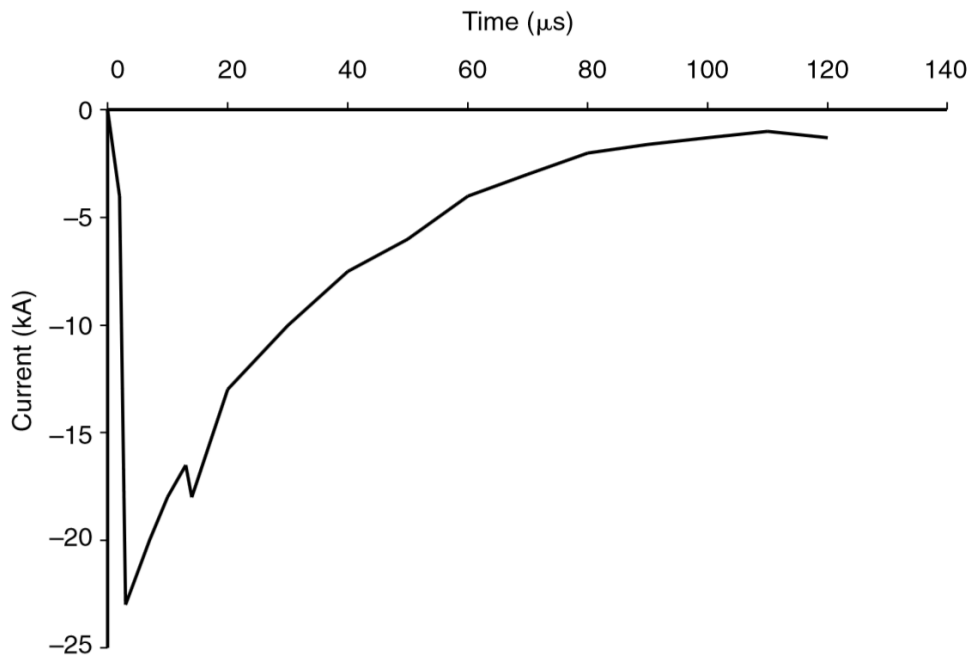
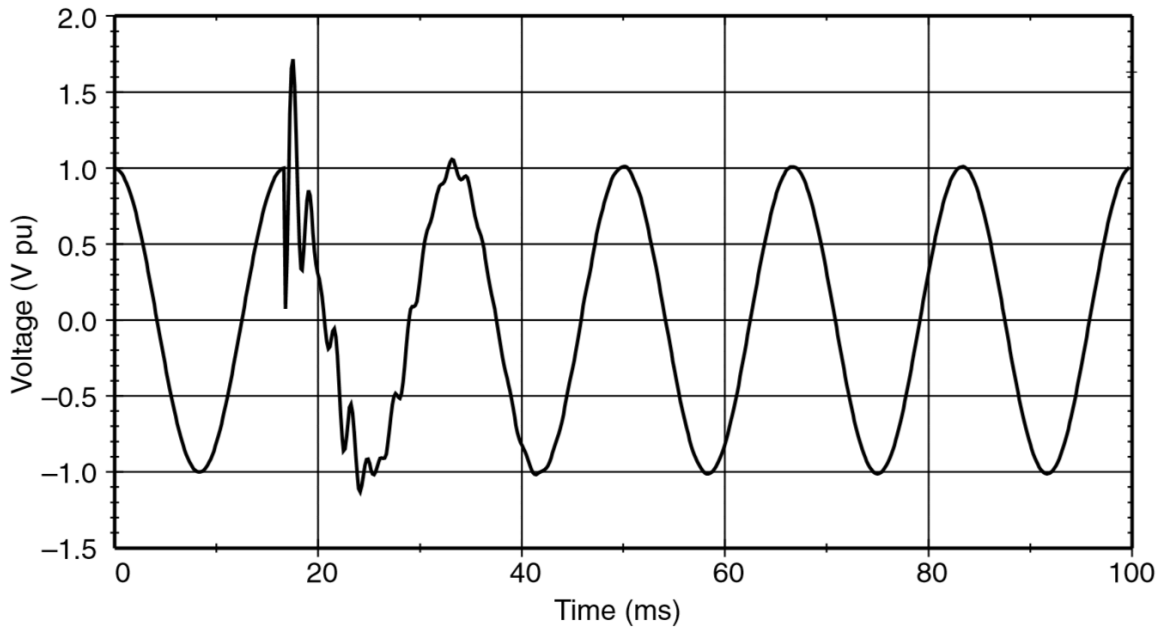


Figura 9 - Transitório Impulsivo por descarga elétrica. (DUGAN et al., 2004)

#### 2.1.5.2- Transitórios oscilatórios

Ainda de acordo com Dugan et al., (2004), os transientes oscilatórios são variações bruscas de tensão, corrente, ou as duas, caracterizada principalmente por ondas de polaridades negativas e positivas de rápida alternância e pode ser descrita de acordo com sua duração, magnitude e frequência.

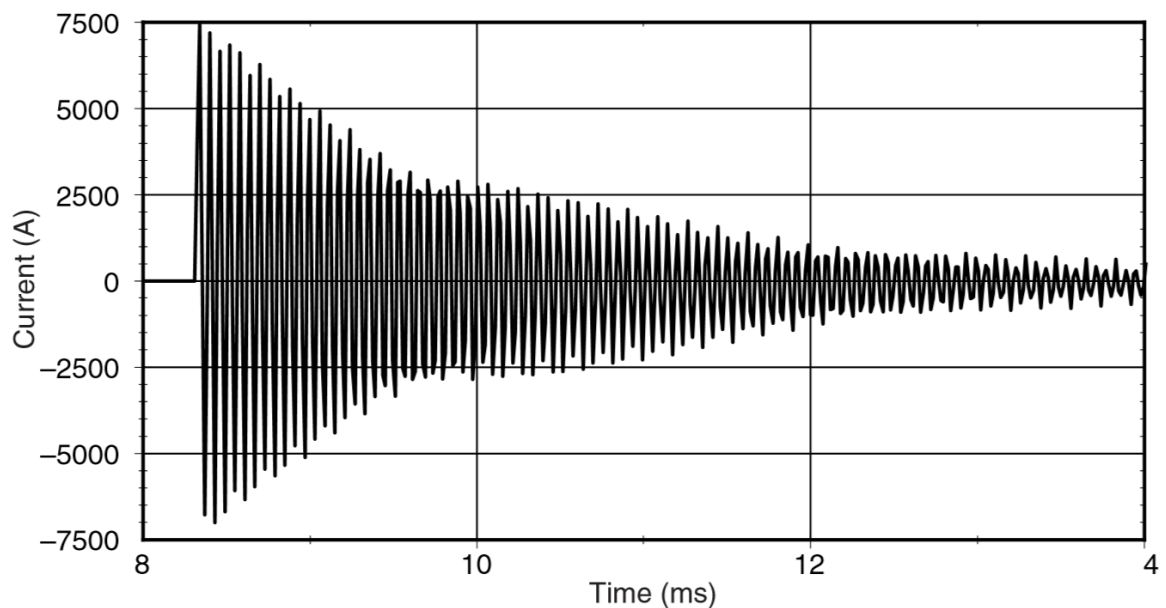
Os transientes com frequências inferiores a 5kHz e duração entre 0.3 e 50ms são considerados transientes de baixa frequência como exemplificado pela figura 10. Tais transientes podem ser gerados por efeitos associados a ferro-ressonância e energização de transformadores com frequências inferiores a 300Hz e pela energização de banco de capacitores com frequências apresentadas entre 300 a 900Hz,



**Figura 10 - Transiente Oscilatório de Baixa Frequência advindo de energização de Banco de Capacitores. (DUGAN et al., 2004)**

Transientes de média frequência são caracterizados por oscilações na faixa de 5 a 500kHz e podem ser gerados por causas semelhantes aos de baixa frequência e por transientes impulsivos.

Transientes de alta frequência normalmente são respostas aos transientes impulsivos e são oscilações superiores a 500kHz. A figura 11 descreve um transiente oscilatório de média frequência provocado pelo chaveamento de um banco de capacitores oscilando em torno de 10kHz.



**Figura 11 - Transiente oscilatório de corrente causado por chaveamento de banco de capacitores.(DUGAN et al., 2004)**

## 2.2- Microprocessadores e Microcontroladores

Os microprocessadores, de acordo com Crisp, (2004), são circuitos integrados, como o apresentado pela figura 12, os quais possuem entradas e saídas e como qualquer sistema possui um processo que relaciona a interação entre elas. As entradas e as saídas desse equipamento são uma série de tensões as quais podem ser utilizadas para controlar outros equipamentos externos. Os microprocessadores são categorizados primordialmente pela execução de suas principais funções, como processamento de informação e tomadas de decisão a partir da análise dos sinais de entrada do dispositivo e das saídas referente a eles.

Os microprocessadores por si só não realizam mais tarefas como a descrita acima, sendo necessário, para a realização de tarefas mais complexas, a integração com outros dispositivos, como memórias e periféricos. A interação do microprocessador com tais dispositivos, unidos em um único circuito integrado deu origem aos conhecidos Microcontroladores.

Os Microcontroladores são sistemas integrados constituídos basicamente de microprocessadores, dispositivos de memória RAM, ROM, Flash ou outros, conversores A/D e conversores D/A, contadores, temporizadores, GPIO (General Purpose In/Out) dentre outros. O propósito deste dispositivo é baseado na execução de tarefas gravadas em sua memória de código, sendo bastante empregado em atividades ou operações que variam conforme estímulos ou condições ambientes, análises, procedimentos e correções. (SCHUNK, 2001).



Figura 12 - Exemplo de Microcontrolador. (MICROCHIP, 2018)

### 2.3- Amplificadores Operacionais

Um amplificador operacional, ou Ampop como é conhecido popularmente, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada elevada baixa impedância de saída. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Em sua clássica topologia, como exemplificado pela figura 13, o amplificador é constituído de um terminal inversor, denotado com a simbologia negativa (-), um terminal não inversor, apresentado pela simbologia positiva (+) e um terminal de saída comumente apresentado como ( $V_0$ ). Em síntese, este dispositivo amplifica a diferença de potencial apresentada entre os dois pontos de entrada do amplificador por um ganho determinado por conexões externas.

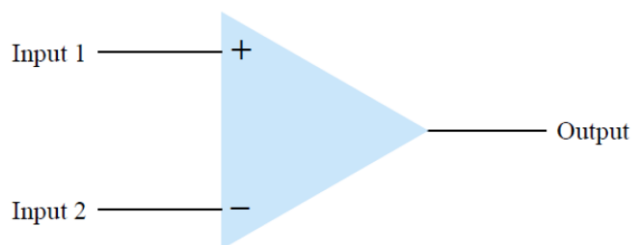


Figura 13 - Ampop básico. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

No amplificador operacional, se o sinal a ser amplificado for aplicado na entrada não inversora, a saída produzida possuirá a mesma polaridade do sinal de entrada. Para sinais aplicados ao terminal inversor do dispositivo, a saída produzida apresentará polaridade inversa em relação ao sinal de entrada.

Os amplificadores operacionais apresentam diversas configurações e topologias de amplificação. Nos tópicos seguintes são apresentadas algumas topologias comuns que são utilizadas para amplificação ou atenuação de sinais aplicados aos terminais de entradas do Ampop. Para tal explanação, os amplificadores serão considerados ideais e os seus parâmetros internos não serão levados em consideração, uma vez que o enfoque da produção deste dispositivo é pautado nas análises das topologias bem como a relação dos sinais de entrada e saída das configurações escolhidas.

### 2.3.1- Amplificador Inversor

Esta topologia apresenta um circuito básico desenvolvido com o Ampop, como apresentado pela figura 14, que opera como um multiplicador de ganho constante. Nessa configuração, dois resistores ( $R_1$  e  $R_f$ ) são conectados ao amplificador operacional da forma ilustra. Um sinal de entrada  $V_i$  é aplicado ao Ampop através de  $R_1$  à entrada negativa e a saída realimenta a mesma entrada através do resistor  $R_f$ . Nesta configuração o sinal de entrada é aplicado exclusivamente na entrada negativa enquanto a entrada positiva é aterrada.

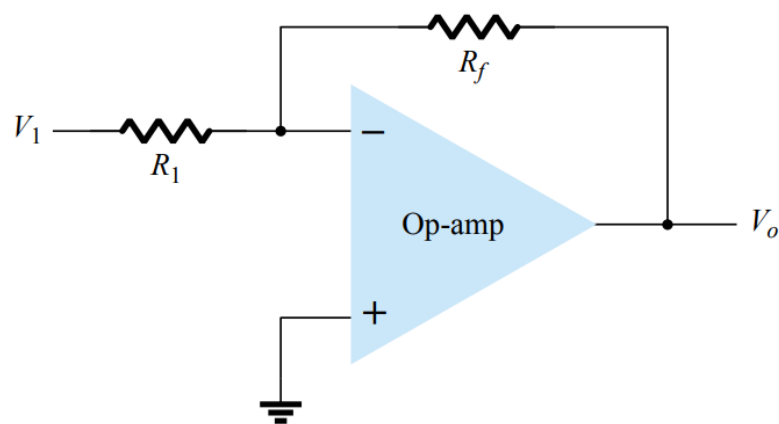


Figura 14 – Configuração Inversora. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

Baseado nas análises descritas em (PERTENCE, 2003) o sinal aplicado a entrada inversora é amplificado por um ganho equivalente a razão entre os resistores  $R_1$  e  $R_f$  e é enviado para a saída  $V_o$  com polaridade invertida. Com isso, razão entre a tensão de entrada e saída é dada pela equação 3 abaixo.

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3)$$

Para valores de  $R_f > R_1$ , o sinal  $V_i$  é amplificado pela razão descrita acima. Para valores de  $R_f < R_1$ , o sinal  $V_i$  é atenuado pela mesma razão e para casos onde  $R_f = R_1$ , o sinal  $V_i$  apenas tem sua polaridade invertida.

### 2.3.2- Amplificador não inversor

A topologia não inversora, ilustrada pela figura 15, consiste em um amplificador onde o sinal de entrada  $V_i$  é aplicado à entrada não inversora do AOP. Diferentemente da topologia acima descrita, o sinal não passa por nenhum resistor e a realimentação do sinal de saída  $V_o$  é conectada a entrada inversora do Ampop através de um resistor  $R_f$ , o qual é aterrado através de  $R_1$ . A equação que descreve o comportamento do amplificador não inversor é dada pela equação 4 abaixo.

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (4)$$

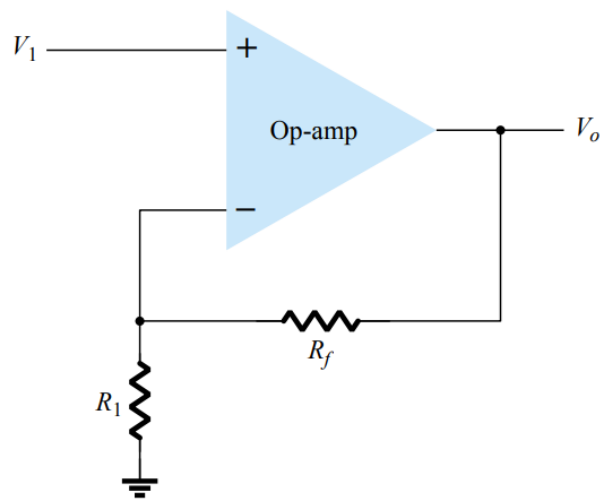


Figura 15 - Configuração Não Inversora. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

Para valores da razão  $R_f/R_1 > 1$ ,  $R_f/R_1 < 1$  ou  $R_f/R_1 = 1$ , o sinal de entrada é amplificado. Em todos os casos, o sinal possuirá a mesma polaridade na saída e valor escalar superior.

### 2.3.3- Amplificador seguidor de tensão (*buffer*)

Com representação esquemática apresentada na figura 16, segundo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), o amplificador seguidor de tensão, ou *buffer* como é comumente conhecido, é um tipo de amplificador onde a relação  $R_f/R_1$  se aproxima muito de 0. Este circuito fornece ganho unitário com a conservação da polaridade do sinal de entrada.

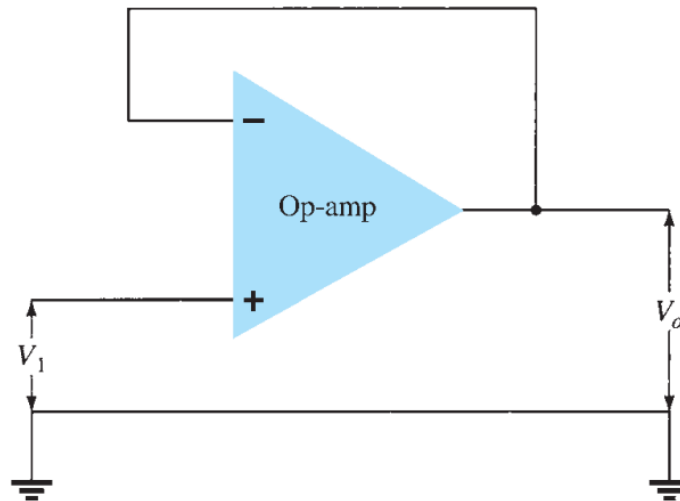


Figura 16 - Seguidor de Tensão. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

### 2.3.4 – Amplificador de Diferença ou Subtrator

O Amplificador de diferença é uma topologia amplificadora que se difere das configurações já apresentadas acima pela possibilidade de amplificação de uma diferença de tensão não necessariamente referenciada ao terra da configuração. Como apresentado pela figura 17, essa topologia apresenta amplifica a diferença de potencial incidente sob suas entradas. Ela é composta por um conjunto de 4 resistores distribuídos em volta ao amplificador. Comumente, os resistores ligados à porta inversora,  $R_2$  e  $R_1$  são semelhantes aos resistores conectados a porta não inversora do dispositivo, o que permite o cálculo direto de sua tensão de saída, conforme apresentado pela equação 5.

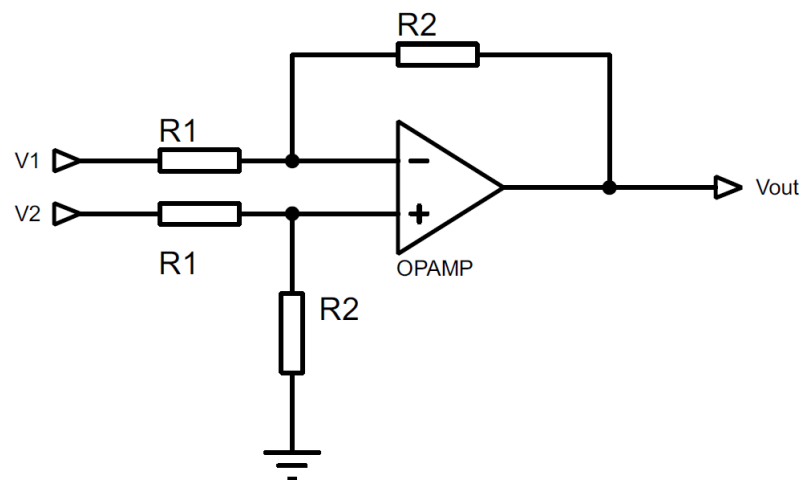


Figura 17 - Amplificador de diferença ou Subtratora. (PRÓPRIO AUTOR)



$$V_o = (V_2 - V_1) * \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Uma funcionalidade apresentada por essa configuração é a possibilidade de um ganho de tensão DC aplicado à saída  $V_o$  do circuito (*offset*) através do terminal aterrado do circuito. O ganho de offset não interfere no ganho do circuito e pode ser provado aplicando a teoria da superposição às entradas  $V_1$ ,  $V_2$  e ao terminal aterrado. A tensão  $V_o$  para a entrada  $V_1$ , com as demais entradas aterradas é apresentada pela equação 6.

$$V_o = -V_1 * \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

A tensão  $V_o$  para a entrada  $V_2$ , com as demais entradas aterradas é apresentada pela equação 7.

$$V_o = \frac{R_2}{R_2 + R_1} * \frac{R_2 + R_1}{R_1} * V_2 = V_2 * \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

A tensão  $V_o$  para a entrada aterrada, tratada agora como  $V_{offset}$ , com as demais entradas aterradas é apresentada pela equação 8.

$$V_o = \frac{R_1}{R_2 + R_1} * \frac{R_2 + R_1}{R_1} * V_{offset} \quad (8)$$

Logo, por superposição, a tensão  $V_o$  de saída do circuito pode ser determinada como a apresentada pela equação 10.

$$V_o = -V_1 * \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_2 + R_1} * \frac{R_2 + R_1}{R_1} * V_2 + \frac{R_1}{R_2 + R_1} * \frac{R_2 + R_1}{R_1} * V_{offset} \quad (9)$$

$$V_o = V_{offset} + (V_2 - V_1) * \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

Portanto, a configuração Amplificador Subtrator não possui ganho alterado com a inserção de tensão de *offset* em seus terminais.

### 2.3.5 – Amplificador de Instrumentação

Mais uma topologia comum realizada com amplificadores operacionais é o Amplificador de Instrumentação. Ela possui todas as características assumidas pelo amplificador de diferença, mas possui mais um estágio de amplificação controlado por mais 2 amplificadores operacionais e 4 resistores dispostos como apresenta a figura 18. Como aferido, consiste em 2 amplificadores não inversores aplicados à entrada da topologia subtratora, os quais unidos pelos resistores  $R_1$  de ambas topologias, permite um ganho à diferença de tensão de entrada pelo valor apresentado na equação 11 apresentada abaixo, o qual é obtido pela mesma teoria da superposição como apresentado no tópico superior.

$$V_o = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) * \frac{R_4}{R_3} \quad (11)$$

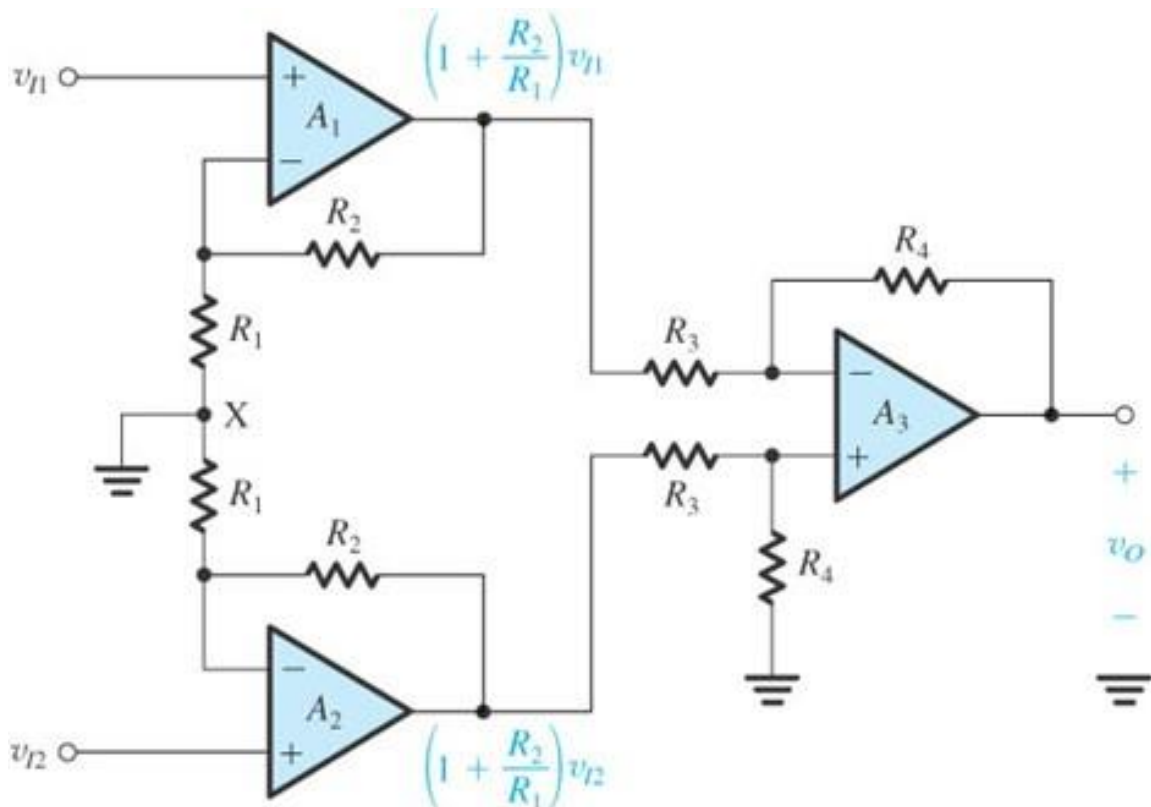


Figura 18 - Amplificador de Instrumentação. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

## 2.4- Medidores de Corrente elétrica

Com o crescimento dos sistemas elétricos no mundo, foi observada a necessidade de se aferir a quantidade de energia elétrica consumida pelos sistemas, tanto para efeitos de capacidade de suprimento quanto por fatores monetários, relacionando preços a quantidade de energia consumida. De forma a suprir a necessidade apresentada, entrou em cena equipamentos que conseguiam, de forma analógica, responder a variações de corrente elétrica a quais eram expostos, os sensores. Segundo Fonseca, (2018), sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física numa segunda grandeza física mais adequada a um sistema de medição.

Como descreve Pinheiro, (2011), os sensores possuem como característica uma função de transferência, resposta em frequência, excitação, impedância de saída e saturação. Dentre as peculiaridades apresentadas, a que mais se destaca é a função de transferência. Ela determina a relação entre o sinal de entrada do sensor, dado pela intensidade de corrente elétrica que atua direta ou indiretamente no corpo do medidor e o sinal de saída dele, que responde de acordo com a variação do valor de entrada.

Algumas respostas de sensores possuem características lineares, ou seja, existe proporcionalidade direta entre entrada e saída. Os limites onde é válida tal relação são dados pelos valores de saturação do sensor, característica descrita dele. Para saídas de sensores com respostas em tensão, a característica de impedância de saída deve possuir valor baixo e relativamente alto em sua entrada. O oposto é observado a respostas em valores de corrente. Neste tipo de configuração, é ideal uma impedância de entrada baixa e uma impedância de saída alta. Ainda na resposta que os sensores possuem à aferição de grandezas elétricas, estas podem se comportar de forma distinta para diferentes valores de frequência de excitação.

Esse nível de excitação especifica a sensibilidade do sensor a variações do sinal de entrada e é denotada resposta em frequência do sensor. Como ilustrado pela figura 19, a resposta em frequência é normalmente apresentada em diagramas de bode, o qual relaciona a amplitude de saída do sensor e sua fase em função do aumento da frequência.

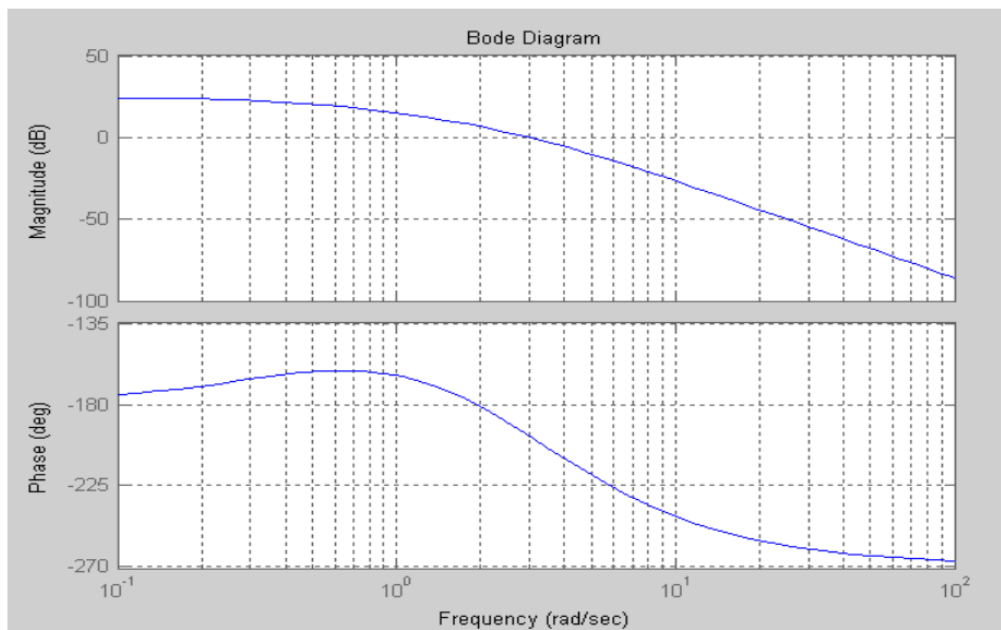


Figura 19 - Diagrama de Bode de um sensor. (FUENTES, 2005)

Adentrando no campo de investigação e explanadas as características constituintes e fundamentais dos sensores são analisados os sensores de corrente. Ainda segundo Pinheiro, (2011), sensores de corrente são descritos apenas como dispositivos utilizados na medição de corrente em sistemas de distribuição de energia elétrica. Dentre esses dispositivos, existem configurações que necessitam de se adentrar fisicamente ao circuito aferido a fim de levantar as grandezas mensuradas, se colocando em série com a corrente do circuito. Outras topologias não necessitam ser invasivas ao circuito aferido e se baseiam em características magnéticas da corrente elétrica, como explanado nas configurações abaixo.

#### 2.4.1- Medição de corrente por Resistor Shunt

Uma das primeiras formas de se aferir a intensidade de corrente elétrica que percorre um circuito é com o auxílio de um medidor de tensão. Esse medidor aferir a queda de tensão aplicada nos terminais de um resistor Shunt. Segundo Xiao et al., (2003), os resistores shunts são elementos sensores de resistência baixa que são inseridos diretamente no circuito da corrente. Sua operação é regida pelos princípios apresentados na primeira lei de ohm, (NAG, 1964), e podem ser aplicados em medidas de correntes alternadas e contínuas, com grande escala de frequência, cerca de MHz.

O resistor Shunt, equipamento o qual pode ser visualizado como exemplo na figura 20, para essa configuração, possui um valor de resistência fixo e conhecido. Ele é implementado abrindo o circuito a ser aferido e posto em série com resistor, sendo assim, parte integrante do circuito. Com tudo, medindo a queda de tensão em cima dos terminais do resistor, segundo a equação 12, é possível aferir a corrente elétrica que o percorre

$$I(t) = \frac{V(t)}{R_{SHUNT}} \quad (12)$$



Figura 20 - Resistor Shunt. (EBAY, 2018)

#### 2.4.2- Medição de Corrente com Transformadores de Corrente

Segundo Xiao et al., (2003), os Transformadores de Corrente, tratados daqui pra frente como TC, são largamente utilizados como sensores de corrente alternada, podendo ser aplicados a sistemas com até dezenas de mega-hertz. Este sensor consiste em dois circuitos de corrente diferentes que se interligam por um campo magnético mútuo. Tal compartilhamento magnético é possível por ambos os circuitos se encontrarem circulados em um condutor de campo magnético, o qual permite que o campo gerado por um circuito seja propagado par o outro, sem nenhum contato físico entre os dois.

De acordo com Pinheiro, (2011), essa propagação de fluxo acontece se um dos circuitos, acoplados em forma de espiras e denotado por primário, for alimentado com tensão alternada, um fluxo magnético alternado será produzido, cujo valor de amplitude é diretamente relacionado à quantidade de espiras a tensão aplicada no enrolamento primário. Tal fluxo induzirá no segundo circuito, que também possui enrolamentos que compartilham o mesmo fluxo e é denotado por secundário, uma tensão, também alternada, cujo valor de amplitude também é determinado pela quantidade de espiras e o valor do fluxo magnético.

O compartilhamento de fluxo magnético entre os enrolamentos denotados primário e secundário se dá pela ação de um condutor magnético, o qual canaliza o fluxo alternado e o direciona, fazendo com que as linhas de campo magnético encontrem no condutor magnético uma permeabilidade maior, formando assim um circuito fechado que percorre os dois enrolamentos.

Segundo Mussoi, (2007), o campo magnético que o enrolamento primário provoca no condutor magnético advém da circulação de corrente em suas espiras. Todo condutor elétrico, percorrido por uma corrente alternada produz campo magnético, o qual possui direção determinada pela regra da mão direita, como mostrada na figura 21 a seguir.

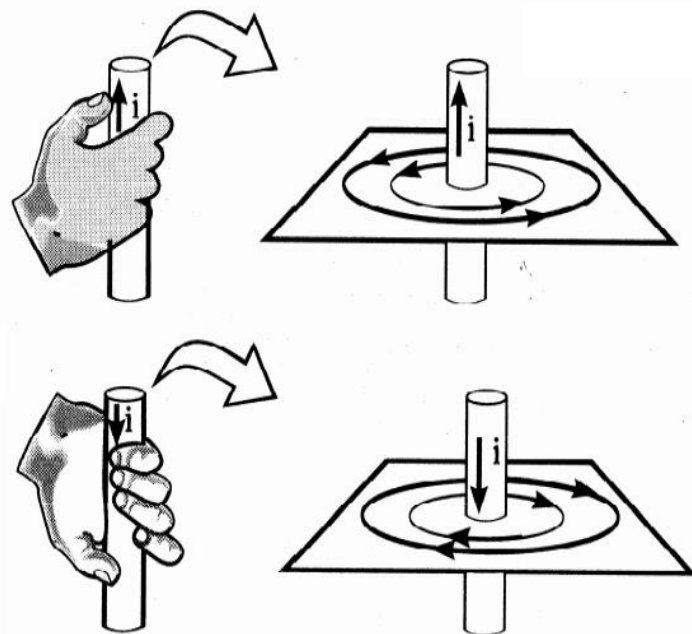


Figura 21 - Regra da Mão Direita. (MUSSOI, 2007)

É notável que quando esse condutor elétrico é enrolado em um condutor magnético, comumente ferromagnético, todos os campos gerados são somados pelas  $N$  voltas dadas no material ferrítico, o qual direciona o campo em linhas, e o

direciona para o segmento envolto pelos enrolamentos do secundário, o qual, pela ação do fluxo magnético, pelos princípios estipulados pela Lei de Lenz, induz uma tensão elétrica alternada que é proporcional a quantidade de voltas que o enrolamento possui. Esse dispositivo não é um equipamento com capacidade de converter energia, mas sim dispositivo capaz de transferir energia elétrica de um circuito para outro.

Os TC's se diferem dos transformadores de tensão comum, os quais são visualizados em postes de energias, pelo fato de, segundo Koizumi, (2012), a corrente que percorre o enrolamento primário do TC ser bem maior que a induzida no enrolamento secundário. Neste sentido, um TC ideal pode ser definido como um transformador em que as condições apresentadas no enrolamento primário são reproduzidas no enrolamento secundário com exata proporção e relação de fase (JORDÃO, 1997). Um diagrama representativo da condição conceitual do TC pode ser visualizado na figura 22.

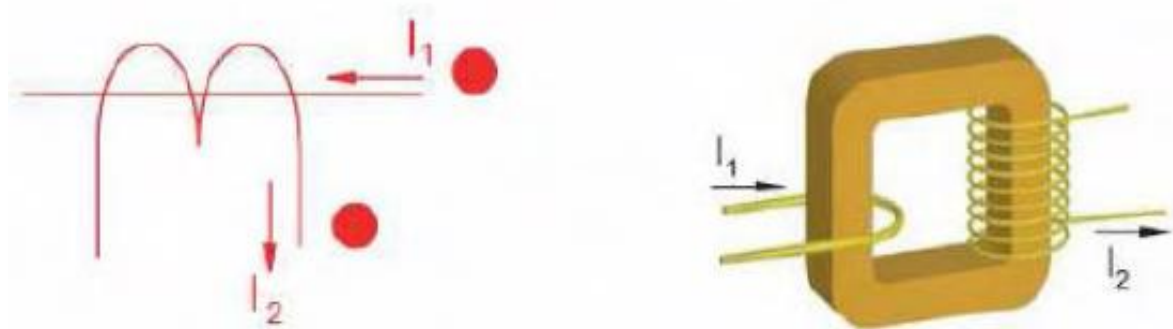


Figura 22 - Diagrama conceitual do Transformador de Corrente. (CHAVES, 2008)

A utilização do TC como um sensor de corrente se dá num princípio semelhante ao apresentado nos resistores *shunt*. Um resistor é inserido entre os terminais do enrolamento secundário e a tensão induzida entre os terminais é aferida e dividida pelo valor do resistor que os interconecta. Um equipamento como o descrito é facilmente implementado em aferições de corrente e um exemplo pode ser visualizado na figura 23 a seguir.



Figura 23 - Transformador de Corrente. (MYELECTRICAL, 2018)

### 2.4.3- Medição de Corrente por Efeito Hall

De acordo com Maurity et al., (2012), em 1879, Edwin Hall percebeu que quando um campo magnético é perpendicularmente aplicado à um material semicondutor, com uma corrente passante constante, é gerada em seus terminais uma diferença de potencial. Esse efeito foi denominado Efeito *Hall*. Por ser simples, as aplicações em dispositivos que contém esse material são inúmeras, dentre elas, os sensores de efeito Hall, utilizados para medir corrente elétrica, tanto alternada quanto contínua, de até centenas de quilohertz. Desde a descoberta de Hall, esta técnica de medição das propriedades dos semicondutores tem sido estudada e desenvolvida, e suas descobertas e avanços são amplamente empregados nos laboratórios e na indústria.

Segundo Koizumi, (2012), os dispositivos de efeito Hall são sensores de efeito de campo. Eles convertem o campo magnético captado pelo condutor de corrente elétrica em valores de tensão. Como forma de ilustrar esse processo, a figura 24 demonstra uma folha do material semicondutor, o elemento *hall*, atravessada por corrente, sem contato com um campo magnético. A corrente circulante é perpendicular às conexões de saída. O material, por não captar nada, possui saída nula.



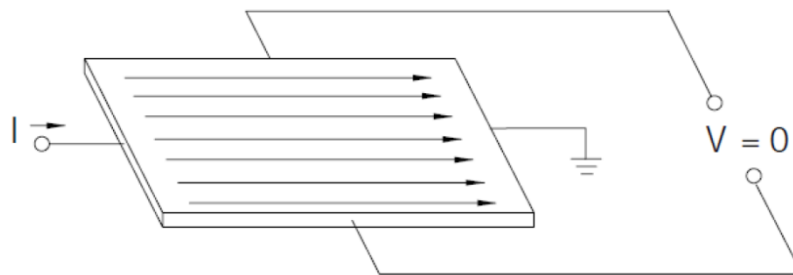


Figura 24 - Princípio *hall* sem campo magnético. (HONEYWELL, 2010)

O elemento, ao ser exposto a campo eletromagnético perpendicular, promove à corrente que o circula uma força de Lorentz (HONEYWELL, 2010). Tal força promove à distribuição de corrente certo distúrbio, que por sua vez resulta em uma diferença de potencial nos terminais de saídas. Uma ilustração deste distúrbio é apresentada na figura 25, distúrbio o qual é gerador da propriedade conhecida como tensão de *Hall*.

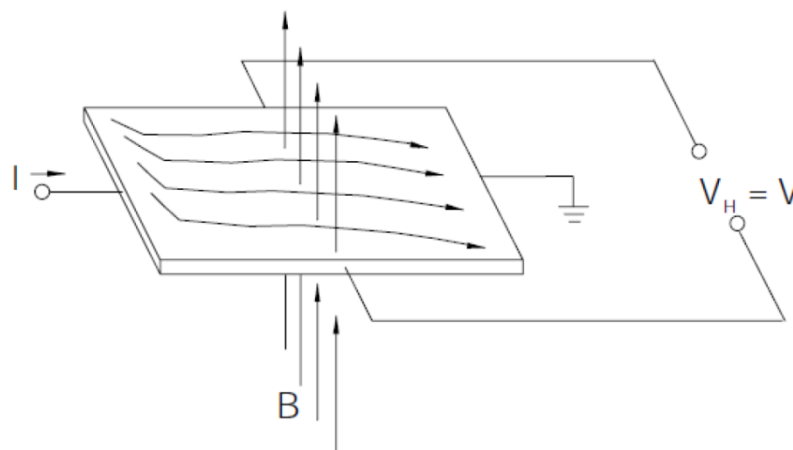


Figura 25 - Princípio *hall* com campo magnético. (HONEYWELL, 2010)

Contudo, é possível perceber que a tensão *hall* produzida  $V_H$  é proporcional ao produto vetorial da corrente que circula o material semiconductor  $I$  pelo campo magnético perpendicular  $B$ , como visto na equação 13 abaixo.

$$V_H \propto I \times B \quad (13)$$

Para que essa tensão seja utilizável para as diversas aplicações de aferição de corrente, um circuito condicionador com estágio de amplificação é inserido ao sensor primário. Esse conjunto pode ser encontrado em diversos medidores baseados em princípio *Hall* como o dispositivo apresentado pela figura

26, o ACS712 (COMMUNICA, 2018), um dispositivo que traz encapsulado toda a circuitaria descrita e possui fácil implementação em aferições de corrente elétrica ou o LA55-P (LEM, 2018), apresentado pela figura 27. Diferente do ACS712, o LA55-P possui todas as funcionalidades apresentadas pelos dispositivos *Hall* mas é não invasivo ao circuito de medição, o qual pode ser realizado sem a sua inserção em seria a corrente de aferição.

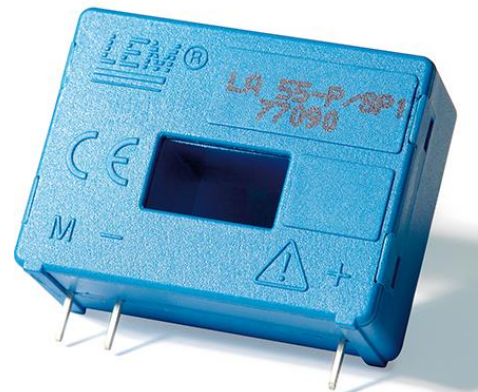
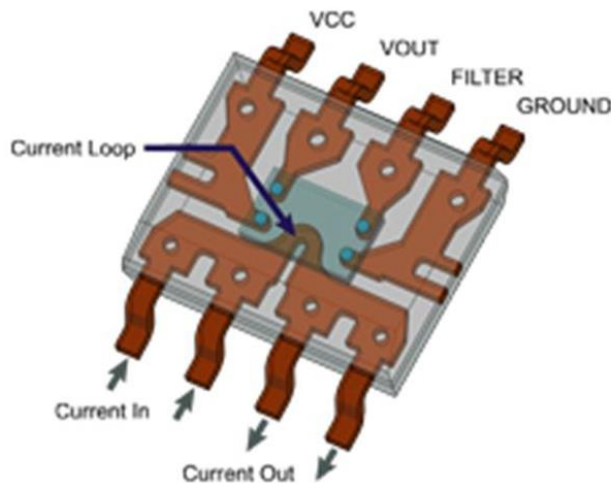


Figura 26 - Sensor *Hall* ACS712.(COMMUNICA, 2018)

Figura 27 - Sensor *Hall* LA55P.(LEM, 2018)

#### 2.4.4- Medidores por Bobina de Rogowski

Segundo Higashi, (2006) os medidores de corrente elétrica baseados nas bobinas de Rogowski operam seguindo um princípio de medição descoberto em 1912. Este princípio é baseado em um enrolamento com núcleo de material não ferromagnético ou de ar, geralmente em um formato toroidal, que circunda um condutor percorrido pela corrente a ser aferida. Esta bobina formada está magneticamente acoplada ao condutor, induzindo nele tensão proporcional à variação temporal da corrente no condutor.

Tal medidor se distingue dos transformadores de núcleo magnéticos mencionados por apresentar um sistema inovador de medida que oferece vantagens em relação aos sistemas convencionais como a possibilidade de aferir desde poucos ampères até centenas de quilo ampères, em frequências variantes de poucos hertz a quilohertz.

Um simples projeto de tal bobina pode ser visualizado na figura 28 abaixo, a qual apresenta um dispositivo que consiste em uma única camada de enrolamento.

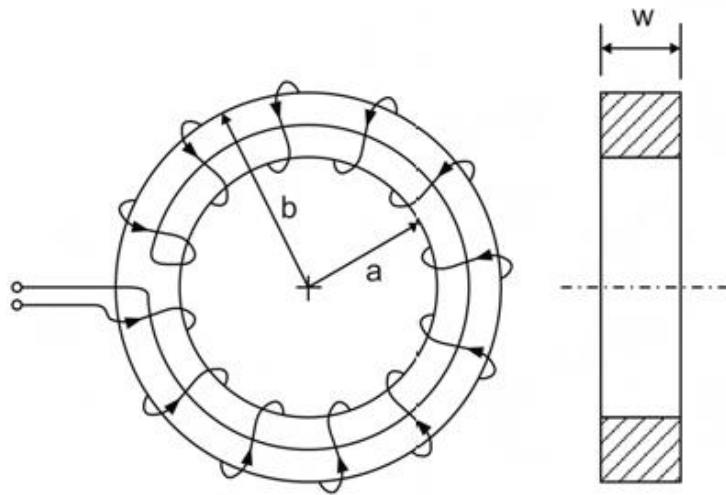


Figura 28 – Projeto Simples de uma Bobina de Rogowski. (PINHEIRO, 2011)

Ainda segundo Pinheiro, (2011), a tensão  $e_0(t)$  que os terminais da bobina apresenta, descrita na equação 14 abaixo é proporcional a derivada da corrente  $i(t)$  que percorre o condutor a ser aferido e à indutância mutua  $M$  entre o conjunto.

$$e_0(t) = M \frac{di(t)}{dt} \quad (14)$$

A indutância mutua, segundo Koizumi, (2012)  $M$  é muitas das vezes definida pela expressão 15 abaixo.

$$M = \mu_0 N A \quad (15)$$

Onde:

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar  $4 \pi 10^{-7} N/A^2$  ;

$N$  é a quantidade de espiras do condutor no núcleo e

$A$  representa a área da seção do núcleo em  $m^2$

Para a produção do valor escalar da corrente elétrica é necessário empregar um integrador em paralelo com os terminais da bobina a fim de mensurar em valores de corrente o sinal de tensão obtido, conforme demonstra a equação 16 abaixo.

$$i(t) = \frac{1}{M} \int e_0(t) dt \quad (16)$$

A implementação física deste integrador pode ser realizada com o emprego de um circuito amplificador operacional como demonstra a figura 29 abaixo.

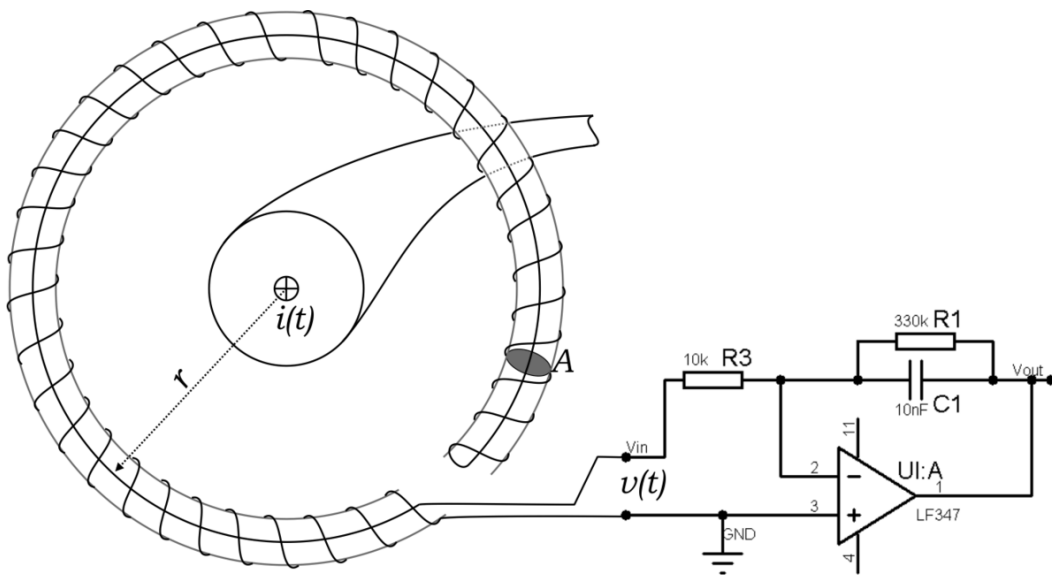


Figura 29 - Integrador aplicado à bobina de Rogowski. (WIKIPÉDIA, 2018)

Segundo Koizumi, (2012), as principais vantagens que este sensor oferece em relação aos transformadores comum de corrente são a boa linearidade, parâmetro o qual permite leitura de várias faixas de corrente com o mesmo transdutor, a boa resistência a fenômenos de histerese e saturação além de possibilitar alta velocidade de resposta a transientes elétricos.

### **3- DESENVOLVIMENTO**

Tendo em vista melhor organização da exposição metodológica, a seção será dividida em subseções, visando maior esclarecimento das etapas de projeto para a criação do dispositivo mecatrônico. Os métodos descritos abaixo foram realizados, primordialmente no laboratório de eletrônica do Cefet-Mg Unidade Divinópolis e projetados e validados na versão de teste do Proteus.

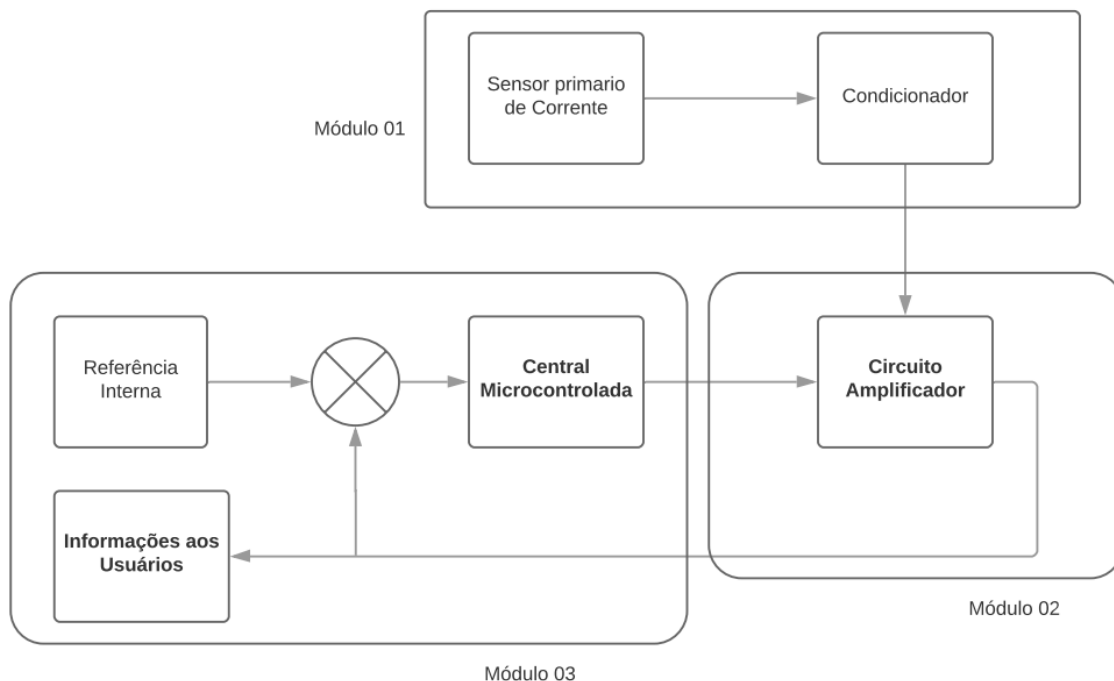
#### **3.1- Descrição do sistema**

O dispositivo proposto contará com 3 módulos que se intercomunicarão a fim de realizar o objetivo de ajustar o ganho de aferição de sensores de corrente elétrica para melhor interpretação de seu valor. Sua representação pode ser visualizada na figura 30.

O primeiro módulo contará com o sensor primário de corrente elétrica, que captará a variação de corrente e a enviará para um circuito condicionador, que condicionará a grandeza aferida a fim de transmiti-la ao módulo 2.

O módulo 2 consiste num circuito amplificador que atuará na atenuação ou amplificação do sinal proveniente do módulo 1. A ação no sinal vindo do primeiro módulo é controlada por um sinal gerado pelo módulo 3, o qual além de controlar a ação do módulo, também recebe a sua saída.

O terceiro módulo é composto de um dispositivo microcontrolador que receberá dados do módulo 2 e os comparará com uma referência interna a fim de emitir dados de controle para o módulo 2. Também compreende o módulo um visor de indicação do valor da corrente bem como do ganho aplicado pelo circuito.



**Figura 30 – Organização do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR)**

### 3.2 - Definição das faixas de aplicação do dispositivo

A premissa principal do projeto de construção do dispositivo consiste na definição da faixa de operação do equipamento. A partir de tal definição, todo o desenvolvimento subsequente se embasará, uma vez que será projetado para atender a demanda especificada.

Observando a justificativa de desenvolvimento do projeto, é notada a possibilidade de trabalho em linhas com presença de correntes harmônicas, as quais se apresentam como sinais múltiplos da frequência fundamental, 50 ou 60Hz no contexto industrial. Por serem múltiplas, as ondas harmônicas apresentam frequência maior do que a apresentada na rede industrial, e tal fator deve ser analisado na definição da faixa de frequência do dispositivo em construção.

Para tanto, é definido que o equipamento operará em faixa de frequência a qual seja possível a aferição de variações nas grandezas da 19ª onda harmônica. Isso implica que o dispositivo trabalhará em uma faixa de frequência de cerca de 1140Hz, que é 19 vezes a maior frequência apresentada em redes comuns, 60Hz. Para fins de projeto, é definida a frequência de 1,2kHz como faixa de trabalho para a aplicação e que influenciará nas demais definições para a construção do dispositivo.

Além da definição dessa faixa, é válido analisar as amplitudes máximas de trabalho do equipamento, uma vez que seu princípio de funcionamento consistirá em amplificar os pequenos sinais e atenuar os de valores elevados automaticamente. Para tanto, observando novamente o contexto de emprego do dispositivo, é definido que sua mínima atuação se dará em correntes de 500mA, as quais são facilmente aferidas por dispositivos comuns, sem a necessidade da funcionalidade que a aplicação proposta almeja.

Para o seu limite superior de operação, é analisado o ponto em que inúmeros equipamentos comerciais de aferição de corrente elétrica indicam a substituição de suas pontas de operação, 10A. Nesse contexto, é observado um ganho de 20A/A entre o limite mínimo definido para a aplicação e o valor apresentado acima. A operação nessa faixa, por si só, não justificaria a construção do dispositivo, uma vez que se utilizada como faixa de amplitude, equipamentos de medição de corrente comuns seriam melhor empregados na tarefa. Portanto, é definida como faixa de amplitudes do dispositivo o quádruplo do ganho apresentado, o que resulta em aplicações de amplificação ou atenuação de até 100A/A. Isso implica em leituras máximas de 50A.

Por fim, é desejável também que o equipamento contemple a aferição de cargas contínuas, como as presentes em sistemas retificados.

A tabela 1 abaixo indica os valores definidos como parâmetros para o projeto do dispositivo.

<b>Frequência de Operação</b>	1,2kHz
<b>Faixa de Leitura</b>	0,5A – 50A
<b>Sinal de Leitura</b>	AC/DC

Tabela 1 - Parâmetros de Projeto.

### 3.3 - Definição do Microcontrolador do Dispositivo

A próxima premissa do projeto consiste na definição de um dispositivo microcontrolador para receber e emitir dados para toda a circuitaria a ser desenvolvida. Ele tem de ser capaz interpretar os dados enviados a seus terminais de entrada a fim de gerar sinais em seus terminais de saída para o controle do ganho de amplificação do circuito amplificador a ser projetado, tem de

ser capaz de gerar comparações e gerar referencias internas, sintetizando 3 atividades apresentadas pelo módulo 03 do diagrama do dispositivo.

Além de contar com *ports* de escrita e leitura, o mesmo de possuir uma forma não volátil de armazenar um código para o controle de seus terminais de saída. Isso implica na necessidade de uma unidade de memória interna ao dispositivo microcontrolador, como uma memória flash.

Por fim, também é observada a necessidade da unidade microcontrolada contar com um bom conversor analógico digital, de ampla resolução de medida, uma vez que o intuito da produção do trabalho é a obtenção de ganho de resolução na medida de correntes elétricas.

Observado tais parâmetros, foi definido como microcontrolador do projeto um dispositivo que além de contar com todas as demandas apresentadas, é acessível, possui baixo custo e é de fácil implementação, o Arduino *UNO*.

### 3.3.1 - Arduino *UNO*

A figura 31 apresenta o Arduino *UNO*, uma plataforma de prototipagem eletrônica desenvolvida a partir do microcontrolador ATmega328p, um microcontrolador de alta performance Atmel AVR de 8 bits.



Figura 31 - Arduino *UNO*. (EMBARCADOS, 2013)

Das demandas apresentadas para a definição do microcontrolador, o Arduino *UNO* possui pinos de entrada e saída digitais e pinos de entradas analógicas em quantidade mais do que suficiente para a aplicação, possui internamente uma memória flash de 32KB para o armazenamento de códigos no



interior do microcontrolador com a possibilidade de sobrescreve-los, facilitando assim os testes de desenvolvimento e possui também um conversor analógico digital de 10bits. Por ser um periférico ao microcontrolador, seus 2bits a mais de resolução são um diferencial da escolha do dispositivo, uma vez que toda a leitura realizada pelo microcontrolador estará compreendida entre 1023 valores.

Outro fator importante para a análise é a frequência em que o Arduino pode trabalhar, mais precisamente a frequência em que pode amostrar dados presentes em seus terminais. Pela teoria de amostragem de nyquist, para que não ocorra um falseamento no sinal amostrado, é necessário que a amostragem se mostre no mínimo 2x maior que a frequência do sinal amostrado. Dado que é definido como frequência de trabalho do sinal 1,2kHz, o Arduino se mostra capaz de realizar amostragens para tal sinal, uma vez que possui em sua estrutura de hardware um cristal de 16MHz, o qual garante ao dispositivo capacidade de amostragem bem superior a duas vezes o valor definido.

Além disso, o dispositivo conta com demais funcionalidades como comunicação serial, interrupção externa, PWM, SPI, I2C, USART dentre outros.

### **3.4 - Definição do Sensor de corrente**

O objetivo do trabalho relatado é tratar dados de medições elétricas de corrente elétrica. Portanto todo o desenvolvimento subsequente precisa ser projetado de acordo com as características que o elemento primário de corrente irá apresentar bem como da central que receberá tais dados, já definida. Para tanto, das diversas maneiras disponíveis de se aferir corrente elétrica, foi definido o efeito hall como forma, tendo como principal fator positivo a medição tanto de correntes alternadas como sinais contínuos.

Tendo como ponto de partida tal definição, visou-se na escolha do elemento uma grande faixa de medição, uma vez que correntes de baixo valor escalar possuem facilidade de medição e não necessitam de circuitos para adequar suas características à entrada de sistemas microcontrolados. Por se tratar de medições envolvendo microcontroladores, outro ponto determinante na escolha do sensor é o offset de saída que ele apresenta. Sinais com offset dificultariam um pouco mais o projeto do circuito de conversão do sinal, uma vez que seria necessário a eliminação do mesmo para um maior range de leitura pelo microcontrolador. Tais características tornam o uso dos comuns sensores

ACS712, aqui mencionados, questionável, uma vez que o sensor muito utilizado em comunicações com sistemas embarcados, mas peca nas premissas de projeto desejada.

De forma a atender de maneira mais que satisfatória todas as características pleiteadas pelo projeto, foi definido como sensor de corrente para este desenvolvimento o sensor LA 55-p, fabricado pela LEM Eletronics

### **3.4.1 - Características e Funcionamento do Sensor**

O sensor de corrente definido para o circuito, como descrito em sua folha de dados (LEM, 2018), é um dispositivo de efeito *hall* de circuito fechado que possui como características a possibilidade de aferição de corrente contínuas e alternadas de até 50A em média, com um range máximo de 70A de medição, com uma taxa de incerteza de 0,65% apenas, o que garante ao dispositivo boa precisão e segurança.

O sensor conta com 3 terminais de comunicação externa, ideais para fixação em PCB, e um furo central para passagem do cabo a qual a corrente será aferida. Ele ainda conta, em seu encapsulamento, com um indicativo visual do sentido da corrente aferida e da nomenclatura de seus terminais. De seus 3 pinos de comunicação externa, 2 são para alimentação simétrica a qual o dispositivo necessita, sendo a faixa de  $\pm 12\text{v}$  à  $\pm 15\text{V}$  ideal para o seu funcionamento. O seu terceiro pino, apresentado pela letra M, como pode ser visualizado na figura 32 é o pino de medição de corrente. Nele, é forçada a passagem de uma corrente elétrica  $I_H$  equivalente à milésima parte da corrente  $I_E$  que circula pelo cabo aferido. Isso implica no desenvolvimento de um circuito externo para a conversão desse valor de corrente para um valor de tensão, grandeza a qual os microcontroladores conseguem trabalhar bem.

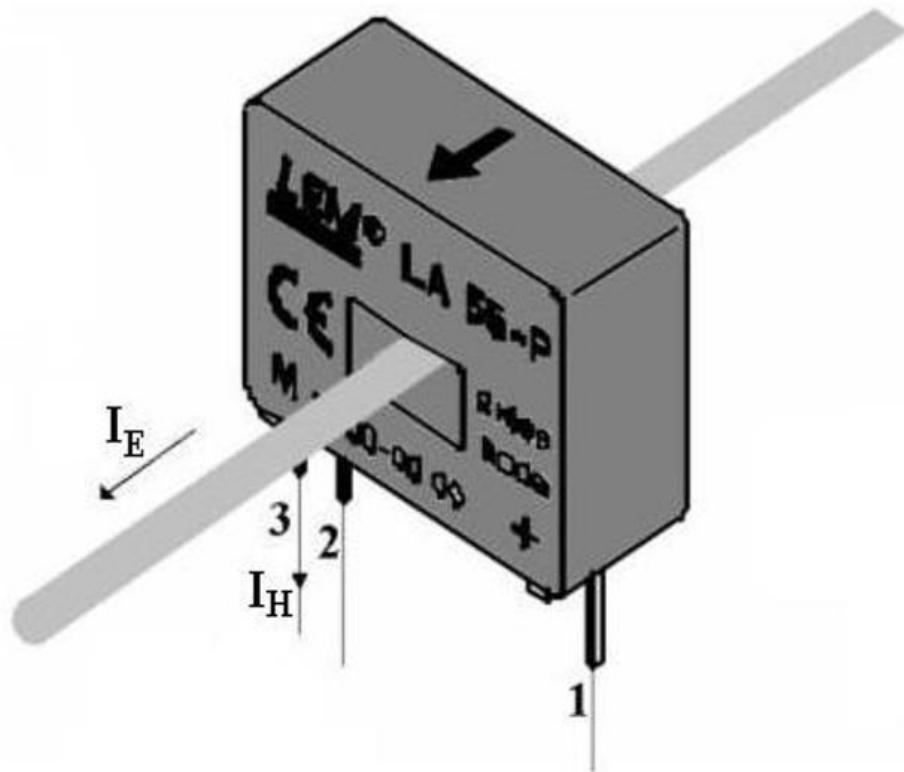


Figura 32 - Pinos e Sentido de Uso do Dispositivo.(TAMBARA; FLORA; GRÜNDLING, 2015)

### 3.5 - Circuito Conversor

Como apresentado, o sensor de corrente definido para o projeto necessita de um circuito auxiliar para leitura do valor de corrente de maneira simples, por microcontroladores, como é o caso desse desenvolvimento. A Função de tal circuito é produzir uma tensão  $V_H$  a partir da corrente  $I_H$ . Para isso, foi observada a máxima leitura em tensão que o dispositivo microcontrolado suporta, 5V.

Como mencionado, o sensor de corrente trabalha com correntes até a faixa de 50A. Nessa faixa máxima, em seu pino de medição, circula uma corrente atenuada em 1000 vezes, possuindo valor escalar de 0,05A. Portanto, projetando o circuito para o valor extremo de corrente de saída do sensor de corrente e para o máximo valor de entrada do microcontrolador temos:

$$V = r \times i \quad (17)$$

$$5 = r \times 0,05 \rightarrow r = 100\Omega \quad (18)$$

Portanto, o elemento que condicionará a leitura de tensão a partir da corrente aferida é um resistor de 100Ω. Além disso, a fim de linearizar a entrada

de tensão do dispositivo e garantir fixa a referência (GND) do sensor é necessário a inserção de capacitores eletrolíticos em paralelo com a alimentação simétrica que o sensor admite. O valor desses capacitores foi definido em  $1\mu\text{F}$ , sendo suficiente para desacoplar possíveis variações provenientes da fonte de alimentação. Com as premissas definidas acima, foi projetado um circuito no software PROTEUS para a realização da tarefa determinada. O circuito é apresentado na figura 33 abaixo.

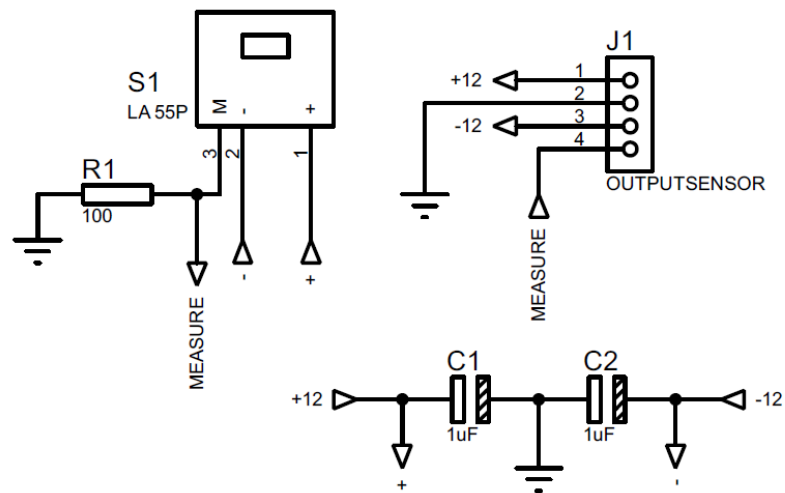


Figura 33 - Circuito Condicionador Projetado. (PRÓPRIO AUTOR)

Com essa pequena circuitaria desenvolvida, deu-se início na fabricação de uma placa para a acomodação dos componentes e melhor comunicação das saídas com os futuros circuitos subsequentes. A figura 34 mostra o layout do pequeno circuito e sua futura representação física.

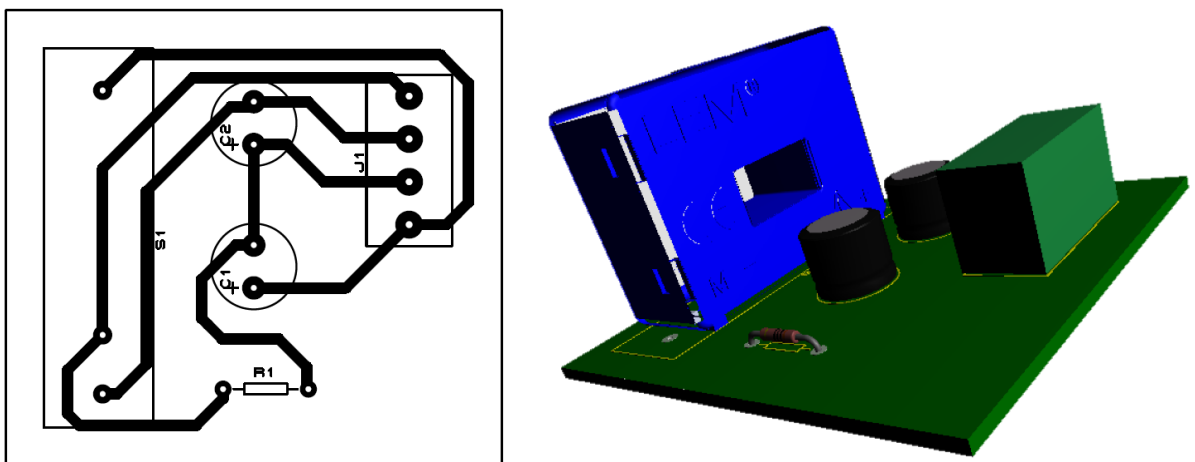


Figura 34 - Placa do Circuito Projetado. (PRÓPRIO AUTOR)

Por ser um pequeno circuito, não se viu a necessidade de construção de uma placa de circuito impresso, como a modelada acima. Isso porque uma pequena matriz de furos é capaz de comportar os componentes mostrados acima e cumprir com eficácia a mesma função da PCB esquematizada. Logo, a placa construída em uma matriz de furos é apresentada na figura 35 a seguir.

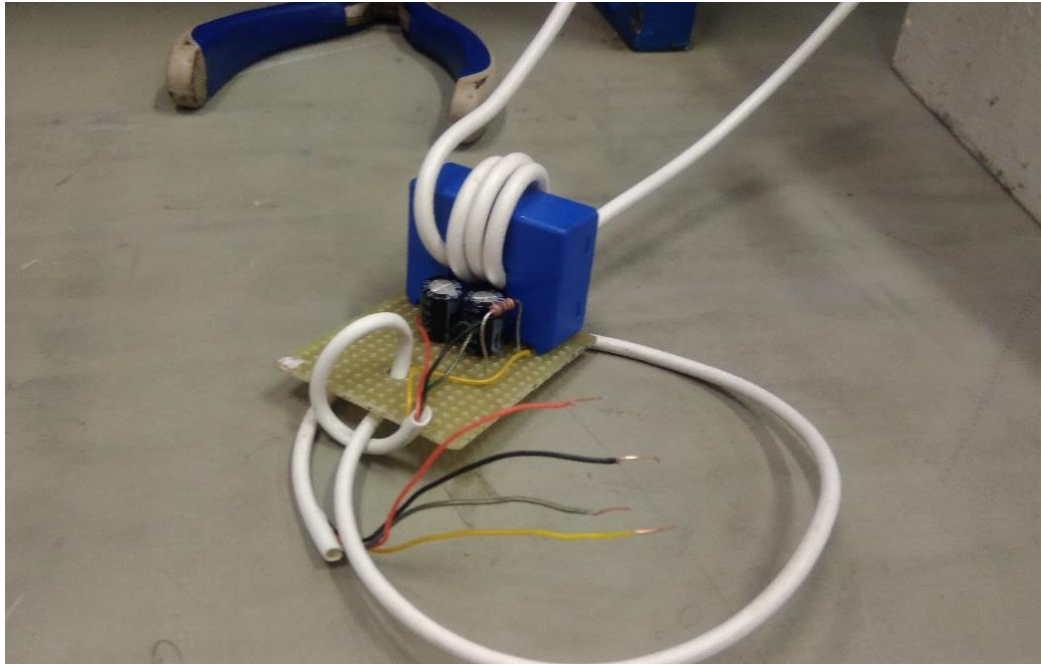


Figura 35 - Projeto Desenvolvido. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.6 - Circuito Amplificador

A parte central do dispositivo desenvolvido, compreendendo todo o módulo 2 do organograma de funcionamento, consiste em um estágio amplificador que atuará no sinal de corrente elétrica e amplificará ou atenuará sua amplitude para melhor leitura em seu dispositivo microcontrolador. A função se assemelha, como já mencionado, ao *AutoSET* de dispositivos osciloscópios.

Em seu projeto, primeiramente, foi definido qual dispositivo atuaria no controle de ganho do circuito, uma vez que para apresentar o comportamento esperado, o elemento deve atuar no circuito eletrônico, alterando seu ganho por comandos da central microcontrolada.

#### 3.6.1 - Definição do Atuador do Circuito

Então foi analisada a inclusão na topologia amplificadora de um potenciômetro digital. Esse dispositivo atua como um potenciômetro comum, mas altera sua resistência interna de acordo com sinais elétricos incidentes em suas portas, como sinais de tensão, pulsos ou informações de graus, variando de dispositivo para dispositivo.

Para a aplicação nesse projeto foi definido como elemento ativo no circuito de ganho o potenciômetro digital X9C103.

### 3.6.2 - Potenciômetro Digital X9C103

O potenciômetro digital X9C103 é um circuito integrado apresentado nas topologias DIP-8 e SO-8 (*smd*) que possui 8 pinos externos à disposição de seu usuário. O dispositivo é apresentado na figura 36 abaixo.

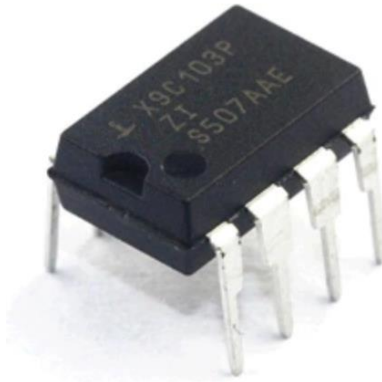


Figura 36 - Potenciômetro Digital X9C103.(ALIBABA, 2019)

O dispositivo se assemelha a um potenciômetro analógico de 10k $\Omega$  e possui 100 divisões internas igualmente espaçadas as quais podem ser configuradas via entradas de controle do dispositivo. O datasheet do componente (RENESAS, 2019) apresenta a configuração dos 8 pinos do dispositivo, os quais são apresentados na figura 37 abaixo.

X9C102, X9C103, X9C104, X9C503  
(8 LD SOIC, 8 LD PDIP)  
TOP VIEW

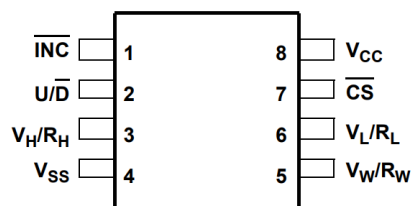


Figura 37 - Pinagem do X9C103.(RENESAS, 2019)

Como apresentado, além dos pinos de alimentação do dispositivo (4-Vss, 8-Vcc) ele conta com 3 pinos de controle (1-INC, 2-U/D, 3-CS) e 3 pinos que se comportam como os 3 terminais do potenciômetro analógico comum (2-Vh/Rh, 5-Vw/Rw, 6-Vl/Rl). Seus pinos de controle e de resistência são organizados internamente de acordo com o diagrama apresentado na figura 38 abaixo.

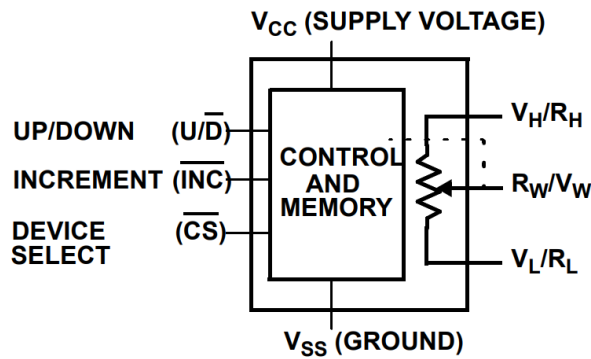


Figura 38 - Diagrama Interno X9C103.(RENESAS, 2019)

O pino Vcc é um pino de entrada para a alimentação do dispositivo, que admite tipicamente uma tensão de 5V. O pino Vss é a referência do dispositivo. Ele é o pino terra (ground) e admite a tensão 0V em seu terminal. O pino UP/DOWN determina se o dispositivo irá incrementar o valor de resistência de seus terminais resistivos ou irá decrementar esse valor. Um valor HIGH em seu terminal (5V) determina a elevação do valor da resistência do dispositivo e um valor LOW em seu terminal (0V) determina a diminuição do valor da resistência. O pino INCREMENT é um pino de entrada que determina o incremento ou decremento do valor da resistência de acordo com a borda de descida de seu terminal. A cada borda de descida é acrescido ou decrescido o valor da resistência.

O pino DEVICE SELECT ou CHIP SELECT permite a atuação dos dois pinos anteriores no controle da resistência de saída do dispositivo quando ele está submetido a uma entrada LOW (0V) em seu terminal e armazena o último valor de resistência elétrica quando submetido a uma entrada HIGH (5V). Os pinos V<sub>H</sub>/R<sub>H</sub> e V<sub>L</sub>/R<sub>L</sub> são pinos de saída do dispositivo e se assemelham aos pinos externos do potenciômetro analógico. Em funcionamento, (CS LOW), a resistência entre esses dois terminais é de 10kΩ, resistência total do dispositivo. O pino R<sub>w</sub>/V<sub>w</sub> apresenta o *wiper* do dispositivo. O *wiper* é um pino de saída do dispositivo e se assemelha ao pino central do potenciômetro analógico, e em

estado de funcionamento, apresenta uma resistência entre seus terminais de extremidade análoga ao comando aplicado pelos pinos de controle.

Em síntese, as configurações assumidas pelo dispositivo se encontram na figura 39 abaixo.







$\overline{CS}$	$\overline{INC}$	$\overline{U/D}$	MODE
L		H	Wiper Up
L		L	Wiper Down
	H	X	Store Wiper Position
H	X	X	Standby Current
	L	X	No Store, Return to Standby
	L	H	Wiper Up (not recommended)
	L	L	Wiper Down (not recommended)

Figura 39 - Configurações do Dispositivo.(RENESAS, 2019)

Como apresentado acima, as tratativas utilizadas no microcontrolador para ativar a resistência do dispositivo se darão nas duas primeiras opções apresentadas no seu modo de operação.

Para a aplicação no projeto do circuito de controle foi definido a utilização do dispositivo em um módulo que separa em dois barramentos a parte dedicada ao controle da parte destinada a resistência, como apresentado na figura 40 a seguir.

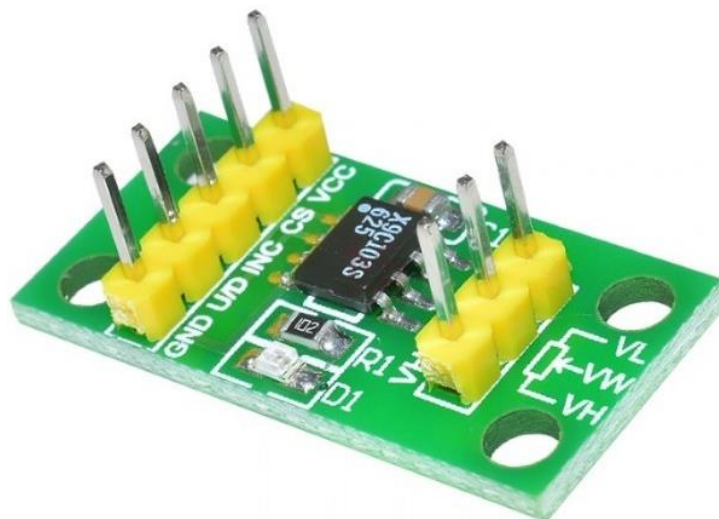


Figura 40 - Módulo Potenciômetro Digital X9C103.(SOLTAU, 2018)



### 3.6.3 – Projeto do Circuito

Definido o elemento atuador que comunicará o dispositivo microcontrolado com o futuro circuito amplificador, o seu projeto pôde ser iniciado.

Como premissas definidas para o desenvolvimento dessa circuitaria, é válido ressaltar as amplitudes de entrada definidas para esse circuito, 0,5 a 50A definidas pelo sensor de corrente, a frequência de trabalho desse circuito, 1,2kHz e da aplicação de um potenciômetro de 10k $\Omega$ .

Nessas condições, foi pleiteado como circuito amplificador do projeto uma topologia com a utilização de amplificadores operacionais. Sua limitação de escolha se dá na frequência do sinal amplificado e em seu ganho máximo nessa faixa de frequência, uma vez que há limitações no ganho dos operacionais em aplicações de frequência elevada. Inicialmente, é pleiteada a utilização da topologia subtratora, que amplifica ou atenua a diferença de potencial incidente em suas entradas. Sua topologia é apresentada na figura 41 a seguir.

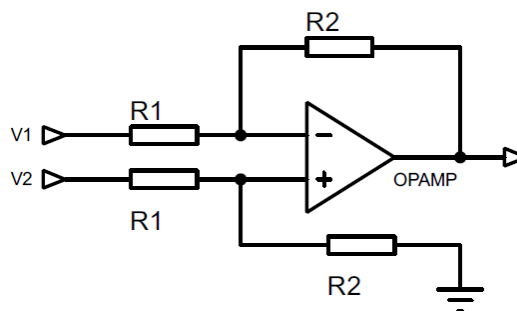


Figura 41 - Topologia Subtratora. (PRÓPRIO AUTOR)

Na topologia, pode ser analisado a semelhança dos resistores da parte superior e inferior do circuito, tanto em posição, quantidades e valores de resistência. O circuito por si só possui um ganho fixo, apresentado pela equação 5, definido como  $R_2/R_1$  multiplicado pela diferença de potencial incidente ao circuito. Para a alteração do ganho aplicado a diferença de tensão de entrada, é necessária a alteração de  $R_1$ ,  $R_2$  ou ambos. Nesse contexto, foi definido a inserção do dispositivo X9C103, escolhido como atuador do circuito em substituição a ambos os resistores. Como o circuito apresenta dois resistores semelhantes ligados tanto a porta inversora quanto a porta não inversora do dispositivo amplificador, foram definidos o trabalho de 2 potenciômetros digitais para a aplicação. O circuito apresentado pela figura 42 apresenta a aplicação do dispositivo X9C103 em substituição dos resistores analógicos.

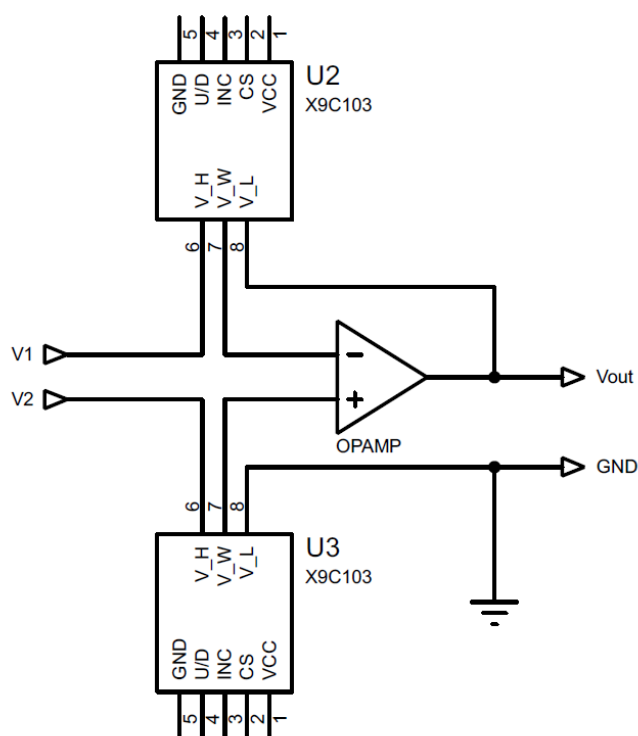


Figura 42 - Potenciômetros Digitais no Circuito de Amplificação. (PRÓPRIO AUTOR)

Após a inserção dos potenciômetros digitais, foi definido o amplificador operacional para a aplicação. Ele necessita prioritariamente operar na faixa de aplicação do dispositivo, sem apresentação de perdas. Nesse contexto, é definido como dispositivo ativo de amplificação do circuito o TL071.

O TL071 (TEXAS INSTRUMENTS, 2017) é um circuito integrado amplificador operacional de baixo ruído, composto de dispositivo JFET em suas entradas, o que lhe garante enorme resistência de entrada, na casa de  $10^{12}\Omega$ , possui faixa de frequência de 3MHz, baixa corrente de alimentação e tensão máxima de alimentação na casa dos 18V. Sua escolha se deu pela fácil disponibilidade de acesso ao dispositivo, bem como pelo atendimento às demandas estabelecidas pelo projeto.

A figura 43 apresenta um gráfico de resposta em frequência do dispositivo onde é possível notar que para a faixa de frequência de atuação do dispositivo, 1,2kHz, ele possui um ganho muito superior ao máximo ganho proposto pelo dispositivo, de 100A/A ou 100V/V visualizada a proporcionalidade garantida pela Lei de Ohm. Na frequência acima citada, o ganho pode ser aproximado por um valor acima de  $10^3$  V/V.

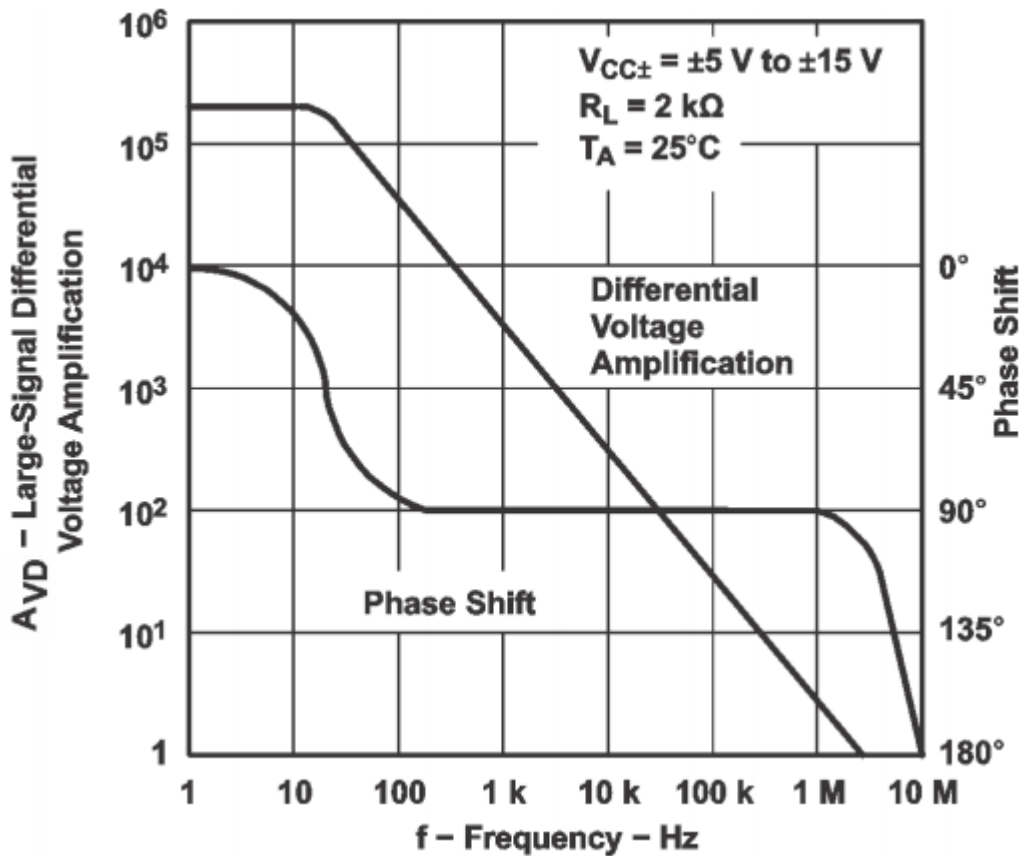


Figura 43 - Resposta em Frequência do TL071.(TEXAS INSTRUMENTS, 2017)

Após a definição acima, é proposto o isolamento dos sinais de entrada do circuito amplificador. Mesmo o dispositivo amplificador TL071 apresentando uma impedância de entrada elevada, o sinal do circuito condicionador percorre os dispositivos X9C103 antes de ser aplicado ao amplificador. O intuito da proteção extra é isolar eletronicamente o circuito condicionador dos potenciômetros digitais. Com tal característica definida, foi inserido nas entradas  $V_1$  e  $V_2$  amplificadores operacionais a fim de “bufferizar” as entradas, como apresenta a figura 44 a seguir.

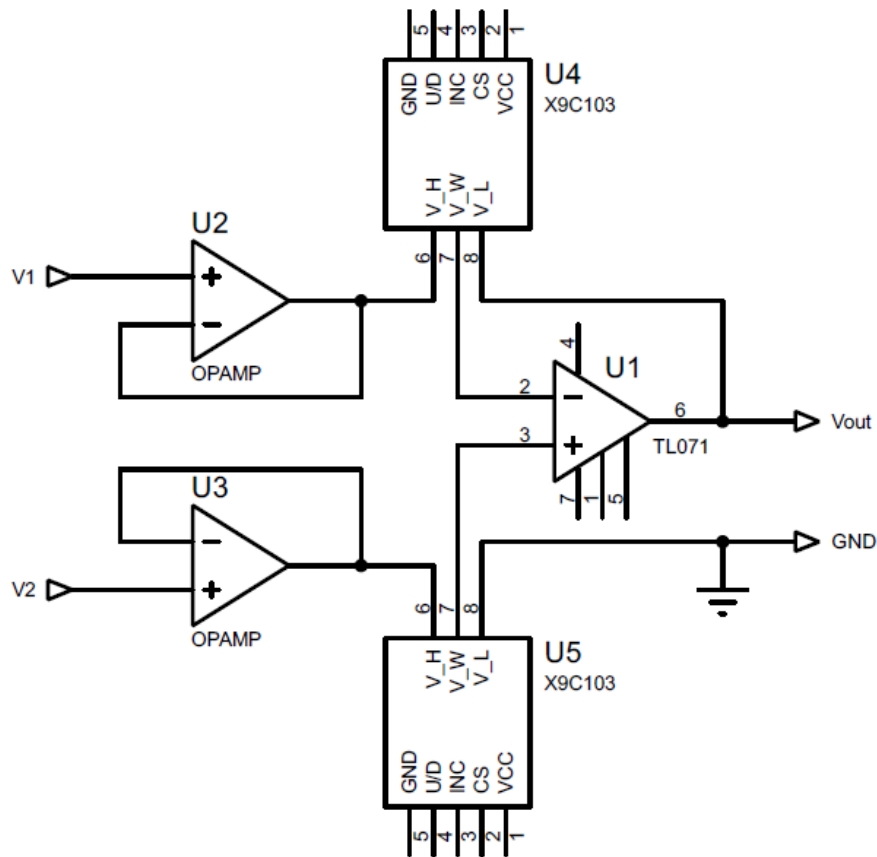


Figura 44 - Circuito com Isolamento das Entradas. (PRÓPRIO AUTOR)

Por fim, é percebido que o circuito acima muito se assemelha ao Amplificador de instrumentação, o qual possuem um estágio a mais de amplificação controlado por alocação de resistores anteriores a entrada do amplificador subtrator. A utilização de tal topologia é interessante uma vez que permite ao dispositivo um ganho estático independente da atuação do potenciômetro digital, o que pode ser muito bem aplicável em algumas situações. Na figura 45 é apresentado o circuito com as ligações dos *buffer's* de entrada sob ligação de resistores. Eles, para a aplicação, foram alocados de tal forma a dobrar o valor de tensão de entrada, produzindo um ganho de  $2V/V$  estático ao circuito total. Os dispositivos amplificadores utilizados foram os mesmos do dispositivo já empregado, o TL071 e os resistores possuem os valores de  $1k\Omega$  em ambos R1 e  $2k\Omega$  em R2.

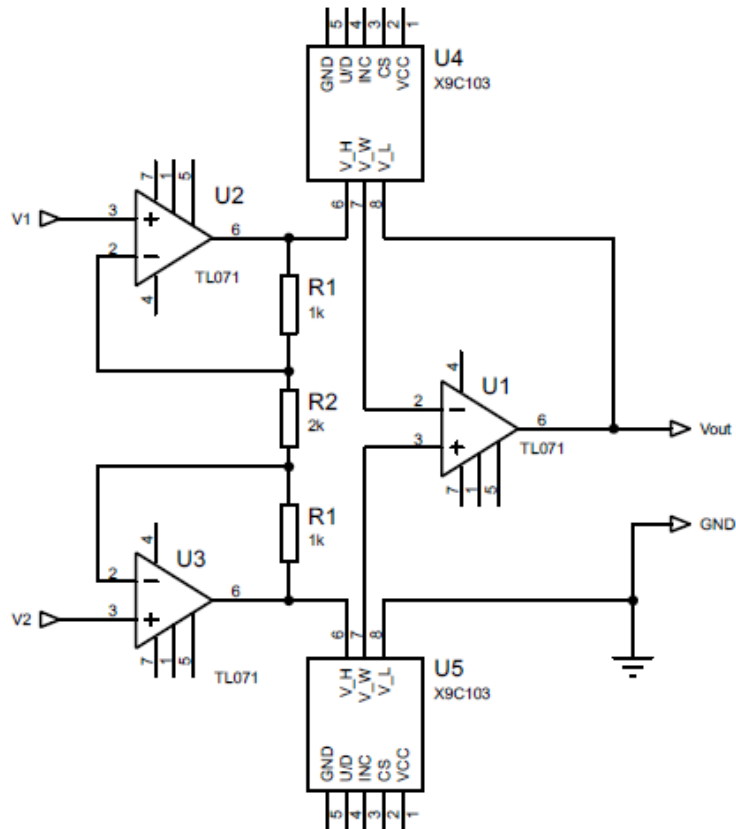


Figura 45 - Circuito Amplificador de Instrumentação Desenvolvido. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.6.4 – Ganhos do Circuito Projetado

O circuito apresentado acima é um circuito interativo que responde a impulsos advindos de uma central microcontrolada. Ele responde a tais impulsos alterando o ganho do circuito com a alteração da resistência interna de seus potenciômetros digitais. A tabela 2 apresenta os valores assumidos pelas resistências  $R_1$  e  $R_2$  internas ao potenciômetro digital, o qual consegue escalonar por 100x o valor da sua resistência de maneira idêntica. Os valores apresentados pela tabela se encontram em ohm's e a soma do valor indicado na primeira linha e na primeira coluna da tabela indica, de 1 a 100 o valor de cada uma das 100 possíveis configurações internas do potenciômetro digital. Como exemplo, ao se escolher a vigésima quarta posição do dispositivo digital, se obtém um valor de  $7676,77\Omega$  para  $R_1$  e  $2323,23\Omega$  para  $R_2$ . É válido notar que a soma de ambos resulta no valor total do potenciômetro digital,  $10k\Omega$ , assim como o potenciômetro analógico.

Valores Assumidos por R1										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	10000,00	8989,90	7979,80	6969,70	5959,60	4949,49	3939,39	2929,29	1919,19	909,09
2	9898,99	8888,89	7878,79	6868,69	5858,59	4848,48	3838,38	2828,28	1818,18	808,08
3	9797,98	8787,88	7777,78	6767,68	5757,58	4747,47	3737,37	2727,27	1717,17	707,07
4	9696,97	8686,87	7676,77	6666,67	5656,57	4646,46	3636,36	2626,26	1616,16	606,06
5	9595,96	8585,86	7575,76	6565,66	5555,56	4545,45	3535,35	2525,25	1515,15	505,05
6	9494,95	8484,85	7474,75	6464,65	5454,55	4444,44	3434,34	2424,24	1414,14	404,04
7	9393,94	8383,84	7373,74	6363,64	5353,54	4343,43	3333,33	2323,23	1313,13	303,03
8	9292,93	8282,83	7272,73	6262,63	5252,53	4242,42	3232,32	2222,22	1212,12	202,02
9	9191,92	8181,82	7171,72	6161,62	5151,52	4141,41	3131,31	2121,21	1111,11	101,01
10	9090,91	8080,81	7070,71	6060,61	5050,51	4040,40	3030,30	2020,20	1010,10	0,00
Valores Assumidos por R2										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	0,00	1010,10	2020,20	3030,30	4040,40	5050,51	6060,61	7070,71	8080,81	9090,91
2	101,01	1111,11	2121,21	3131,31	4141,41	5151,52	6161,62	7171,72	8181,82	9191,92
3	202,02	1212,12	2222,22	3232,32	4242,42	5252,53	6262,63	7272,73	8282,83	9292,93
4	303,03	1313,13	2323,23	3333,33	4343,43	5353,54	6363,64	7373,74	8383,84	9393,94
5	404,04	1414,14	2424,24	3434,34	4444,44	5454,55	6464,65	7474,75	8484,85	9494,95
6	505,05	1515,15	2525,25	3535,35	4545,45	5555,56	6565,66	7575,76	8585,86	9595,96
7	606,06	1616,16	2626,26	3636,36	4646,46	5656,57	6666,67	7676,77	8686,87	9696,97
8	707,07	1717,17	2727,27	3737,37	4747,47	5757,58	6767,68	7777,78	8787,88	9797,98
9	808,08	1818,18	2828,28	3838,38	4848,48	5858,59	6868,69	7878,79	8888,89	9898,99
10	909,09	1919,19	2929,29	3939,39	4949,49	5959,60	6969,70	7979,80	8989,90	10000,00

**Tabela 2 - Valores Assumidos pelo Potenciômetro Digital.**

A tabela 3 apresenta os 100 possíveis ganhos que o circuito de amplificação poderá apresentar ao ser submetido as resistências apresentadas pela tabela 2. Os ganhos são calculados a partir do trabalho paralelo de ambos os potenciômetros digitais e através da equação 11.

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	0,00	0,11	0,25	0,43	0,68	1,02	1,54	2,41	4,21	10,00
2	0,01	0,13	0,27	0,46	0,71	1,06	1,61	2,54	4,50	11,37
3	0,02	0,14	0,29	0,48	0,74	1,11	1,68	2,67	4,82	13,14
4	0,03	0,15	0,30	0,50	0,77	1,15	1,75	2,81	5,19	15,50
5	0,04	0,16	0,32	0,52	0,80	1,20	1,83	2,96	5,60	18,80
6	0,05	0,18	0,34	0,55	0,83	1,25	1,91	3,12	6,07	23,75
7	0,06	0,19	0,36	0,57	0,87	1,30	2,00	3,30	6,62	32,00
8	0,08	0,21	0,38	0,60	0,90	1,36	2,09	3,50	7,25	48,50
9	0,09	0,22	0,39	0,62	0,94	1,41	2,19	3,71	8,00	98,00
10	0,10	0,24	0,41	0,65	0,98	1,47	2,30	3,95	8,90	-

**Tabela 3 - Ganhos Possíveis do Dispositivo.**

### 3.6.5 - Proteções no Circuito Amplificador

Ao se identificar novamente as premissas do projeto, é notada a possibilidade de leituras de corrente alternada. Atenuada ou amplificada, tal sinal incidirá sobre o dispositivo microcontrolador oscilando entre polos negativos e positivos. O Arduino *UNO* possui uma limitação em relação a suas entradas as quais não permitem leituras de sinais fora da faixa de 0-5V. Isso impossibilita a leitura da parte negativa de sinais alternado. A alternativa adotada para contornar tal empecilho é aplicar um ganho DC ao sinal de entrada do microcontrolador, elevando seu valor constantemente por metade do range de entrada da porta do microcontrolador. A figura 46 apresenta a solução para o offset de 2,5V proposto. A topologia subtratora permite a aplicação de ganho DC sem interferência no ganho do circuito como apresentado pelas equações 9 e 10. Portanto é proposto a inserção de um divisor de tensão fixo que aplicará constantemente uma tensão fixa de 2,5V ao terminal do potenciômetro que se encontrava aterrado. Como o divisor tem caráter resistivo, colocá-lo em serie com o circuito amplificador principal induziria efeito de carga ao circuito e alteraria sua fórmula de ganho, uma vez que contaria com resistências em série. Para o isolamento do divisor e do circuito é acrescido um *buffer* à saída do divisor. Como seu valor é de 2,5V, foi proposto um divisor com 2 resistores de 10kΩ atuantes sobre uma tensão de 5V, proveniente do microcontrolador. O cálculo para a obtenção da tensão de *offset* é apresentado na equação 19.

$$V_{\text{offset}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} * V_{\text{in}} \rightarrow V_{\text{offset}} = \frac{10\text{k}}{10\text{k} + 10\text{k}} * 5 \rightarrow V_{\text{offset}} = 2.5V \quad (19)$$

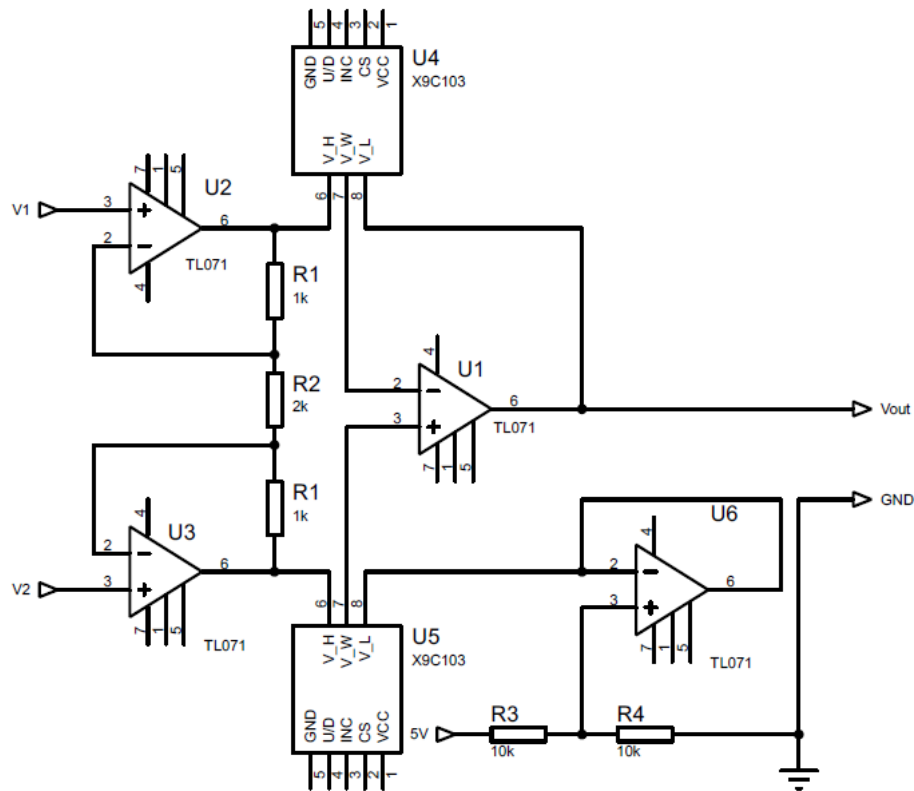


Figura 46 - Circuito com *Offset*. (PRÓPRIO AUTOR)

Além do *offset*, que possibilita a entrada de sinais de polaridade negativa no microcontrolador, foi observado a necessidade de proteger a entrada analógica contra sinais de amplitude superior a 5V provenientes do circuito de amplificação e proteger a entrada analógica de uma possível queima, isso porque a impedância de saída dos amplificadores operacionais é muito baixa, o que pode levar o microcontrolador a drenar muita corrente do dispositivo.

Como apresentado pela figura 47, para a resolução dos problemas apontados, foi colocado em serie com a saída  $V_{out}$  do dispositivo um resistor de 1kΩ e em paralelo a saída um diodo *zener* de valor 5.1V. Ambos se mostraram componentes de fácil acesso e práticos para a aplicação no circuito amplificador.



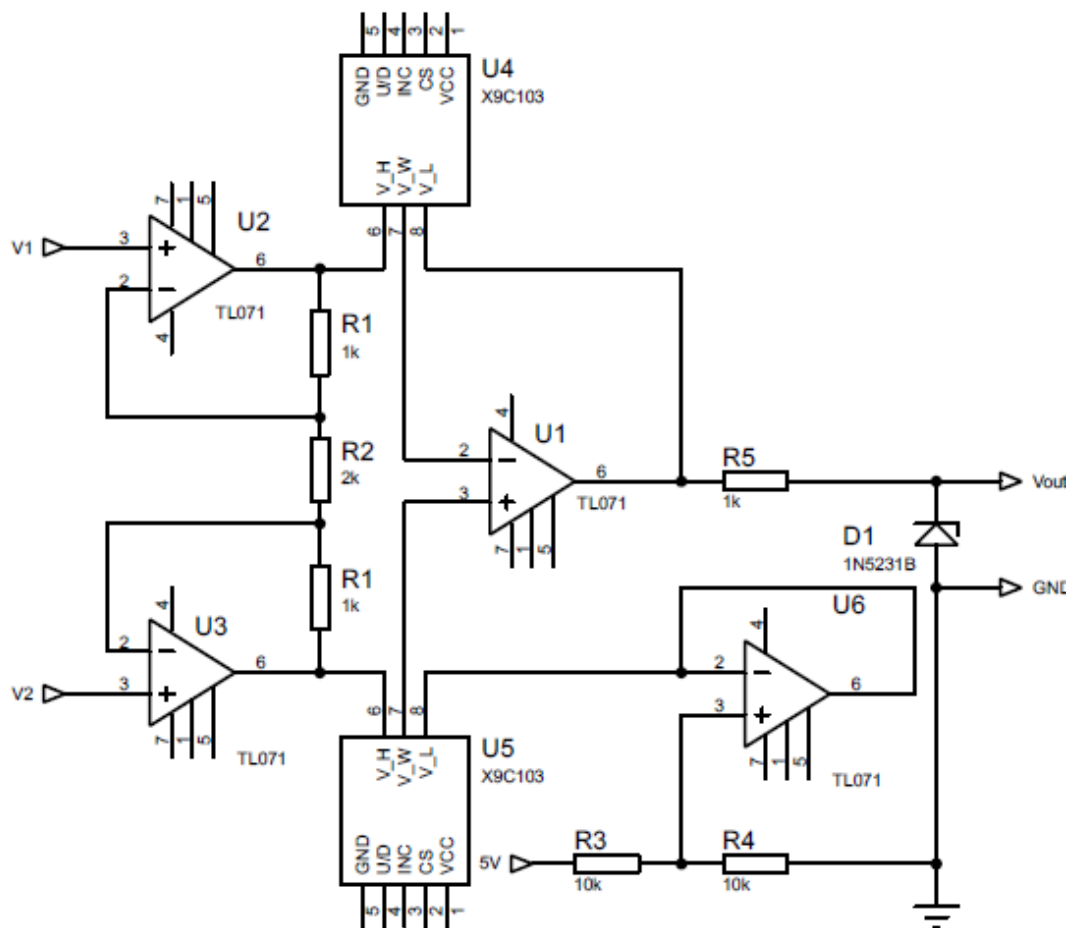


Figura 47 - Proteção para o microcontrolador. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.7- Alimentação do Dispositivo

Para seu total funcionamento, o dispositivo deve contar com uma fonte de alimentação com alguns níveis de tensão, fonte a qual pertence ao módulo 2 do organograma de distribuição. Os amplificadores operacionais exigem para sua correta operação uma alimentação simétrica na casa dos  $\pm 12V$  e os potenciômetros digitais e o microcontrolador trabalham com a tensão entre 0 e 5V. Para o atendimento de ambas as demandas, foi desenvolvido um circuito que recebe a alimentação simétrica de uma fonte externa, fonte a qual pode ser desenvolvida com 2 pequenas baterias de 12v em série, a desacopla através de capacitores, a fim de deixá-la a mais estável possível e a converte para o nível de tensão de 5V, para a alimentação dos dispositivos necessários. A figura 48 apresenta o circuito desenvolvido para a realização da tarefa, o qual conta com o auxílio do regulador de tensão LM7805 e de 2 capacitores polarizados para a linearização do sinal de saída.

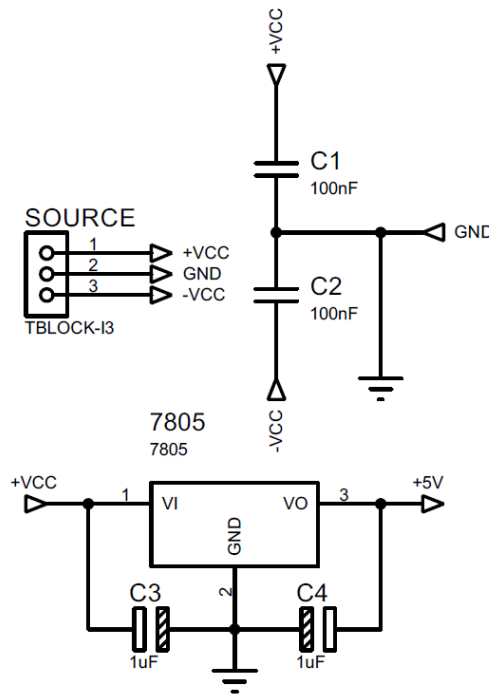


Figura 48 - Fonte de Alimentação. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.8 – Projeto da Placa do Circuito

Para a melhor interação dos circuitos projetados, os quais compõe o módulo 2 do organograma de distribuição, é desenvolvida uma placa de circuito impresso. Para seu projeto, os circuitos desenvolvidos bem como as suas respectivas conectividades entre si e entre circuito e equipamentos de outros módulos são desenvolvidos em uma única placa, como apresentado pela figura 49. Esse circuito contempla todo o módulo 2 do dispositivo, sendo uma ponte completa entra os módulos 1 e 3. O circuito desenhado conta com a ligação através de *labels*, as quais evitam encavalamento de linhas e deixa seu entendimento melhor.

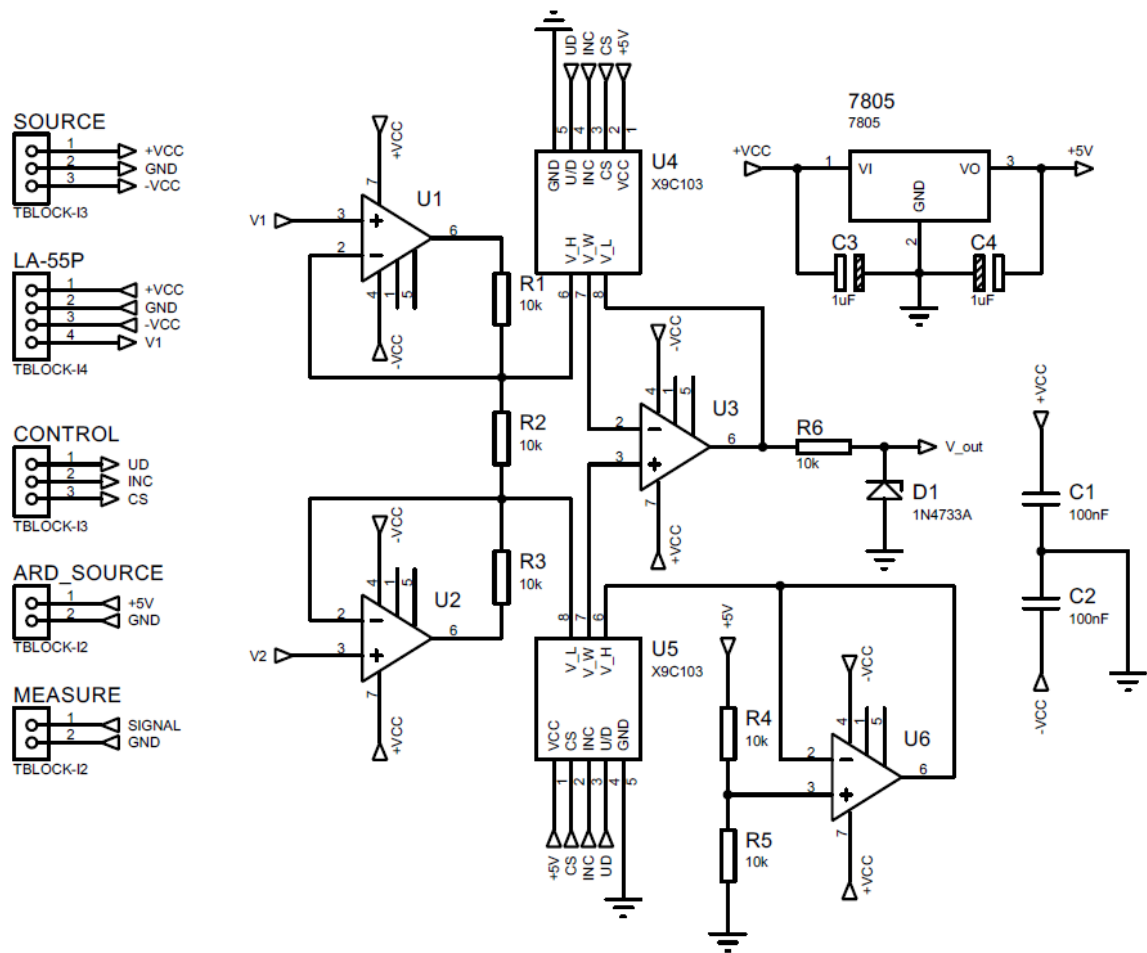


Figura 49 - Circuito Finalizado. (PRÓPRIO AUTOR)

A figura 50 apresenta a placa de circuito projetada a partir do esquemático mostrado acima bem como sua representação 3d. Para seu desenho, foram tomados certos cuidados como projetar linhas grossas, espaçadas entre si e sem quinas vivas. Em seu modelo 3d é possível notar a distribuição dos componentes de forma final, com seu posicionamento o mais próximo possível das ligações realizada no circuito esquemático.

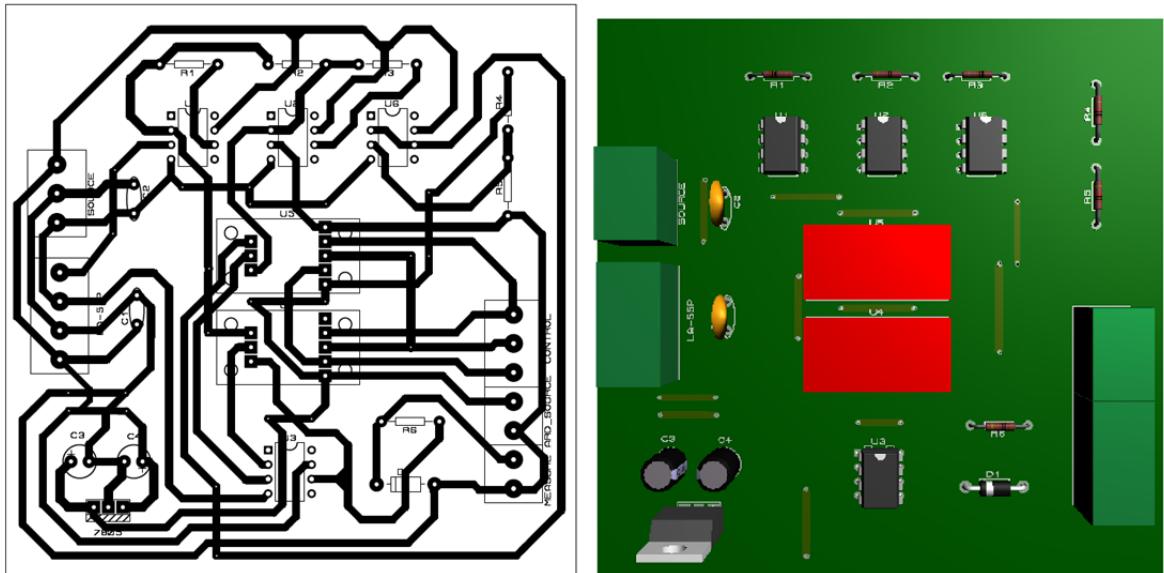


Figura 50 - Placa de Circuito Projetada. (PRÓPRIO AUTOR)

Após tal projeto, a placa de circuito foi desenvolvida através de uma placa de cobre virgem de 10x10cm de dimensões. O circuito foi transmitido para a placa de cobre via transferência térmica como apresentado pela figura 51. Por transferência térmica também foi transferida para a parte superior da placa os *footprints* dos componentes. O circuito tomou sua forma após corrosão com percloreto de ferro com a intenção de proteger o circuito recém desenvolvido de uma futura corrosão, toda placa foi estanhada como mostrado pela figura 52. Isso conferiu à placa uma robustez maior, pois a dimensão de todas as suas trilhas projetadas via software é aumentada.

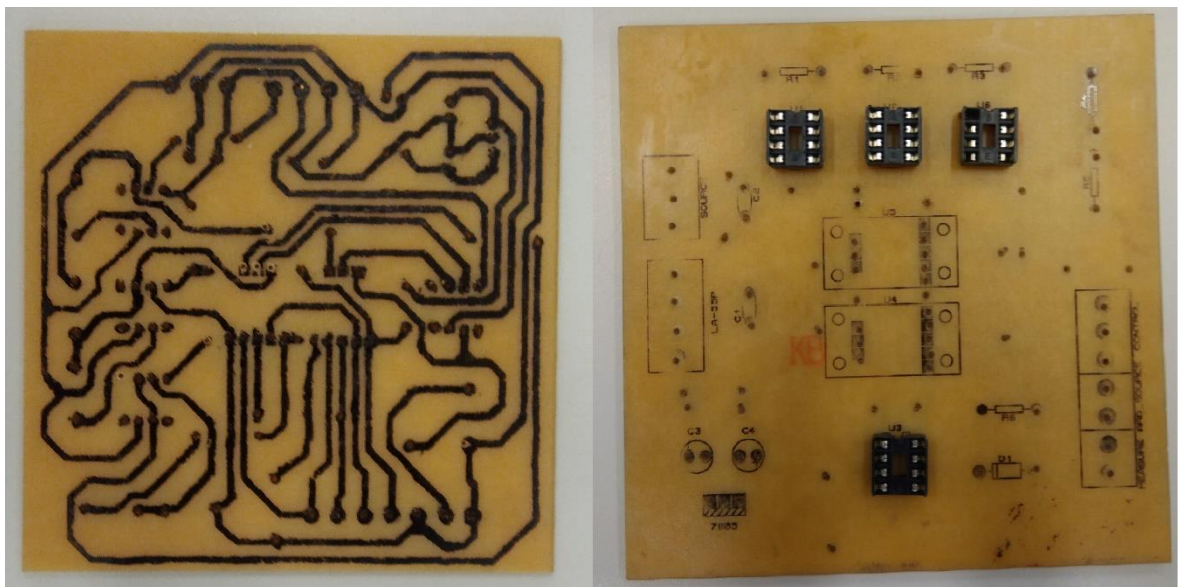
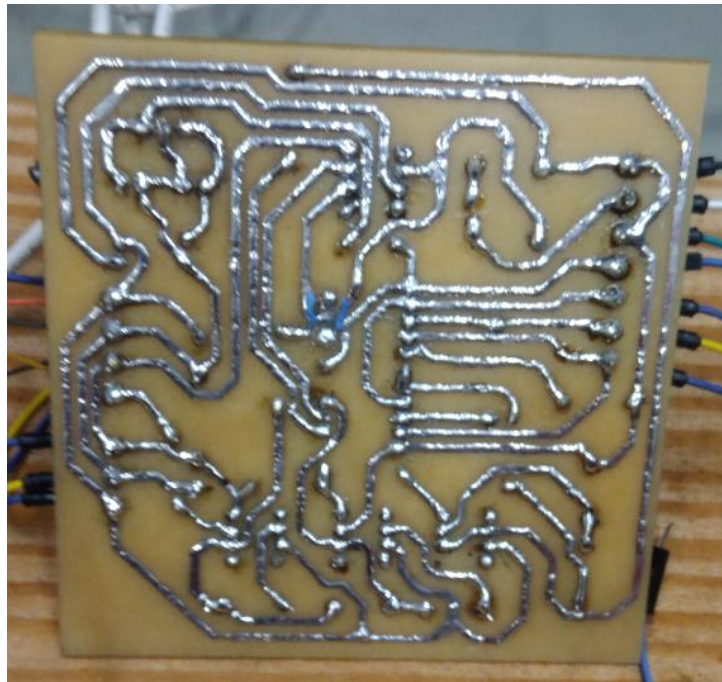


Figura 51 - Transferência térmica para a placa de Cobre. (PRÓPRIO AUTOR)



**Figura 52 - Placa Corroída e Estanhada. (PRÓPRIO AUTOR)**

Após realizado o procedimento descrito, a figura 53 apresenta o a placa de circuito finalizada, com todos seus componentes soldados aos seus respectivos furos, finalizando assim os desenvolvimentos no módulo 2 do organograma de funcionamento do trabalho. Nesse procedimento, foram tomados alguns cuidados em relação à soldagem dos componentes, os quais se iniciaram pelos dispositivos mais próximos à placa, como os soquetes para os amplificadores operacionais, sendo seguido pelos demais, sempre se observando tal proximidade. Os resistores e o diodo utilizados no dispositivo, bem como dois capacitores eletrolíticos foram colocados com certa distância da base da placa de forma a auxiliar a sua aferição em testes anteriores ao seu uso. Por fim, no dispositivo regulador de tensão do projeto, foi acrescentado um pequeno dissipador de calor a fim de evitar o aquecimento do dispositivo, uma vez que o uso do circuito pode ser dar por longos intervalos de tempo.

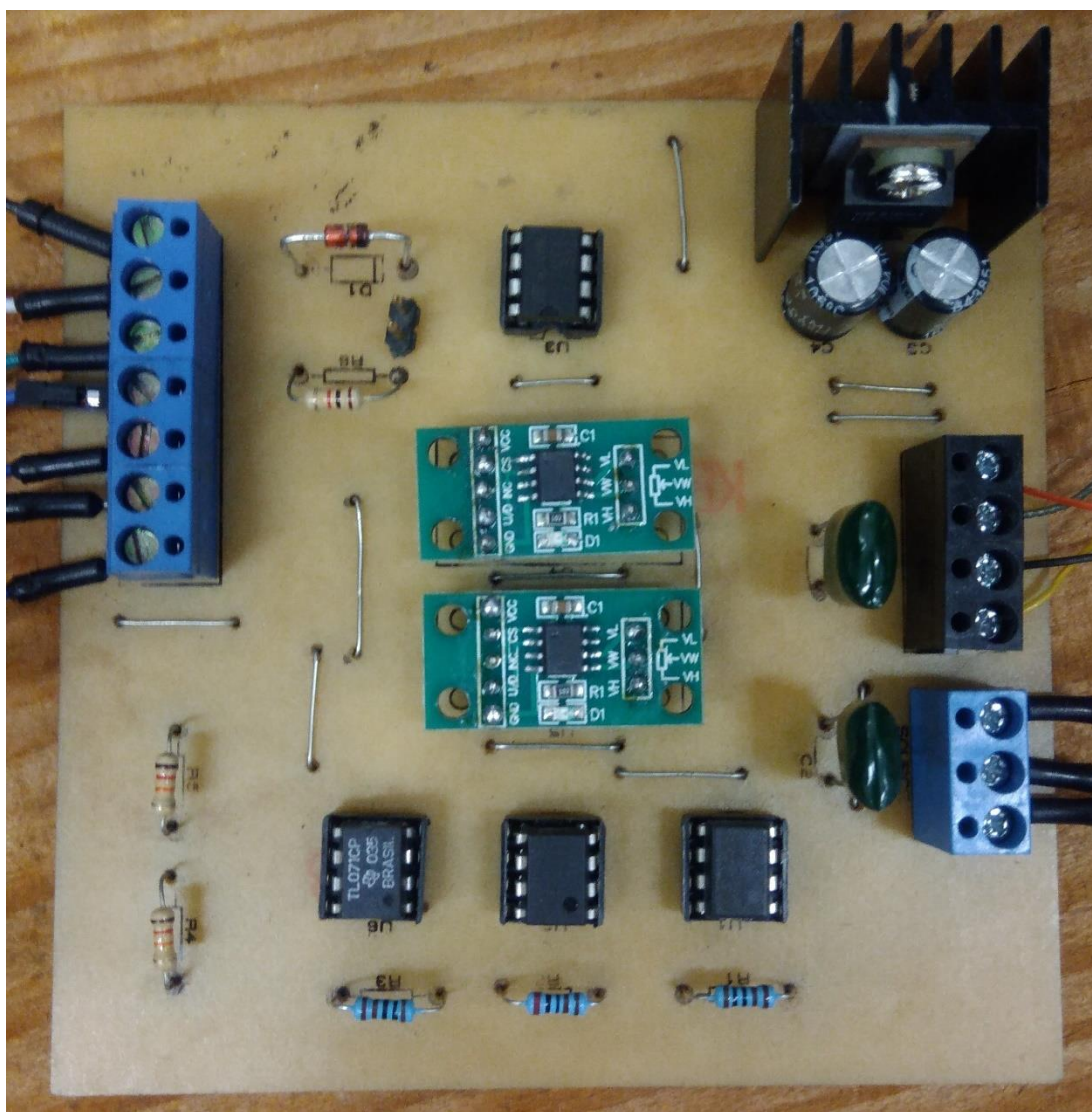


Figura 53 - Placa do Circuito Amplificador Finalizada. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.9 – Interação com o usuário.

Foi desenvolvido, como visualizado pela figura 54, uma interface de comunicação do dispositivo com o usuário. Ela foi desenvolvida com o auxílio de um módulo LCD de 16x2 posições. O módulo de cristal líquido informa dados ao usuário como o valor da corrente elétrica aferida, o ganho proporcionado pela aplicação e a posição do potenciômetro digital na placa construída.

A utilização desse módulo no projeto conclui a distribuição proposta pelo organograma de funcionamento do dispositivo, por ele finaliza o módulo 3, o único ainda em aberto para desenvolvimento.

A comunicação entre o módulo LCD e a central microcontrolada, diferente de todas as ligações realizadas no dispositivo, possui um intermediador. Observada a quantidade de entradas demandadas pelo visor de cristal líquido, foi

definida a utilização de um dispositivo que reduzisse essa demanda elevada de ligações com o Arduino *UNO*. Tal característica de otimização de conexões é apresentada pelos dispositivos de comunicação *I2C*, comunicação a qual é suportada pelo microcontrolador. Nesse contexto, foi empregado junto ao display LCD um módulo *I2C* o qual reduz as 16 ligações solicitadas por apenas 4 com o microcontrolador.

A única dificuldade de aplicação do módulo *I2C* em conjunto ao módulo LCD foi o mapeamento do endereço do dispositivo. Isso acontece pelo fato da arquitetura da comunicação, a qual comunica dispositivos num regime Mestre-Escravo, onde cada escravo dos 127 possíveis de adoção para a comunicação possui um endereço diferente. O dispositivo em conjunto ao visor também é apresentado pela figura 54.

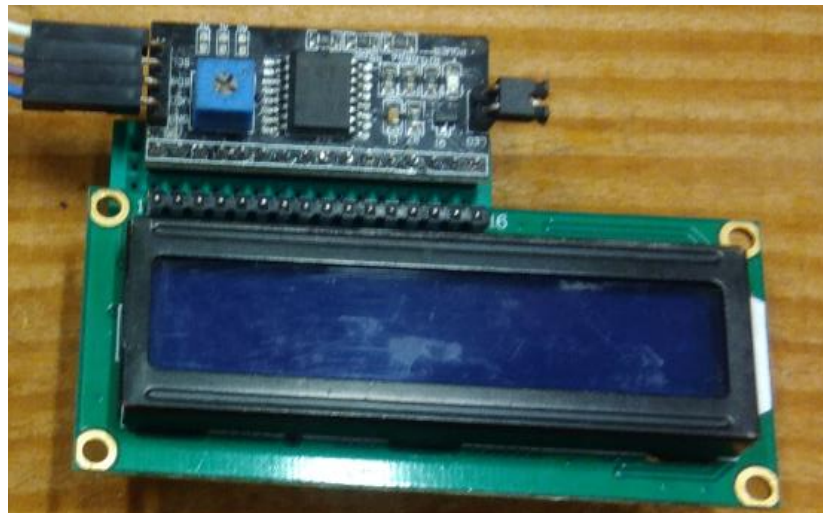


Figura 54 - Display LCD e Módulo *I2C*. (PRÓPRIO AUTOR)

### 3.10 – Integração do Dispositivo.

Após a construção eletrônica de todos os módulos do dispositivo, a figura 55 apresenta a intercomunicação dentre as diversas partes a qual foi realizada com o auxílio de cabos de cobre para as partes de potência do circuito e de *jumpers* para as partes de sinal.

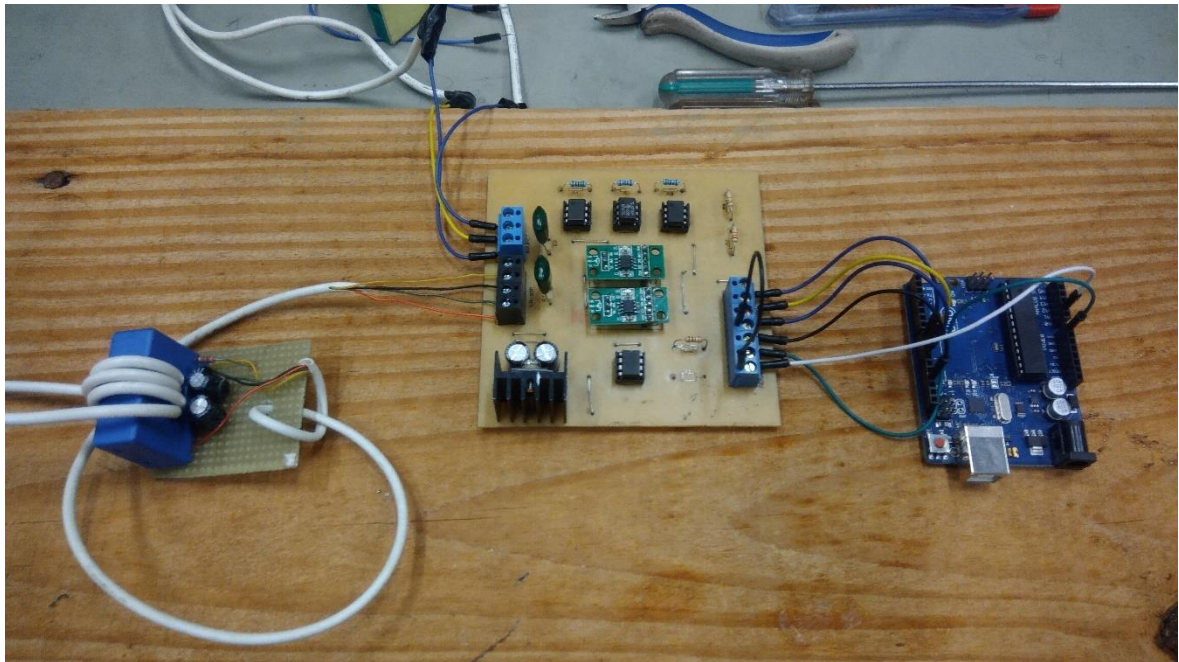


Figura 55 - Dispositivo Interconectado. (PRÓPRIO AUTOR)

Para a comunicação das diversas partes do projeto, é embarcado no dispositivo microcontrolador um código que abrange desde a recepção de sinais até o envio de dados para os módulos potenciômetros e de comunicação com o usuário. O código é apresentado no Anexo 1. Para a aplicação, ele varre todos os ganhos possíveis aplicados ao dispositivo, incrementando e decrementando o ganho, a fim de comprovar o objetivo definido do trabalho de alteração dos ganhos do dispositivo amplificador do circuito.

Das tratativas desenvolvidas, é válido a ressalva ao controle desenvolvido para a aquisição do sinal de corrente. Ele possui uma demanda, estipulada pela premissa de projeto, a qual define a amostragem mínima para o não falseamento do sinal aferido. Isso interfere diretamente no período de amostragem do sinal, o qual possui valor máximo apresentado pela equação 20 abaixo.

$$f_{amostra} > 2 * f_{aferida} \rightarrow f_{amostra} > 2,4kHz \rightarrow T_{amostra} < 416,66\mu s \quad (20)$$

Como apresentado pela figura 56, é utilizado como período de amostragem na função de leitura do sinal o valor de 400 $\mu$ s. Ela é executada constantemente através da utilização de uma interrupção interna ao microcontrolador, o qual garante prioridade de execução em cima de qual outra atividade gerada pelo dispositivo. Isso se mostrou necessário uma vez que a dinâmica de amostragem é



muito superior aos delas apresentados pelo loop principal do código do microcontrolador.

```
#include "TimerOne.h"
#define ANALOG_REFERENCE 5.0
const int sampleADCvalue = A1;
int volts = 0;
int ADC_measure = 0;

void setup()
{
    pinMode(sampleADCvalue, INPUT);
    Timer1.initialize(400);
    Timer1.attachInterrupt(SampleADCFunc);
}

int SampleADCFunc()
{
    ADC_measure = analogRead(sampleADCvalue);
    volts = (ADC_measure * ANALOG_REFERENCE) / 1023.0;
    return volts;
}
```

Figura 56 - Amostragem do Sinal. (PRÓPRIO AUTOR)

## 4- RESULTADOS

Após o dispositivo ser projetado e finalizado, a primeira análise realizada foi a conectividade de seus terminais e o teste ponto a ponto para a indicação de curto-circuito. Isso se mostrou importante antes do início dos testes uma vez que todo o projeto possui cunho artesanal e a verificação traz segurança a aplicação e aumenta a confiabilidade de seus resultados.

A figura 57 apresenta um circuito de testes montado para a aplicação do dispositivo de medição construído. Ele conta com a presença de um retificador e de um capacitor de  $60\mu\text{F}$  e  $250\text{VCA}$ . A sua carga de controle é dada por um resistor variável de  $50\Omega$  e  $500\text{W}$  de potência. Tal configuração, como explanado na revisão bibliográfica apresentada, pode distorcer a forma de onda de corrente. Portanto, o medidor de corrente pertencente ao dispositivo é inserido em série com a alimentação do circuito retificador, na intenção de identificação de tal distorção bem como alteração do ganho de medida para aumento de resolução, como proposto pelo trabalho.

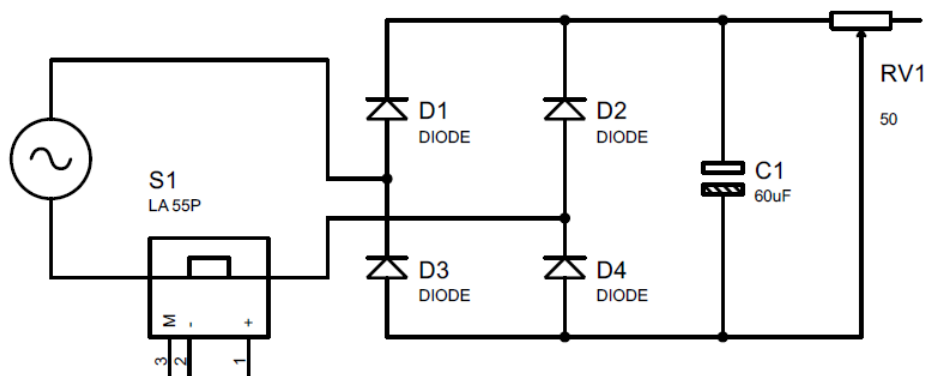


Figura 57 - Circuito de Teste Projetado. (PRÓPIO AUTOR)

A figura 58 apresenta o circuito de testes projetado fisicamente. Ele foi montado numa bancada de testes do laboratório 302 do Cefet-Mg Campus Divinópolis, localidade a qual os experimentos foram desenvolvidos. Na bancada é possível notar que o circuito teste, localizado à esquerda do leitor, foi composto por um varivolt, um retificador com capacitor e uma carga variável. Aferindo a corrente percorrida pela saída do varivolt se encontra o medidor de corrente, o qual envia o valor aferido à placa de amplificação e ao microcontrolador, o qual permite a leitura do valor de corrente e do ganho aplicado pelo visor de LCD. A

alimentação do circuito eletrônico se deu por duas fontes de bancadas interconectadas em série, as quais forneceram a tensão necessária para a alimentação dos circuitos em substituição a baterias que poderiam ser empregadas para a função.

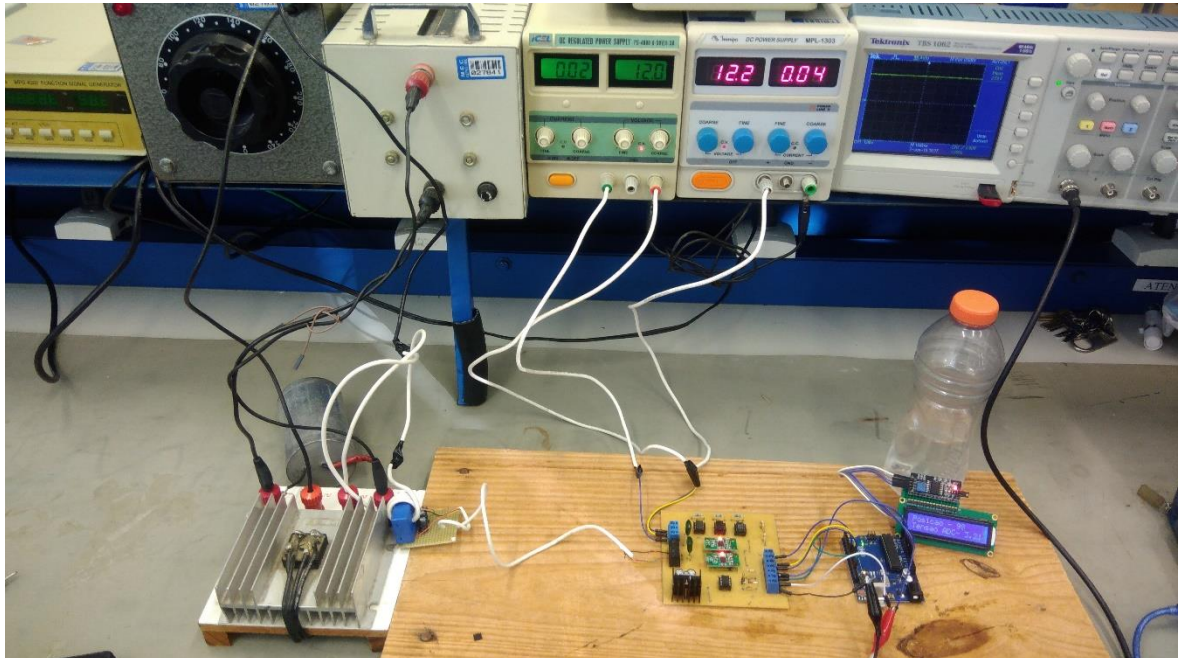


Figura 58 - Circuito de Testes. (PRÓPRIO AUTOR)

O circuito teste foi configurado através da variação da carga de  $50\Omega$  e da tensão do Varivolt para a produção de uma corrente de 20A. Esse valor de corrente é o máximo valor aferido pelos medidores presentes na bancada onde o teste foi realizado, o que já justifica a aplicação do dispositivo construído para situações como a projetada.

A figura 59 apresenta um gráfico obtido pelo osciloscópio presente na bancada de testes que aferiu dois sinais importantes para a comprovação do funcionamento do dispositivo. O primeiro sinal diz respeito à entrada do dispositivo amplificador. Ela apresenta um valor de aproximadamente 360mV pico a pico, aferidos com uma atenuação de 10x sendo aproximadamente 3,6V pico a pico ou 1,27V *rms*, o qual se convertido pela taxa de atenuação do dispositivo sensor de corrente e pelo circuito condicionador indica uma aferição de 127 volts da rede elétrica. Mas diferentemente da tensão norma da rede, o valor aferido apresenta distorções causadas pelo circuito teste, o que indica a presença de sinais harmônicos. Além disso, percebe-se também a não presença de *offset* na

aquisição do dado da corrente, o que confirma a característica apresentada pelo LA55-P.

No segundo canal do dispositivo osciloscópio, encontra-se um gráfico com a aferição da saída da placa amplificador e consequente entrada do dispositivo microcontrolador. A primeira característica observada pelo gráfico alaranjado é a manutenção da forma de onda mesmo com amplificação aplicada. Além disso, é notado também a aplicação do *offset* projetado para a aplicação. O cursor para a segunda leitura indica claramente a elevação DC desejada de 2,5V, a qual protege a entrada do dispositivo microcontrolador contra a fase negativa apresentada pela grandeza aferida. Para a obtenção de ambos os gráficos abaixo, dispostos na mesma visualização, o osciloscópio da bancada eletrônica foi pausado enquanto todos os 100 ganhos possíveis eram aplicados ao dispositivo, o qual percorre todos mantendo fielmente as características de ampliação, sem defasagens ou distorções como apresentado pelas figuras 60 e 61, as quais apresentam respectivamente ganhos superiores e inferiores ao apresentado abaixo, sendo todos provenientes da mesma varredura de ganhos a qual o dispositivo foi submetido.

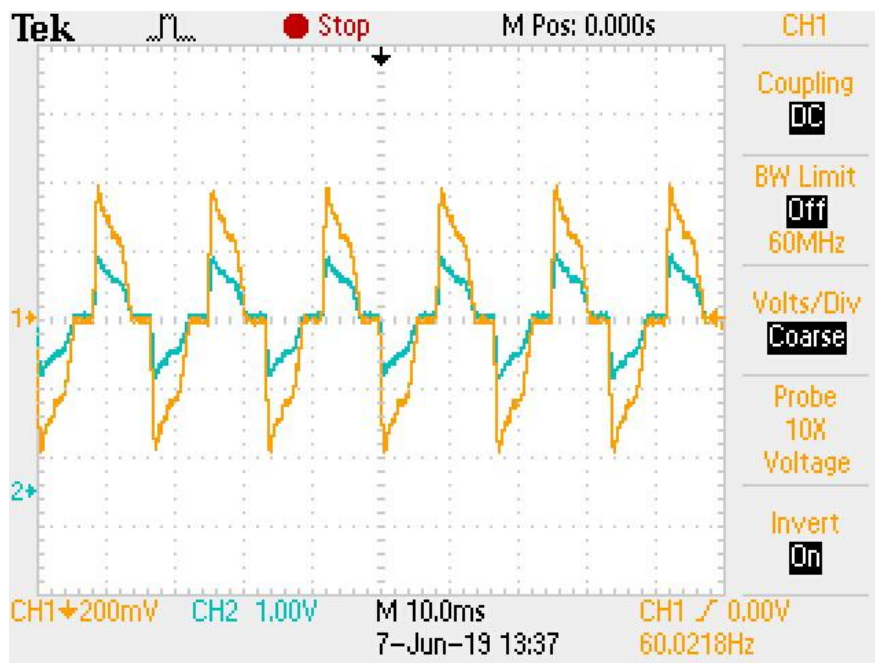


Figura 59 – Aferição 1 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR)

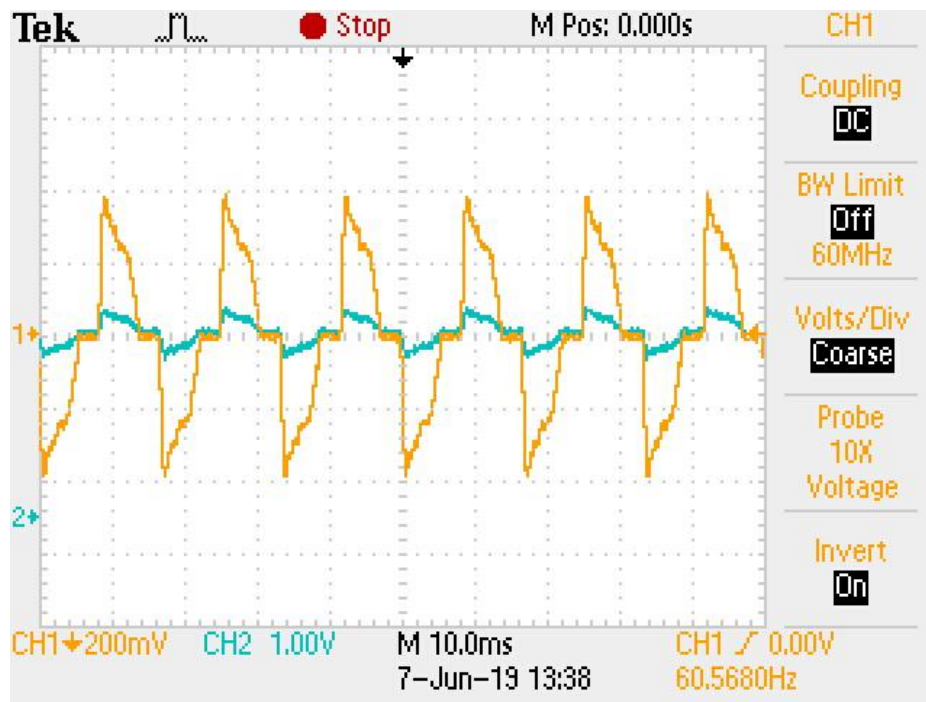


Figura 60 - Aferição 2 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR)

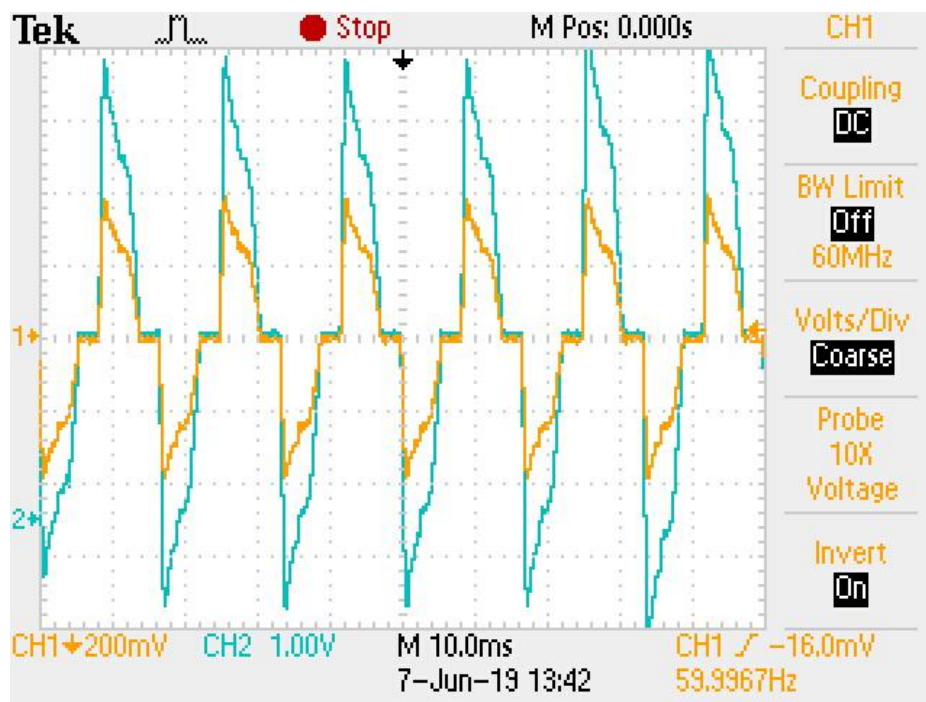


Figura 61 - Aferição 3 na entrada e Saída do dispositivo. (PRÓPRIO AUTOR)

Para o cumprimento do objetivo especificado pelo desenvolvimento do trabalho é necessário o escalonamento do ganho de acordo com a definição de uma referência interna do dispositivo microcontrolador. Observando novamente a faixa de entrada do dispositivo microcontrolador foi definido como faixa ótima de trabalho uma escala de 5% da leitura total do dispositivo, ou seja, 0,25V dos 5V de faixa de entrada do microcontrolador.

Nesse contexto foi definido como faixa ótima de aferição o intervalo compreendido entre 4,10V e 4,35V. Com isso, é proposto que todos os sinais incididos às entradas do microcontrolador pela placa amplificadora que sejam inferiores a 4,10V sejam amplificados até se encaixarem na faixa determinada e os sinais superiores a 4,35V sejam atenuados até a mesma faixa, para fins de controle da resolução de medida do microcontrolador.

Para essa tarefa, foi desenvolvido, como apresentado pelo anexo 1, um código de controle que fecha a malha apresentada no diagrama de funcionamento foi desenvolvido. Como característica de funcionamento, o código utiliza de interrupções internas, como já apresentado, e armazena esses valores em um vetor interno no dispositivo de 250 posições. O preenchimento desse vetor leva 0,1s. Após preenchimento, o vetor é percorrido na intenção de se obter o valor máximo dele, e concomitante a isso, o vetor é zerado para que o procedimento possa ser realizado novamente. O valor máximo é analisado e se ele se apresentar fora da faixa definida, é atenuado ou amplificado para que na próxima leitura se encontre na faixa apresentada. Esse procedimento acontece infinitamente no dispositivo e a atenuação ou amplificação é realizada até o condicionamento do sinal na faixa determinada.

Para exemplificar o procedimento, a figura 62 apresenta a resposta em malha fechada de uma corrente de 1A, a qual, como pode ser observado, se inicia com um valor baixo devido a conversão do dispositivo sensor e através da placa de amplificação, é amplificado a fim de se adequar a faixa especificada. É notado que, pela velocidade em que acontece os eventos, a leitura apresenta um *overshoot* o qual também é rapidamente acomodado com a acomodação do sinal na faixa especificada.

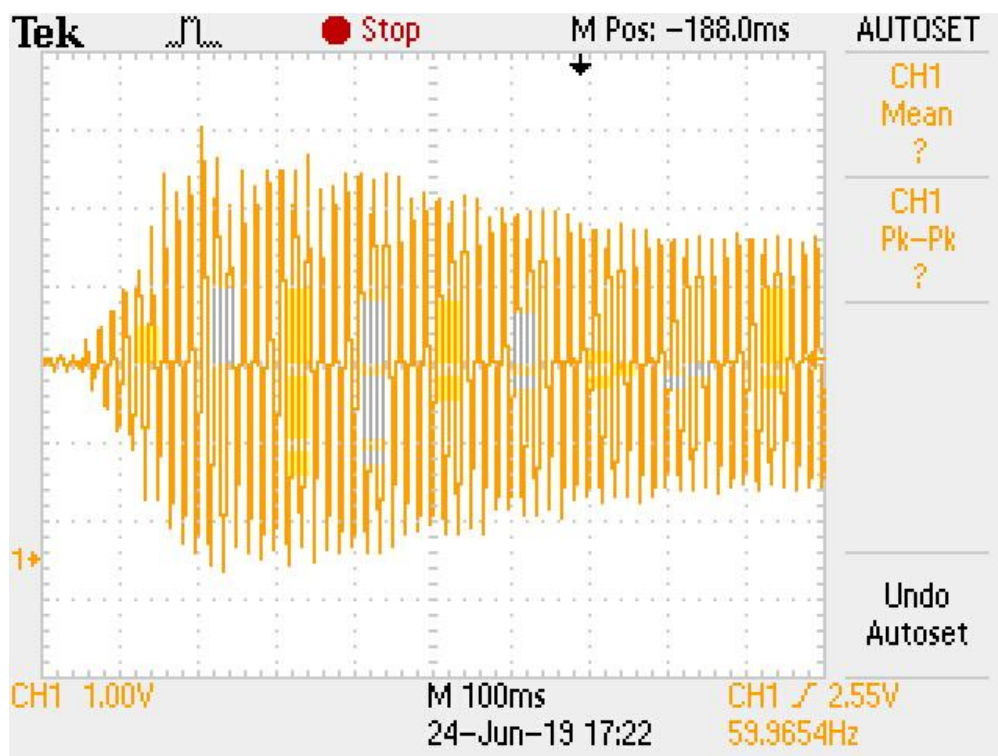


Figura 62 - Resposta do dispositivo em malha fechada. (PRÓPRIO AUTOR)

## 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 – Conclusões

Finalizada a construção do dispositivo de aquisição de dados de ponteiros de corrente elétrica, como proposto, foi observado a capacidade de realização de tarefas relativamente complexas como o ajuste de ganho de medição por um dispositivo de baixo custo, o qual possui simplicidade de projeto e atendimento às demandas apresentadas. Como contextualizado, o dispositivo consegue com facilidade ser aplicado em aquisições de dados de corrente elétrica industriais as quais possuem grandes valores em pleno funcionamento diário e baixas correntes no período noturno, uma vez que altera o ganho de amplificação do dispositivo para a manutenção da resolução de medida da grandeza

O projeto do dispositivo em questão, como apresentado no corpo do texto, buscou o atendimento do objetivo proposto, de construir um dispositivo de ajuste de ganho automático e para seu atendimento, foi montado um diagrama funcional que consistiu na diferenciação e união de três áreas diferentes, uma elétrica, destinada a aquisição dos dados transmitidos ao segmento eletrônico, responsável pela amplificação e atenuação dos sinais aferidos e era bi conectada a um sistema digital, responsável pelo controle do segmento eletrônico.

Com as análises levantadas pelo dispositivo de aquisição de corrente desenvolvido e seu respectivo teste de aferição de corrente, foi comprovado a atuação que o circuito amplificador aplicava à corrente medida, comprovando seu projeto. Entretanto, na confecção do circuito, é notada a presença de travas eletrônicas que garantem que o projeto não seja afetado por fatores indesejados, mas é perceptível também que não é garantida a estabilidade do sistema, uma vez que se encontra em uma malha fechada. Para tal garantia, que é suprimida pelas travas eletrônicas do circuito, era ideal o projeto de um controlador embarcado no microcontrolador para o atendimento das especificações propostas. Com ele, a velocidade de resposta, *overshoots* e a faixa de leitura poderiam ser controladas a fim de garantir estabilidade do sistema para qualquer valor de corrente aferida.



## 5.2 – Propostas de Continuidade

### 5.2.1 – Armazenamento dos Valores de Corrente

Com a unidade desenvolvida no projeto, o usuário ainda não é capaz de armazenar os dados aferidos da corrente elétrica, como realizado por analisadores de qualidade de energia. Portanto, propõe-se para esse caso a utilização de 2 módulos em conjunto ao dispositivo construído. O primeiro consiste em um *real time*, que amarrará cada valor de corrente amostrada pelo circuito a um valor temporal.

Esses vetores de tempo e corrente desenvolvidos seriam armazenados em uma memória não volátil externa ao dispositivo, como um módulo EPROM a fim de obter por longos períodos o comportamento temporal da medição realizada pelo dispositivo. Um exemplo de módulos que realizam tal tarefa é mostrado na figura 63, apresentando um modelo de timer e memória acessíveis e de fácil integração com o projeto, com comunicação *I2C*.

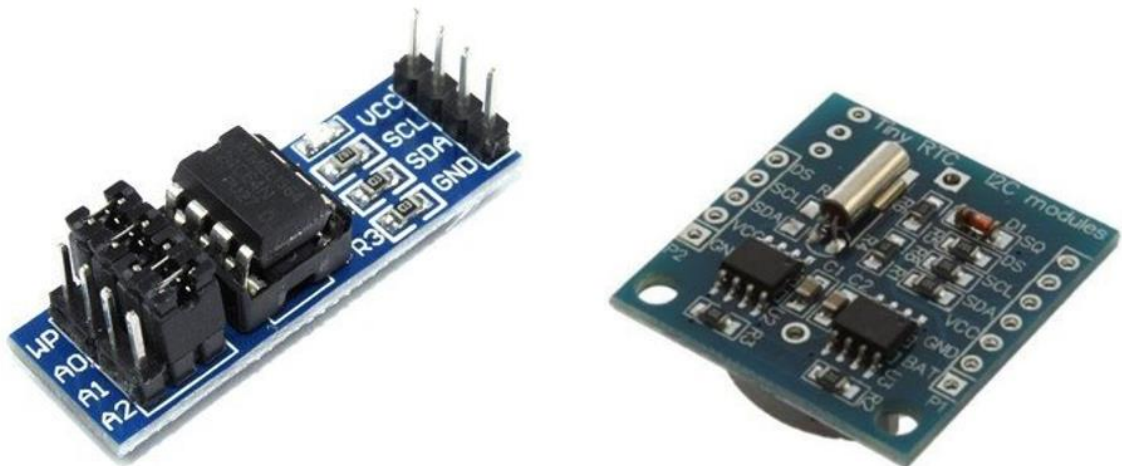


Figura 63 - Módulos de Tempo e Gravação para Arduino. (ELETROGATE, 2019)

### 5.2.2 – Remoção dos dados do Dispositivo

O dispositivo projetado não conta com nenhuma forma de comunicação externa, característica qual pode ser bem utilizada na coleta dos dados de medição sem a necessidade de um operador manuseá-lo em campo. Tendo em vista isso, propõe-se a utilização de um sistema de comunicação wireless a ser implementado em conjunto com os módulos apresentados no tópico superior. Sua

atuação se daria na transmissão do dado aferido em campo para uma central computadorizada afastada da localidade de aferição ou para um webservice online, onde os dados seriam mantidos em bancos de dados e estariam à disposição de qualquer operador em qualquer localidade em qualquer instante, sem a necessidade de proximidade alguma do operador com o processo.

Para tal atividades, existem dispositivos como o mostrado pela figura 64 que integram tanto as funções apresentadas pelo microcontrolador do dispositivo quanto as apresentadas pela proposta de melhoria. O ESP32 (SYSTEMS, 2016) é um módulo de alto desempenho para aplicações envolvendo WiFi, requisitando um baixíssimo consumo de energia. Este dispositivo é uma evolução do conhecido ESP8266, da mesma família, com maior poder de processamento e bluetooth BLE 4.2 embutido, funcionalidades as quais o qualifica para a operação.

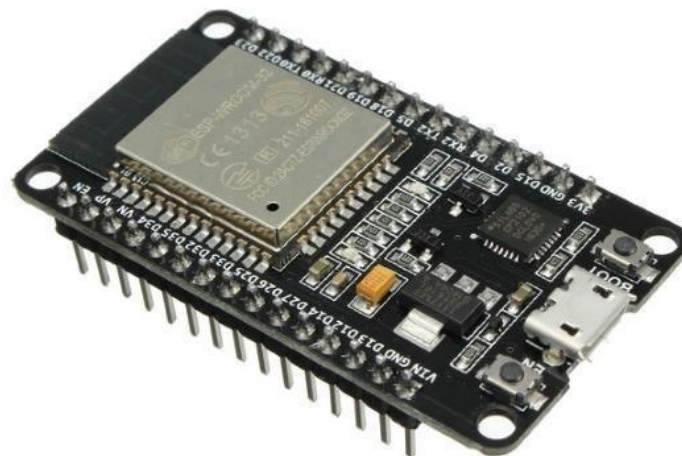


Figura 64 - Plataforma de desenvolvimento ESP32.(FILIPEFLOP, 2018)

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIBABA. **X9C103**, 2019. Disponível em: <[https://www.alibaba.com/product-detail/X9C103P-X9C103-DIP-8-E2POT-Nonvolatile\\_60685857397.html](https://www.alibaba.com/product-detail/X9C103P-X9C103-DIP-8-E2POT-Nonvolatile_60685857397.html)>

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. v. Revisão 10, 2018.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. [s.l.] Pearson, 2013.

BUCCI, G.; FIORUCCI, E.; LANDI, C. Digital measurement station for power quality analysis in distributed environments. **Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE**, v. 1, p. 368–373 vols.1, 21- 23 May, 2001.

CHAVES, C. F. **Transformador de Corrente Eletrônico Utilizando Bobina de Rogowski e Interface Óptica com Pof Para Aplicação e Sistemas de Potência**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

COMMUNICA. **30A Current Sensor Module using ACS712ELC**. Disponível em: <<http://www.communica.co.za/catalog/Details/P1703705903>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

CRISP, J. A. **Introduction to Microprocessors and Microcontrollers**. 2. ed. Newnes: Elsevier, 2004.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: UNICAMP, 2010.

DIAS, G. A. D. Harmônicas em Sistemas Industriais. **Edipucrs**, 2002.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. Second ed. New York: NY: McGraw-Hill, 2004.

EBAY. **Resistor Shunt**. Disponível em: <<https://www.ebay.com/p/1pc-DC-75mv-10a-Current-Shunt-Resistor-for-Amp-Ammeter-Panel-Meter-FI-2/508999898>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

ELETROGATE. **Módulos**, 2019. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulos/>>

EMBARCADOS. **Arduino UNO**, 2013. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>>

FILIPEFLOP. **FilipeFlop Componentes Eletrônicos**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

FLUKE, C. **Folha de especificações do Fluke 430 - II - Analisador de Qualidade de Energia**. Disponível em: <<http://assets.fluke.com/manuals/F430->

II\_umpor0100.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2018.

FONSECA, J. M. **Sensores: Características de Sensores**. Disponível em: <<http://www.ssdp.dee.fct.unl.pt/leec/ss/20032004/documentos/8 - Sensores.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

FUENTES, R. C. **Apostila de Automação Industrial**. Santa Maria: COLÉGIO TÉCNICO INDUSTRIAL DE SANTA MARIA, 2005.

HATATA, A. Y.; ELADAWY, M. Prediction of the true harmonic current contribution of nonlinear loads using NARX neural network. **Alexandria Engineering Journal**, 2015.

HIGASHI, E. M. **Modelagem da Bobina de Rogowski para Medidas de Pulsos de corrente Elétrica**. [s.l.] 2006. 68 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Pós Graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**. Disponível em: <<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/hallbook.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997.

KOIZUMI, M. T. **Desenvolvimento de sensores e instrumentação aplicados no projeto de equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, 2012.

LEM. **LA 55-p**, 2018. Disponível em: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/la\\_55-p\\_e.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf)>

MAURITY, A. J. S. et al. Construction of a system for characterization of transport properties of thin films by Hall effect. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 1307, 2012.

MEHL, E. L. M. Qualidade da Energia Elétrica. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ-UFPR**, 2012.

MENDES, T. M. et al. Monitoramento Multidimensional de Qualidade de Energia Elétrica para Smart Grids. 2015.

MICROCHIP. **ATmega328p**. Disponível em: <<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328PB>>.

MINIPA, DO B. L. **Folha de especificações do Minipa ET-5061C-1303**. Disponível em: <[http://www.minipa.com.br/images/proposta\\_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf](http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2018.

MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. 3.3 ed. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina - Departamento Acadêmico de Eletrônica, 2007.

MYELECTRICAL, E. **How to Size Current Transformers**. Disponível em: <<http://myelectrical.com/notes/entryid/99/how-to-size-current-transformers>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

NAG, B. Validity of Ohm's law. **Proceedings of the Indian Division of the Institution of Electronic and Radio Engineers**, v. 2, n. 1, p. 17–24, 1964.

PERTENCE, A. J. **Eletrônica Analógica - Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

PINHEIRO, J. R. G. Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Baixo Custo para a Monitoração de Alimentadores Aéreos de Distribuição de Energia Elétrica da Classe 15 kV. **Unesp**, 2011.

RENESAS. **X9C103 - Digitally Controlled Potentiometer (XDCP™)**, 2019. Disponível em: <<https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>>

ROCHA, G. V. S. et al. Sistema Inteligente de Suporte a Análise da Qualidade da Energia Elétrica em regime Permanente. 2017.

ROLIM, M. E. Análise da Qualidade de Energia Elétrica: Distorções Harmônicas em uma Planta Industrial. p. 57, 2015.

SCHUNK, L. M. **Microcontroladores AVR - Teoria e Aplicações Práticas**. [s.l.] Érika, 2001.

SIMÕES, B. D.; PEREIRA, H. A. Influência das Técnicas de Bobinagem no Conteúdo Harmônico em Máquinas de Corrente Alternada Senoidal. **Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil**, 1989.

SINUS. **Qualidade de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/includes/qee.html>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

SLOW, E.; TIROPANIS, T.; HALL, W. Analytics for the Internet of Things: A survey. **ACM Computing Surveys**, 2018.

SOLTAU. **Como conectar um potenciometro digital ao Arduino**, 2018. Disponível em: <<https://soltau.ru/index.php/arduino/item/492-kak-podklyuchit-tsifrovoy-potentsiometr-x9c102-x9c103-x9c104-k-arduino>>

SYSTEMS, E. ESP32 Datasheet. p. 1–43, 2016.

TAMBARA, R. V.; FLORA, L. DELLA; GRÜNDLING, H. A. Projeto de implementação de instrumentação para medição de corrente elétrica em uma máquina de vibração eletrodinâmica. **Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, p. 12, 2015.

TEXAS INSTRUMENTS. **TL071**, 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071.pdf>>

WIKIPÉDIA. **Bobina de Rogowski.** Disponível em:  
<[https://pt.wikipedia.org/wiki/Bobina\\_de\\_Rogowski](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bobina_de_Rogowski)>. Acesso em: 1 jun. 2018.

XIAO, C. et al. An overview of integratable current sensor technologies.  
**INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2003, 38th IAS Annual Meeting**, v. 2, n. Conference Record of the, p. 1251–1258, 12- 16 Oct, 2003.

## ANEXOS

### Anexo 1 – Código embarcado no Microcontrolador

```
//Código desenvolvido por Guilherme de Moraes Bessa
//
//
#include "TimerOne.h"
#include "Wire.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <X9C.h>
#define UD      8
#define INC     9
#define CS     10
const int sampleADCvalue = A1;
int sampleADC = 0;
double gain = 0;
double volts = 0;
double ADC_measure = 0;
int leitura = 0;
int zero = 0;
double maximo = 0;
double maximoCons = 0;
double measure[250];

X9C pot;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

void setup() {
  pot.begin(CS, INC, UD);
  pot.setPotMin(false);
  pinMode(sampleADCvalue, INPUT);
  digitalWrite(sampleADCvalue, LOW);
  Timer1.initialize(400); //periodo de amostragem do
```

```

Timer1.attachInterrupt(SampleADCFunc);
pinMode(sampleADCvalue, INPUT);
digitalWrite(sampleADCvalue, LOW);
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16,2);
lcd.backlight();
Serial.begin(9600);
}

```

```

//Amostragem Chamada por Interrupção
// - acontece a cada 400 microssegundos
// - na amostragem 250, o vetor que armazena as informações
// - é percorrido em busca do valor maximo e zerado para nosvas amostragens
double SampleADCFunc()
{
  ADC_measure = analogRead(sampleADCvalue);
  volts = (ADC_measure * 5)/ 1023.0;
  measure[leitura] = volts;
  leitura=leitura+1;
  if (leitura == 250){
    leitura = 0;
    maximo = 0;
    for(int i=0;i<250;i++){
      if (measure[i] >= maximo){
        maximo = measure[i];
        measure[i] = 0;
      }
    }
    Serial.println(maximo);
    maximoCons = maximo;
  }
  return maximoCons;
}

```



```

void loop(){
  int sampleADC = analogRead(sampleADCvalue);
  double amostra = SampleADCFunc();
  if (amostra<=4.1){
    if(gain<99){
      gain++;
    }
    pot.trimPot(1, X9C_UP, true);
    delay(50);
  }

  if(amostra>=4.35){
    if(gain>=1){
      gain--;
    }
    pot.trimPot(1, X9C_DOWN, true);
    delay(50);
  }
  printdisplay();
}

```

```

void printdisplay(){
  float corrente = 99999;
  double gain2 = 999;
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Corrente - ");
  if (gain!=0){
    gain2 = double (gain/(100-gain));
    corrente = maximoCons*0.52/gain2;
  }
  lcd.print(corrente);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Ganho_");
  lcd.print(int (gain));
  lcd.print("= ");
}

```

```
lcd.print(gain2);  
delay(10);  
}
```