

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDRÉ BIANCHI PIZZOLATTI

ESTUDO DE SENSORES PARA APLICAÇÕES EM MICRORREDES

JOINVILLE

2021

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDRÉ BIANCHI PIZZOLATTI

ESTUDO DE SENSORES PARA APLICAÇÕES EM MICRORREDES

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE

2021

ANDRÉ BIANCHI PIZZOLATTI

ESTUDO DE SENSORES PARA APLICAÇÕES EM MICRORREDES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Presidente:

Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
UDESC

Membro:

Prof. Dr. Celso José Faria de Araujo
UDESC

Membro:

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd
UDESC

Joinville, 27 de Agosto 2021.

Dedico este trabalho aos meus pais, Eron Pinter Pizzolatti e Regane Maria Bianchi Pizzolatti, sublimes pilares e referências eternas em minha vida, vossa consciência e dedicação em prol do desenvolvimento da paz, cultura e educação sempre foi uma constante em nossa família e em todos ambientes que frequentávamos, a dedicação incansável de meus pais é uma comprovação de que o humanismo e a dignidade da vida são os eixos que promovem a transformação individual e o avanço da humanidade, reafirmando o legado do filósofo e pacifista japonês Dr. Daisaku Ikeda: Seja como for, a grandiosa Revolução Humana de uma única pessoa irá um dia impulsionar a mudança total do destino de um país e, além disso, será capaz de transformar o destino de toda a humanidade!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao filósofo, poeta, escritor e o grande propagador da Paz, Cultura e Educação Dr. Daisaku Ikeda, o qual me inspiro e procuro basear meus atos e pensamentos por meio de seu exemplo, direcionamentos e filosofia de vida.

Agradeço sinceramente aos meus pais, Eron Pizzolatti Pilar de Ouro e Regane Bianchi Rainha da Felicidade, por sempre estarem me apoiando e me incentivando em toda a minha jornada, carinhosamente agradeço a minha mãe que irmã, amiga e querida companheira Fernanda Pizzolatti, que sempre me abraçou com seu admirável coração.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Alessandro Luiz Batschauer, por ter me conduzido com paciência, maestria nessa jornada de conhecimento.

Também não posso deixar de agradecer aos amigos de todas as horas Paulo Simas, Kristhiann Kuerten, Lucas Bona, Adriana Krüger, Juliana Bianchi e Luiza Bianchi, que não mediram esforços em incentivar-me, em especial nos momentos mais desafiadores, porém mais significativos.

Somente sinceros e dedicados esforços conduzem a vit3ria. (Daisaku Ikeda)

RESUMO

Com o aumento da geração distribuída e a busca por fontes renováveis de energia, junto com o desenvolvimento da tecnologia, como veículos elétricos, o armazenamento de energia em baterias chama atenção para um conceito chamado Microrredes. Os sistemas de medições de energia são pontos importantes, já que por meio deles pode-se ter o conhecimento de quanta energia está sendo gerada, quanto as cargas estão consumindo e, assim, tornar a rede mais eficiente, também ajudando na tomada de decisões. Assim, este trabalho visa fazer um medidor de energia, capaz de fazer o monitoramento de uma carga. Com isso, por meio de sensores e de medições de tensão e corrente, é que chegamos ao processo de aquisição do sinal, em que temos sensor *hall* para medir a corrente e um divisor de tensão para medir a tensão. Para o processo de medição, foram confeccionados módulos de aquisição de tensão e de aquisição de corrente, que fazem o condicionamento do sinal que é visto sobre filtragem de sinal e sobre o tratamento do sinal, resultando nas características necessárias para poder ser lido pelo microcontrolador. Esse microcontrolador também faz os cálculos de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, reativa e aparente, sendo também responsável por enviar o sinal através da conexão WiFi, para que os dados possam ser visualizados em um computador ou celular.

Palavras-chave: Microrredes. Sensores. Condicionamento de sinais. Microcontroladores. Arduino. ESP. IoT. Internet das coisas.

ABSTRACT

With the increase in distributed generation and the search for renewable energy sources, along with the development of technology such as electric vehicles, energy storage in batteries draws attention to a concept called Microgrids. Energy measurement systems are important points, since through them one can have knowledge of how much energy is being generated, how much the loads are consuming, and thus make the grid more efficient and also help in the decision making process. Thus, this work aims to make an energy meter, capable of monitoring a load. With this, by means of sensors and voltage and current measurements, we get to the signal acquisition process, in which we have a hall sensor to measure the current and a voltage divider to measure the voltage. For the measurement process, voltage acquisition and current acquisition modules were made, which do the signal conditioning that is seen about signal filtering and signal treatment, resulting in the characteristics needed to be read by the microcontroller. This microcontroller also makes the calculations of effective voltage, effective current, active, reactive and apparent power, and is also responsible for sending the signal through the WiFi connection, so that the data can be viewed on a computer or cell phone.

Keywords: Micro-grids. Sensors. Signal conditioning. Microcontrollers. Arduino. ESP. IoT. Internet of things.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo de uma microrrede	14
1.2	Diagrama geral do projeto	15
2.1	Diagrama esquemático de uma Microrrede c.a.	19
2.2	Diagrama esquemático de uma Microrrede c.c.	20
2.3	Esquemático do circuito de condicionamento	24
3.1	Sensor LEM LA 55-P	30
3.2	Circuito para aquisição e condicionamento do sinal de corrente	31
3.3	Circuito para aquisição e condicionamento do sinal de tensão	31
3.4	Primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de corrente, onde ocorre a aquisição do sinal e o ganho	31
3.5	Primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de tensão, onde ocorre a aquisição do sinal e o ganho	32
3.6	Segundo estágio do circuito	33
3.7	Filtro de realimentação múltipla com dois estágios projetado utilizando o software FilterPro	34
3.8	Terceiro estágio do circuito, responsável por dar um ganho e adicionar um nível c.c. ao sinal	35
3.9	Último estágio do circuito	35
3.10	Módulo e fase da função de transferência do circuito de condicionamento	36
3.11	Tensão de entrada de 270 V eficaz	36
3.12	Sinal em Vin1t e Vo1t	37
3.13	Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de tensão	37
3.14	Corrente fornecida pelo sensor de corrente	37
3.15	Sinal em Vin1c e Vo1c	38
3.16	Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de corrente	38
3.17	Sinal com ruído em Vin1t do circuito de aquisição do sinal de tensão	39
3.18	Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de tensão com ruído na entrada	39
3.19	Corrente fornecida pelo sensor de corrente com ruído	39
3.20	Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de corrente com ruído na entrada	40
3.21	Face superior do layout do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente	40

3.22	Face inferior do layout do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente	41
3.23	Face superior do layout do circuito de condicionamento do sinal de tensão	41
3.24	Face inferior do layout do circuito de condicionamento do sinal de tensão	41
3.25	Módulo de medição de corrente	42
3.26	Módulo de medição de tensão	42
3.27	<i>Setup</i> da realização dos ensaios do módulo de medição de tensão	43
3.28	Sinal de entrada do sensor gerado pela tensão de linha do varivolt Aute T-3820 . . .	44
3.29	Sinal Vin1t na saída do divisor de tensão na primeira etapa do circuito	44
3.30	Sinal de saída da primeira etapa do circuito, Vo1t	45
3.31	Sinal Vo2, na saída da etapa do filtro	45
3.32	Sinal que se apresenta na saída do circuito quando é submetido a uma tensão de 270 V na entrada	46
3.33	<i>Setup</i> da realização dos ensaios do módulo de medição de corrente	46
3.34	Corrente a ser medida pelo sensor	47
3.35	Sinal de tensão Vin1c, no primeiro estágio do circuito	47
3.36	Sinal Vo1c, logo após passar pelo amplificador inversor	48
3.37	Sinal Vo2, apresentado na saída do filtro	48
3.38	Sinal que se apresenta na saída do circuito quando apresenta 50 A a ser medido pelo sensor	49
3.39	Heltec ESP32 WiFi LoRa 32 SX127X	50
3.40	Nodes utilizados para receber os dados de tensão e corrente	51
3.41	Nodes utilizados para receber os dados das potências	52
3.42	Página para visualizar as tensões e correntes	53
3.43	Página para visualizar as potências ativas, reativas e aparentes	54
3.44	Fonte de alimentação bipolar de 15 V e unipolar de 5 V	55
B.1	Projeto do circuito de condicionamento do sinal de tensão	66
B.2	Projeto do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente	66

LISTA DE TABELAS

2.1 Comparação dos Controladores	27
3.1 Lista dos sensores citados	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
IoT	<i>Internet of things</i> - Internet das Coisas
RMS	<i>Root Mean Square</i> - Média Quadrática
c.c.	Corrente contínua
c.a.	Corrente alternada
GD	Geração distribuída
PCI	Placa de Circuito Impresso
ADC	Analog to Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{in1t}	Entrada do primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de tensão
V_{o1t}	Saída do primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de tensão
V_{in1c}	Entrada do primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente
V_{o1c}	Saída do primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente
V_{in2}	Entrada do segundo estágio do circuito de condicionamento
V_{o2}	Saída do segundo estágio do circuito de condicionamento
V_{in3}	Entrada do terceiro estágio do circuito de condicionamento
V_{o3}	Saída do terceiro estágio do circuito de condicionamento
X_C	Reatância capacitiva da impedância de entrada da fonte
C	Capacitor de entrada da fonte

SUMÁRIO

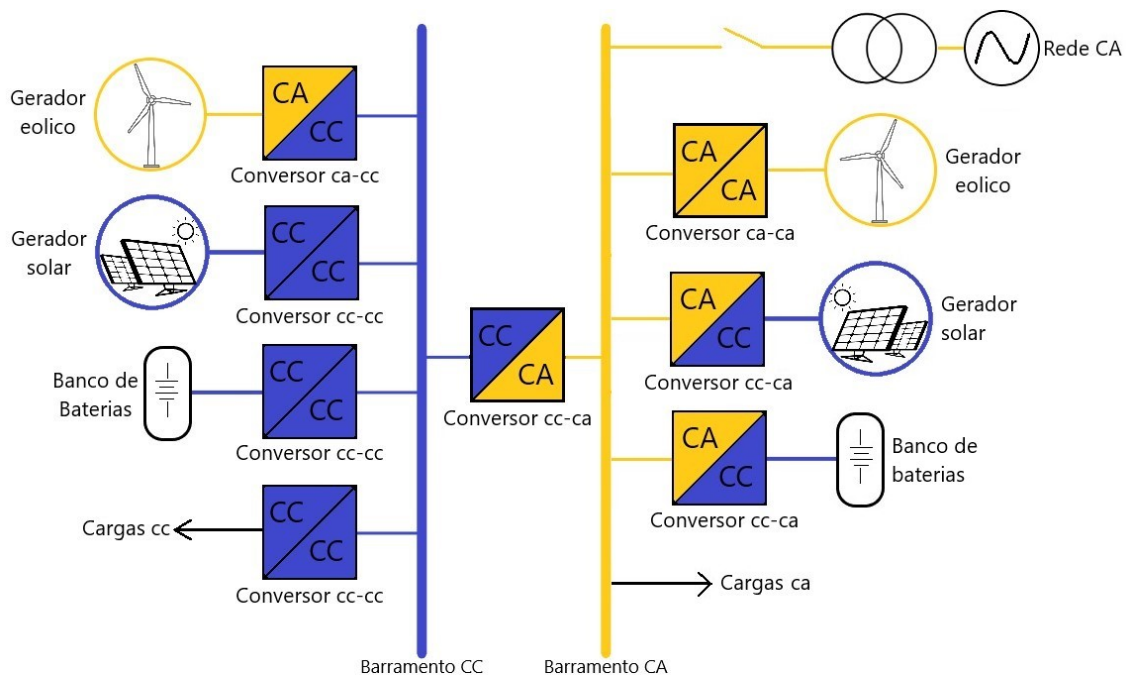
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos gerais	15
1.2 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Microrredes	17
2.2 Sensores	21
2.3 Condicionamento de Sinais	22
2.4 Microcontrolador	24
2.5 Comunicação de Dados e IoT	26
3 PROJETO E RESULTADOS	29
3.1 Definição dos Sensores	29
3.2 Condicionamento de sinais	30
3.3 Simulação do circuito	35
3.4 Resultados	43
3.5 Aquisição de dados e comunicação iot	49
3.6 Fonte de alimentação	52
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
4.1 Trabalhos Futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A – Código fonte ESP32	59
ANEXO B – Projetos dos circuitos de condicionamento	66
ANEXO C – Lista de componentes	67

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico, existe uma tendência a um futuro com maior demanda de energia, como o aumento da procura por fontes renováveis e da geração distribuída.

Nesse sentido, é importante o estudo de alguns conceitos e ferramentas, como o de microrredes, que é um sistema com recursos de geração distribuída, armazenadores de energia e cargas, capazes de operar conectados ou até mesmo desconectados (ilhados) do sistema principal. Um exemplo de microrrede pode ser visto na Figura 1.1

Figura 1.1 – Exemplo de uma microrrede



Fonte: Autor.

Para esses sistemas, são importantes os recursos de medições para se ter conhecimento de quanta energia está sendo gerada pelas fontes, sendo armazenada ou fornecida pelos armazenadores de energia, como baterias e quanta energia as cargas estão consumindo, para assim ter um entendimento do fluxo de energia e ter maior controle, podendo regular a geração de acordo com a carga demandada.

É importante, para tal, o estudo de sensores que fazem a medição da energia que está sendo gerada, armazenada e consumida, visando ter o conhecimento de como está a situação energética, para que decisões inteligentes, eficientes, eficazes e condizentes com a situação, possam ser tomadas.

É interessante, ainda, que esses dados possam ser transmitidos por meio de uma rede sem fio, já que em muitos casos não é viável que se tenha fios ou cabos entre os sensores e o dispositivo ou central para onde os dados são destinados, devido a economia de materiais para transmissão, distância a ser transmitida e praticidade de manuseio, ampliando a segurança e minimizando possíveis acidentes.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho aborda o estudo de um sistema de medição que pode ser empregado em microrredes. Também disserta sobre sensores, tratamento de sinais e meios de comunicação sem fio, a fim de elaborar um dispositivo que meça tensão e corrente de uma determinada fonte ou carga, e transmita, via conexão sem fio, a um dispositivo que terá acesso aos dados para monitoramento e tomada de decisões. Um diagrama geral do projeto pode ser visto na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Diagrama geral do projeto



Fonte: Autor.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um sistema de medição de energia, no qual é projetado e construído módulos de aquisição para os sinais de tensão e corrente, em que

esses são condicionados e então digitalizados por um microcontrolador, que faz os cálculos das tensões e correntes eficazes e das potências, transmitindo essas informações via WiFi para um dispositivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o conceito de microrredes e pretende comentar as diferenças entre as microrredes c.c. e c.a. São abordados os sensores para medir tensão e corrente para serem aplicados em sistemas de medições, comentar sobre circuitos de condicionamento de sinais e, além disso, discorrer sobre os tipos de sistemas de transmissão sem fio, para que seja implementada uma transmissão de dados dessa maneira.

2.1 MICRORREDES

Atualmente, há um crescente aumento no uso de fontes renováveis e das gerações distribuídas de energia, com o objetivo de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e energias não renováveis. Assim, também existem os desafios no controle e operação de múltiplas fontes de energia e recursos distribuídos, o que faz emergir o conceito de microrredes e redes inteligentes, que se mostram como um passo para a modernização dos sistemas de energia elétrica, contribuindo para a integração das fontes distribuídas de energia (ABUABUD; BARRA, 2020).

O sistema de energia convencional que utiliza combustíveis fósseis, vem sendo substituídos por fontes renováveis que não geram gases que agravam o efeito estufa. Isso vem se mostrando como uma nova tendência de geração de energia, sendo gerada localmente usando fontes de energia não convencionais ou renováveis, como gás natural, biogás, energia eólica, células solares fotovoltaicas, células combustível e microturbinas e sua integração na rede de distribuição de energia. Este tipo de geração de energia é denominado como geração distribuída (GD). O termo ‘Geração Distribuída’ foi elaborado para distinguir este conceito da geração convencional centralizada (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009).

As fontes renováveis de energia vem sendo cada vez mais estudadas devido ao aumento da eficiência e modularidade. Além das turbinas eólicas e painéis solares que constituem a maior parte das fontes GD, também existem as células combustível e veículos elétricos (Kabalci; Kabalci, 2016).

No caso dos veículos elétricos, os mesmos podem ser utilizados como alternativa para fornecimento de energia nas situações nas quais ocorre a redução de oferta de energia, ou aumento da demanda por usuários, ou ainda, decorrente do aumento de custo, em países em que o custo varia dependendo o horário do dia. Nesse caso, o carro pode ser carregado no período em que a energia com custo reduzido, ou em períodos de menor demanda das concessionárias de energia elétrica, para ser reutilizada nas situações descritas acima, no consumo residencial,

por exemplo, gerando uma redução de custo. Esta forma de aproveitamento de energia poderá trazer vários benefícios, não somente aos consumidores, como também às concessionárias de energia (VAZ, 2019).

Microrredes são redes de abastecimento de geração distribuída e cogeração em pequena escala projetadas para fornecer energia para uma pequena comunidade, como um conjunto habitacional ou uma localidade suburbana, ou uma comunidade acadêmica ou pública, como uma universidade ou escola, uma área comercial, um local industrial, zona comercial ou região municipal. A microrrede é essencialmente uma rede de distribuição ativa, porque é o conglomerado de sistemas GD e diferentes cargas no nível de tensão de distribuição. Os geradores ou micro fontes empregados em uma microrrede são geralmente renováveis ou não convencionais (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009).

Uma das características é que a geração pode se adaptar de acordo com a necessidade das cargas, e as cargas podem ser vistas como cargas ativas, que consomem e produzem energia, como o exemplo das casas com geração solar instalada que, quando na presença da luz do sol, podem fornecer energia para rede, e na ausência, consumir.

As microrredes podem ser de corrente alternada, como pode ser visto na Figura 2.1, e podem ser de corrente contínua, como pode ser visto na Figura 2.2.

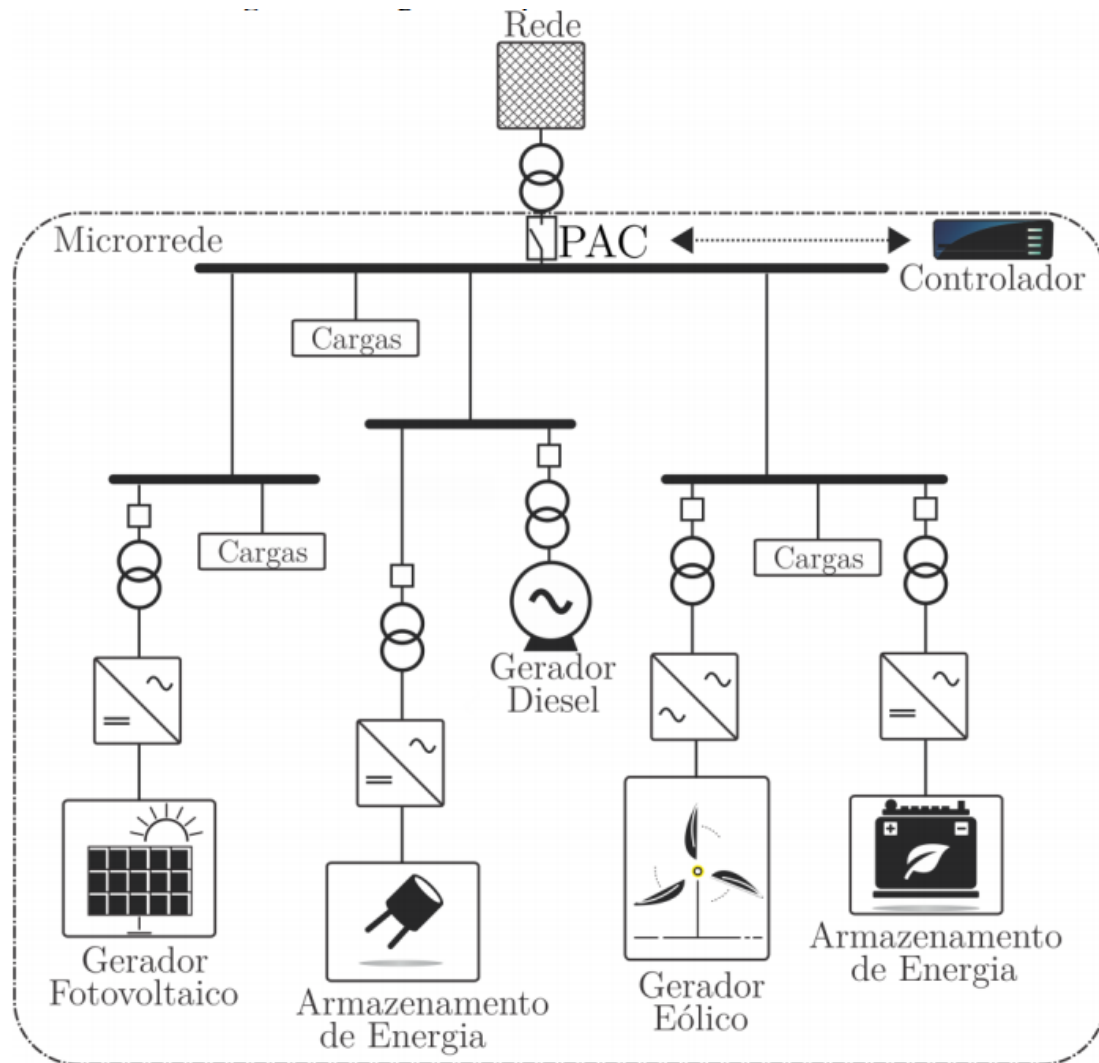
Microrredes de corrente alternada são formadas por um ou mais alimentadores de baixa tensão, com condutores independentes, formando sistemas isolados entre si (MACEDO, 2020).

Microrredes em corrente alternada podem ser trifásicas com o neutro, permitindo alimentar cargas de maior potência e máquinas rotativas trifásicas. Podem ser de uma única fase mais o neutro, o que reduz os custos de implementação e pode ser usado para regiões de baixo consumo. Também há possibilidade de ser trifásica sem o neutro, que somente permite conexões entre as fases (MACEDO, 2020).

Fontes de energia alternativas podem ser conectadas à microrrede c.a., que não necessariamente são de corrente alternada ou geram a mesma frequência da rede, como painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas, e nesses casos são necessários o uso de conversores de energia para que se possa fazer a conexão destas fontes à microrrede. Também a microrrede pode ser interligada à rede de distribuição principal utilizando transformadores.

As microrredes de corrente contínua são propostas para reduzir o número de conversões entre as fontes e as cargas. Estão presentes em sistemas isolados, como embarcações, veículos, redes de telecomunicações e subestações de energia, reduzindo a interferência eletromagnética entre os cabos. As microrredes nessa arquitetura necessitam um conversor c.a.-c.c. bidirecional para serem conectadas a rede principal de distribuição. Essas microrredes possuem uma operação mais simples, por não necessitarem de controle de frequência ou fase (MACEDO, 2020).

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de uma Microrrede c.a.



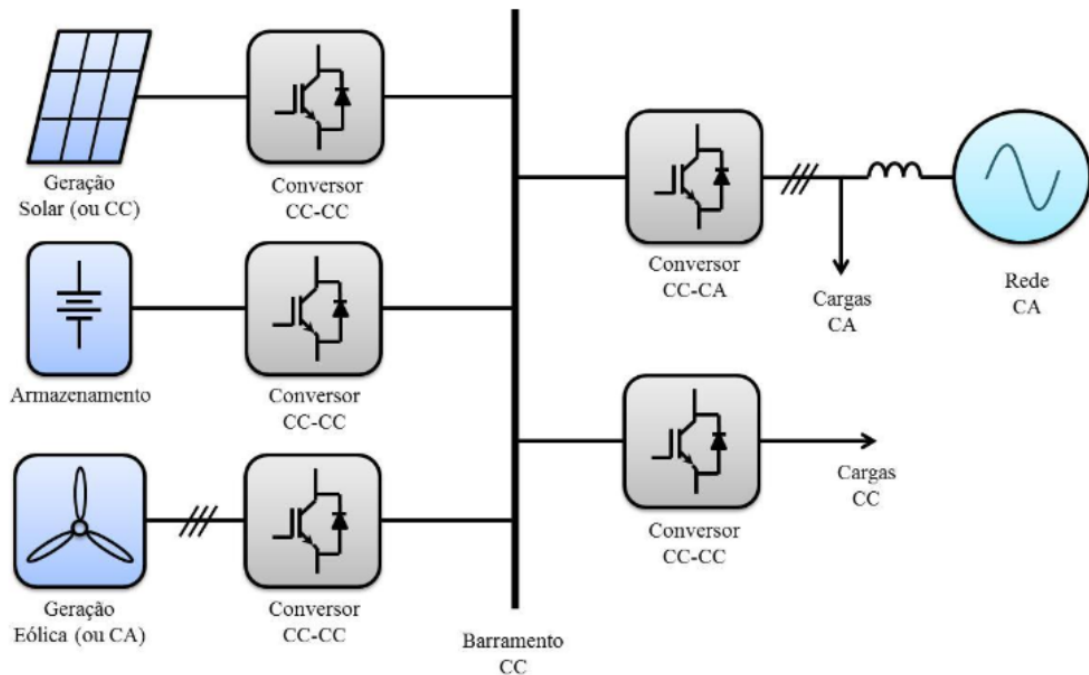
Fonte: Adaptado de (ABUABUD; BARRA, 2020)

As microrredes c.c. podem ser monopolares, bipolares ou homopolares, possuindo um ou mais alimentadores, como nas microrredes c.a. A configuração monopolar, que possui um polo mais o neutro, é uma configuração mais simples, já a configuração bipolar possui um condutor positivo e outro negativo. O sistema homopolar, possui os condutores positivo negativo e o neutro, permitindo o fornecimento de dois níveis de tensão, porém necessita de mais condutores na implementação (MACEDO, 2020).

Nas microrredes c.c. podem ser conectadas fontes de energias alternativas, que se forem de corrente contínua, são conectadas usando conversores c.c.-c.c., e se forem de corrente alternada, usando conversores c.a.-c.c.

As microrredes podem ser aprimoradas utilizando a ideia de redes inteligentes, onde podem ser usados sensores para fazer medições das fontes de energia e das cargas, a fim de obter informações da quantidade de energia que está sendo gerada e da quantidade de energia que

Figura 2.2 – Diagrama esquemático de uma Microrrede c.c.



Fonte: Adaptado de (NEVES, 2018)

as cargas estão consumindo, para que se possa fazer ajustes nas gerações, a fim de melhorar a eficiência da rede, ter um controle da energia que está sendo consumida pelas cargas e gerenciar o uso da energia de menor custo ou disponível no momento.

Rede inteligente é um conceito que se embasa na utilização de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, permitindo a implementação de estratégias de controle e otimização da rede de forma eficiente (FALCAO, 2010). Para a implementação de sistemas de monitoramento das microrrede, é necessário o uso de medidores de energia.

Medidores de energia são desenvolvidos para coletar informações e monitorar o sistema em uma rede inteligente (Clenitiaa et al., 2017). Esses medidores medem a quantidade de energia que é consumida pelas cargas, medindo continuamente a tensão e a corrente consumidas por esse dispositivo para fornecer a energia usada (Chaudhari et al., 2017).

Um dispositivo de medição utiliza sensores para a medição de tensão e corrente. O microcontrolador calcula o consumo de energia, fazendo leituras de tensão, corrente e potência da carga (Das; Saikia, 2015). Esse medidor coleta e analisa os dados para gerenciar dispositivos dentro da rede inteligente. O controle pode ser feito por meio da análise dos dados obtidos (Barman et al., 2018).

Assim, com um dispositivo que mede energia, pode-se mensurar a quantidade de energia que determinada carga está consumindo, e ajudar a tomar decisões da melhor maneira de usar os dispositivos (Chaudhari et al., 2017).

Um sistema de gerenciamento de dados pode coletar, armazenar e carregar dados para uma base de dados disponível na internet, que pode ser acessada para checar os detalhes do consumo de energia (Clenitiaa et al., 2017).

Também podem ser implementados contadores, para que, em caso de necessidade, seja possível desconectar uma ou mais cargas de menor importância, para que seja garantida a alimentação das cargas prioritárias.

Então, para a aplicação em uma microrrede, os sensores são componentes fundamentais, pois fazem a aquisição dos sinais a serem processados, a fim de disponibilizar as informações necessárias para o gerenciamento da microrrede. Os sensores necessários para a medição da energia são os de corrente e tensão. Esses podem medir os níveis de tensão e corrente em um gerador a fim de monitorar se está com níveis adequados de tensão e a quantidade de energia que está sendo gerada. Também é importante em relação aos armazenadores de energia, como em relação as baterias, já que, dessa forma, pode-se ter uma estimativa do nível de carga de uma bateria, da quantidade de energia que está sendo fornecida ou demandada e podendo fazer uma estimativa de sua vida útil.

2.2 SENSORES

Sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia, com o objetivo de relacionar a grandeza a ser mensurada, seja temperatura, pressão, corrente, tensão, dentre outras, com uma outra que possa ser lida por um dispositivo. Normalmente, o sinal de saída de um sensor não tem as características necessárias para serem diretamente analisadas por um microcontrolador, precisando passar por um circuito de interface, que é o circuito de condicionamento de sinais (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

Esses sensores podem ser aplicados à carga, para ter uma medida de quanto determinada carga está consumindo de energia e, assim, poder ajustar os geradores de forma mais adequada.

Além disso, os diversos conversores utilizados nas microrredes necessitam de medições, a fim de se fazer o controle, sendo os sensores que disponibilizam as informações para esse processo.

Segundo Thomazini e Albuquerque (2020), há uma série de características que devem ser levadas em consideração sobre a escolha dos sensores para uma determinada aplicação, dentre elas podem ser citadas:

- Sensibilidade, que é a relação entre a variação do sinal de saída e a variação da grandeza de entrada.
- Exatidão, que é a proximidade entre um valor obtido pelo sensor e um valor tido como verdadeiro, consistindo no erro da medida realizada pelo sensor em relação a um medidor padrão.
- Precisão é uma característica que diz respeito ao grau de repetibilidade do valor medido por um sensor, sendo a concordância entre as medidas realizadas por um mesmo instrumento no mesmo local e mesmas condições.
- Linearidade, que se refere a curva obtida pelos valores aferidos por um sensor que está medindo determinada grandeza, se esta grandeza variar como uma função de primeiro grau, e os valores medidos pelo sensor também formarem uma curva descrita por uma função de primeiro grau, esse sensor é linear.
- Alcance, que representa a faixa de valores capazes de serem medidos por esse sensor.
- Velocidade de resposta, que está relacionada com a rapidez com que o valor medido pelo sensor alcança o valor real do processo.

Com isso, deve-se analisar alguns tipos de sensores de tensão e corrente para entender quais seriam mais apropriados à uma aplicação em microrredes.

A tensão c.c. pode ser medida utilizando divisor resistivo, fotoacoplador ou sensor de efeito hall, enquanto a tensão c.a. pode ser medida utilizando divisor resistivo, sensor de efeito hall ou um transformador. No caso da corrente c.c., esta pode ser medida utilizando um resistor shunt ou um sensor de efeito hall. Já a corrente c.a. pode ser medida da mesma forma que a corrente c.c., como também com um transformador de corrente.

Em seguida, depois dos sensores terem feito a aquisição dos sinais da tensão e da corrente, e depois de passar pelo circuito de condicionamento, estes dispositivos alimentam a entrada analógica do microcontrolador, que faz os cálculos do consumo de energia do sistema (Das; Saikia, 2015).

Como exposto, os sensores fazem a aquisição do sinal, e antes deste alimentar a entrada analógica de um microcontrolador para fazer o processamento, é necessário um circuito para fazer o condicionamento do sinal, que será discutido na próxima seção.

2.3 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

O sinal que sai de um sensor é um sinal que pode possuir ruídos e, muito provavelmente, não compatível com o microcontrolador, pois o sinal pode precisar de um nível c.c. para ficar

de acordo com a faixa de leitura do microcontrolador, como também pode precisar adequar a amplitude do sinal, precisando, então, passar por um circuito eletrônico para fazer um condicionamento, antes de ser digitalizado pelo microcontrolador.

Esse tratamento também tem como objetivo, realizar uma filtragem de ruídos e, se necessário, fazer uma conversão de tipo de sinal, como transformar sinal de corrente em tensão, e fazer alguma operação matemática necessária antes do sinal ser digitalizado pelo microcontrolador.

Em situações em que se precisa medir alguma grandeza, é necessário o uso de sensores e utilizar circuitos de condicionamento, para fazer o tratamento dos sinais provenientes dos sensores. Esses circuitos tornam os sinais provenientes dos sensores compatíveis com o microcontrolador utilizado, fazendo várias operações, como amplificação, amortecimento, filtragem, detecção de RMS (Root Mean Square) que é o valor eficaz, valor máximo ou médio, linearização, etc. Essas operações podem gerar erros, portanto, deve-se executar um projeto preciso para que o erro fique dentro de faixas aceitáveis (Nicolae et al., 2011).

Os circuitos de condicionamento podem ser projetados usando amplificadores operacionais padrão. Este recurso permite a escolha de dispositivos com baixo consumo de energia (Nicolae et al., 2011).

A medição de tensão torna-se precisa e confiável usando um amplificador operacional que tenha um nível adequado de exatidão, precisão e sensibilidade, capaz de detectar variações de tensão de nível μV nas entradas diferenciais (Kabalci; Kabalci, 2016).

Também há o filtro de ruídos, que é uma parte importante do circuito de condicionamento, que tem a função de reduzir os ruídos que vêm junto com o sinal do sensor.

Filtros são circuitos cujo ganho de potência depende da frequência do sinal, assim, dando ganhos maiores em algumas faixas de frequência e menores em outras. Os filtros tem o efeito de permitir a passagem de uma faixa especificada de frequência (MUSSOI, 2004).

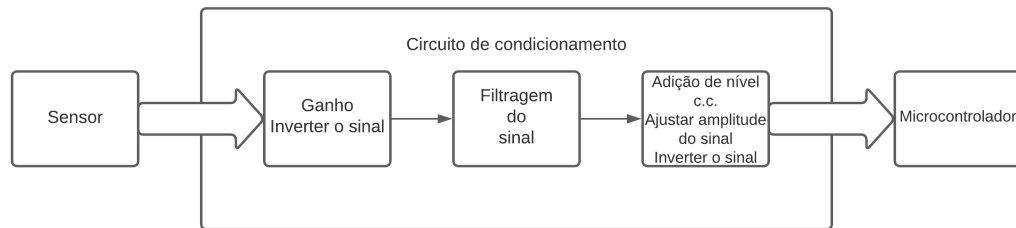
Os filtros podem ser implementados por softwares ou componentes eletrônicos, sendo respectivamente filtros digitais e filtros analógicos. Os filtros analógicos por sua vez, são divididos como filtros passivos e ativos. (MUSSOI, 2004)

Os filtros passivos são implementados com componentes passivos, como resistores, capacitores e indutores, sendo os indutores componentes volumosos comparado aos outros, o que faz com que não sejam os mais escolhidos para projetos de sinais, sendo indispensáveis em projetos de potência. (MUSSOI, 2004).

Filtros ativos são implementados com elementos ativos, como o amplificador operacional, assim precisando de fonte de alimentação. Também implementado com resistores e capacitores, não necessitando indutores, que tem peso e volume maiores comparados aos outros componentes (SEDRA; SMITH, 2007).

Assim, o que se pretende fazer para a aplicação pode ser demonstrado em três estágios, como na Figura 2.3. O primeiro que tem a função de dar um ganho no sinal do sensor. O segundo estágio, que é um filtro passa baixas, é responsável por filtrar os ruídos de alta frequência. E um terceiro estágio, responsável por dar um ganho no circuito e adicionar um nível c.c., para o sinal ficar adequado para ser digitalizado pelo microcontrolador.

Figura 2.3 – Esquemático do circuito de condicionamento



Fonte: Autor.

2.4 MICROCONTROLADOR

Os sinais provenientes dos sensores, depois de passar pelo circuito de condicionamento, são recebidos pelo microcontrolador, que tem o objetivo de fazer a aquisição dos dados, passando por um conversor analógico-digital, realizar cálculos e fazer a tarefa de apresentar as informações em alguma interface.

O microcontrolador também desempenha o papel de fazer a supervisão do sistema, pois com as medições é capaz de monitorar os componentes da microrrede, podendo com as informações obtidas saber se estão funcionando adequadamente (Barman et al., 2018).

Para fazer o monitoramento da rede, os dados adquiridos pelo microcontrolador devem ser enviados para um dispositivo de monitoramento por meio de uma rede sem fio.

Para a aplicação neste projeto, deve-se observar que é necessário medir até sete sinais com o microcontrolador, considerando uma carga trifásica, com três fases e um neutro, sendo medidos a tensão e as correntes nas três fases, e a corrente no neutro. Portanto, o microcontrolador deve ter no mínimo sete entradas com conversores analógicos-digitais. Também, considerando uma corrente alternada de 60 Hz e que, para uma boa resolução, deve-se garantir no mínimo 200 amostras por ciclo, então, o ADC (conversor analógico digital) do microcontrolador deve ser capaz de coletar doze mil amostras por segundo.

Assim, para a aplicação neste projeto, tem-se em vista quatro controladores, de dois fabricantes diferentes, que têm uma boa capacidade de processamento. Estes microcontroladores

são muito difundidos no meio acadêmico e industrial, possuem baixo custo e amplo material de apoio, sendo conhecidos como Arduino e ESP.

A plataforma Arduino foi que iniciou a grande integração entre estudantes e entusiastas de programação de microcontroladores na internet e no mundo, pois criou a interface de programação Arduino IDE (Ambiente de desenvolvimento integrado) e seu hardware compatível com sua plataforma. A plataforma, sendo de fácil instalação e utilização, foi o grande diferencial, e a grande quantidade de bibliotecas disponíveis gratuitamente na internet, que facilita muito na hora de elaborar as rotinas e fazer a programação, que é na linguagem de programação C (OLIVEIRA, 2019).

Para uma resolução de 10 bits, é recomendado que o ADC do Atmega328 opere com um clock de 50 kHz a 200 kHz. O Arduino UNO, por exemplo, trabalha com um cristal de 16 MHz, e utiliza um *prescaler*, que tem a função de reduzir o *clock*, dividindo-o por um determinado fator, para assim trabalhar com uma fração do *clock*. Dessa forma, o *clock* do conversor A/D pode assumir os seguintes valores:

$$16 \text{ MHz} / 2 = 8 \text{ MHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 4 = 4 \text{ MHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 8 = 2 \text{ MHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 16 = 1 \text{ MHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 32 = 500 \text{ kHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 64 = 250 \text{ kHz}$$

$$16 \text{ MHz} / 128 = 125 \text{ kHz}$$

Observando estes valores, pode-se utilizar o *prescaler* de 128, para garantir a resolução de 10 bits. Uma conversão necessita de 13 pulsos de clock e a primeira conversão necessita de 25 pulsos de clock. Assim, como a frequência de amostragem do ADC depende do clock, o valor de 125 kHz deve ser dividido por 13 para calcular a quantidade de amostras por segundo, que resulta em uma taxa de amostragem de 9,6 kHz. Também pode-se trabalhar com um cristal oscilador externo de 20 MHz, o que garante uma taxa de amostragem de aproximadamente 12 kHz (ATMEL, 2015).

O Arduino é uma opção para o projeto, sendo uma placa de código aberto e amplamente usada na engenharia, tendo vantagens como possuir um IDE que é executado em um computador para escrever e fazer upload do código para a placa física, sendo que utiliza uma linguagem de programação mais fácil que C e C ++ (Chaudhari et al., 2017).

O ESP teve seu início por uma empresa chinesa chamada Espressif, que fabricou o primeiro chip, ESP8266. Era um hardware promissor, porém sem nenhuma documentação escrita em inglês, somente em mandarim, dificultando sua popularização. Em contrapartida, tinha a vantagem de ter um baixo custo e um pequeno volume. Assim, atraiu a atenção de muitos pro-

gramadores que quiseram explorá-lo e também traduzir a documentação escrita em mandarim (OLIVEIRA, 2019).

O grande diferencial é que o chip ESP8266 possui um módulo de comunicação WiFi integrado. Mais tarde, a Espressif lançou o chip EPS32, que possui recursos melhores em relação ao ESP8266, além de ter um baixo custo (OLIVEIRA, 2019).

O ESP32 possui dois módulos de conversão analógico-digital, garantindo até 18 variáveis, e trabalha com uma taxa de amostragem máxima de 200 kHz no modo RTC e 2 MHz no modo DIG, porém possui algumas peculiaridades (ESPRESSIF, 2020).

O ESP possui o ADC1, que conta com oito canais, e o ADC2, que possui dez canais. Porém, este não pode ser utilizado enquanto o WiFi estiver em funcionamento, pois o driver do módulo WiFi compartilha o mesmo canal. Cada módulo pode ter até 6% de diferença nas leituras, pois a tensão de referência deles pode apresentar variações, ocasionando leituras diferentes entre os módulos. Por outro lado, a conversão não apresenta linearidade em toda faixa disponível para leitura. Assim, a Espressif apresenta um método de calibração e sugere que, caso necessário, seja implementado outros métodos para que a precisão desejada seja obtida (ESPRESSIF, 2020).

Faixas de tensão que possuem melhor linearidade:

0dB: 100 mV – 950 mV

2.5dB: 100 mV – 1250 mV

6dB: 150 mV – 1750 mV

11dB: 150 mV – 2450 mV

Sendo assim, os microcontroladores supramencionados possuem cada qual suas vantagens e desvantagens. Isso pode ser visto na Tabela 2.1 que mostra a comparação entre as funcionalidades desses controladores.

O ESP 8266 12E pode ser usado no projeto, que é um módulo programável com microcontrolador de 80 MHz. O módulo Wi-Fi é programado usando o software Arduino IDE (Barman et al., 2018). Também conta com um conversor analógico digital com boa resolução e, como é um microcontrolador bastante usado em projetos de IoT, pode-se encontrar diversos manuais na internet.

2.5 COMUNICAÇÃO DE DADOS E IOT

Para essa aplicação, é interessante que se possa enviar os dados por meio de uma rede de comunicação sem fio, e não através de cabos, que poderiam ficar muito compridos inviabilizando a implementação.

Tabela 2.1 – Comparação dos Controladores

	Arduino UNO	Arduino MEGA 2560	ESP32	ESP8266
Alimentação	5 V	5 V	2,2 V ~ 3,3 V	2,2 V ~ 3,3 V
Entrada Regulada (VIN)	7 V ~ 12 V	7 V ~ 12 V	5 V ~ 9 V	5 V ~ 9 V
Corrente de Consumo	Média de 15 mA	Média de 70 mA	Média de 80 mA	Média de 80 mA
Temperatura de Operação	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C
Processador	AVR® 8-bit RISC	ATmega2560 RISC com até 16 MIPS	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6	Tensilica® L106 ultra-low power 32-bit
Frequência de Operação	0 ~ 16 MHz	0 ~ 16MHz	80MHz~240MHz	80MHz~160MHz
Memória FLASH	32 kB	256 kB	4 MB	4 MB
Memória RAM/SRAM	2 kB	8 kB	520 kB	36 kB
Memória ROM/EEPROM	4 kB	4 kB	448 kB	64 kB
Pinos de I/O	23 pinos com 6 PWM	54 pinos com 14 PWM	34 pinos com 16 PWM	13 pinos com 9 PWM
Conversores ADC	6 ADC com 10-bit de resolução (1024 bits)	16 ADC com 10-bit de resolução (1024 bits)	18 ADC com 12-bit de resolução (4096 bits)	1 ADC com 10-bit de resolução (1024 bits)
Conversores DAC	Nenhum	Nenhum	2 DAC com 8-bit de resolução (256 bits)	Nenhum
WiFi	Somente com Shield	Somente com Shield	2,4 GHz, 802.11 b/g/n/e/i	2.4 GHz com suporte a WPA e WPA2, 802.11 b/g/n, P2P e soft-AP
Bluetooth	Não Possui	Não Possui	Bluetooth Low Energy v4.2	Não Possui

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2019)

Fios e cabos passando informação de controladores para uma central de comando, se tornam inconvenientes, uma vez que geram custos e podem estar sujeitos a ruídos. Neste caso, pode ser utilizado o conceito de 'internet das coisas' para transmitir a informação que foi obtida pelos sensores, via transmissão sem fio para alguma central.

Visto isso, torna-se interessante poder enviar os dados adquiridos pelo microcontrolador para um dispositivo por meio de uma conexão sem fio, onde os dados possam estar sendo

continuamente monitorandos. As tecnologias consideradas para comunicação em *smart grid* são várias, como GSM, PLCC, 3G, WiFi, ZigBee, GPRS, Bluetooth, WiMax, etc.

A transmissão de dados pode ser feita por diversas tecnologias, como ZigBee, métodos de RF, comunicação via rede elétrica e GSM, no entanto, as redes GSM são as melhores dentre essas tecnologias (Rawat et al., 2016).

O módulo GSM é usado para estabelecer a comunicação entre um computador e um sistema GSM. Requer um cartão SIM, assim como os telefones celulares, para fazer a comunicação com a rede. Estes também possuem um número IMEI, semelhante a telefones celulares. Pode ser usado com a placa Arduino para enviar e receber dados para se comunicar com o sistema por meio do pino de recebimento e transferência do GSM para o Arduino Uno (Chaudhari et al., 2017).

As medições podem ser transmitidas com o uso de transmissor de RF do medidor de energia para o nó do meio que contém um receptor de RF e módulo. O módulo GSM pode encaminhar as informações para a central de monitoramento. A técnica planejada pode adicionar 2 tipos de comunicações, comunicação sem fio inicial de curta distância com uso de transceptor de RF do medidor de energia ao nó do meio, e o segundo para comunicação sem fio de longa distância do nó central até a central de monitoramento com o uso do módulo GSM (Rawat et al., 2016).

O módulo GSM pode ser substituído por IoT (Internet of Things) (Chaudhari et al., 2017). A internet das coisas (IoT) são dispositivos com um endereço de IP, conectados em uma rede e capazes de transferir e coletar dados (Barman et al., 2018).

O conceito de IoT também pode ser implementado em vários ambientes de trabalho, como automação residencial, detector automático de nível de água, sistema de controle de tráfego, etc (Barman et al., 2018).

O resultado é carregado a cada intervalo no espaço da nuvem e o monitoramento pode ser feito pelo consumidor ou cliente, bem como pelo fornecedor ou produtor (Barman et al., 2018).

O sistema de gerenciamento de dados pode coletar, armazenar e carregar dados para uma base de dados disponível na internet, que pode ser acessada para checar os detalhes do consumo de energia (Clenitiaa et al., 2017).

Cada sistema de transmissão possui vantagens e desvantagens, e essas podem ser analisadas para decidir qual o melhor método de transmissão de dados para esta aplicação, podendo até ser viável o uso de mais de um método, considerando que é adequado um método de transmissão contínuo, seguro e confiável.

3 PROJETO E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o projeto, o layout e os resultados, onde será abordada a escolha dos sensores e como é feita a aquisição do sinal. Logo é discutido sobre como é projetado e executado o circuito para o condicionamento dos sinais, é apresentado o microcontrolador e o meio que foi utilizado para transmitir os dados.

3.1 DEFINIÇÃO DOS SENSORES

A escolha dos sensores é uma parte importante do projeto, precisando de um sensor de tensão e um de corrente. Para medir a tensão com um baixo custo e uma boa precisão, optou-se por usar um divisor de tensão. Já para mensurar a corrente, é interessante pensar primeiramente em um tipo de sensor ideal, que tenha características como:

- Um sensor que não necessite seccionar o condutor e nem desconectar os cabos para realizar a instalação.
- Também um sensor com alimentação unipolar e de 5 V no máximo, simplificando o projeto de alimentação.
- Sensor com saída em corrente, pois o sinal apresenta menos ruídos, e assim transformar o sinal em tensão quando estiver próximo ao microcontrolador.

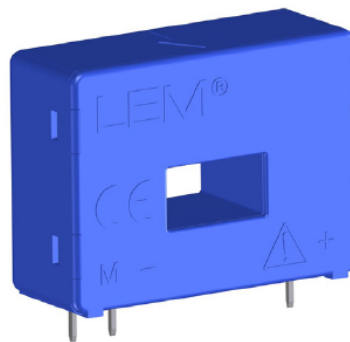
Com esse intuito, foram pesquisados vários sensores, para que fosse possível tomar uma decisão. Foram encontrados os sensores HJB050T0T03 da Electrohms e o 50RS020AMI-E12VDC da Secon, que se aproximam bastante das características desejadas para este projeto, porém só é possível obtê-los contactando o fabricante e fazendo encomenda, o que os torna inviáveis para este projeto. Então, levando em consideração as diversas características e os preços, foi decidido por usar o LA 55-P da LEM, apresentado na Figura 3.1, que é viável para pôr em prática o presente projeto. A comparação desses três sensores citados, pode ser vista na Tabela 3.1.

Este sensor tem algumas características como: poder medir uma corrente de -70 A até 70 A, ou uma corrente eficaz de 50 A; ter uma tensão de alimentação simétrica de 12 V até 15 V; possuir um erro de medição de 0,65 % a 25 °C, e poder medir corrente contínua e alternada de até 200 kHz.

Tabela 3.1 – Lista dos sensores citados

Fabricante	LEM	Secon	Electrohms
Modelo	LA 55-P	50RS020AMI-E12VDC	HJB050T0T03
Corrente RMS Nominal	50 A	50 A	50 A
Intervalo de Mediada	-70 A até 70 A	-70 A até 70 A	-70 A até 70 A
Saída	70 mA até 70 mA	0 mA até 20 mA	4 mA até 20 mA
Precisão	$\pm 0.9\%$		$\pm 0.5\%$
Alimentação	$\pm 12...15V$	12V	5v
Característica de instalação	Não invasivo	Ideal	Ideal

Figura 3.1 – Sensor LEM LA 55-P



Fonte: Datasheet LEM

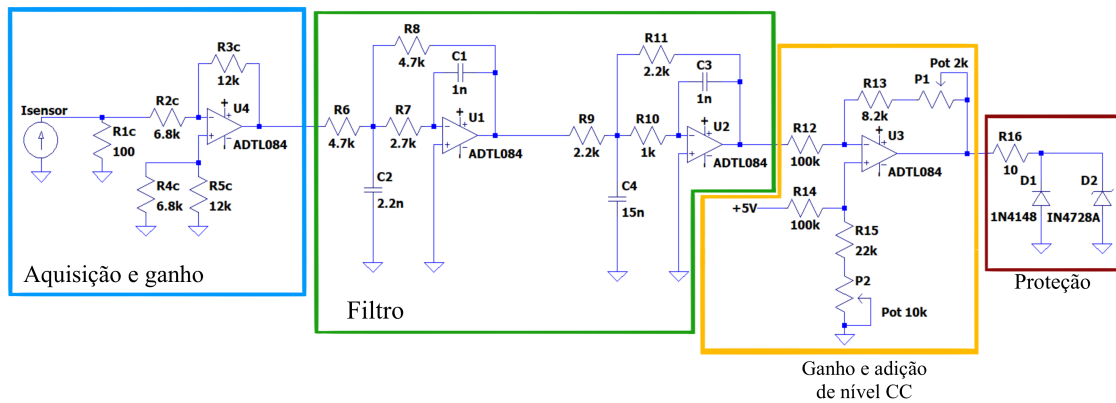
3.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

O sinal adquirido pelo sensor está sujeito a ruídos, sejam provenientes de interferências eletromagnéticas do ambiente ou de diversos conversores chaveados que estão presentes em diversos equipamentos. Esses ruídos são inconvenientes para os projetos, então, é oportuno que se tenha um filtro para eliminá-los do sinal. Além disso, ajustes precisam ser feitos para adequar o sinal que está saindo do sensor à entrada analógica do microcontrolador. No caso deste projeto, é desenvolvido um circuito de três etapas. O circuito para o sensoriamento da corrente pode ser visto na Figura 3.2 e o circuito para o sensoriamento da tensão na Figura 3.3, ambos estão descritos na sequência.

Pode-se perceber que os dois circuitos são semelhantes, tendo diferença apenas no primeiro estágio, onde ocorre a aquisição do sinal. Logo em seguida à aquisição do sinal, aplica-se um ganho.

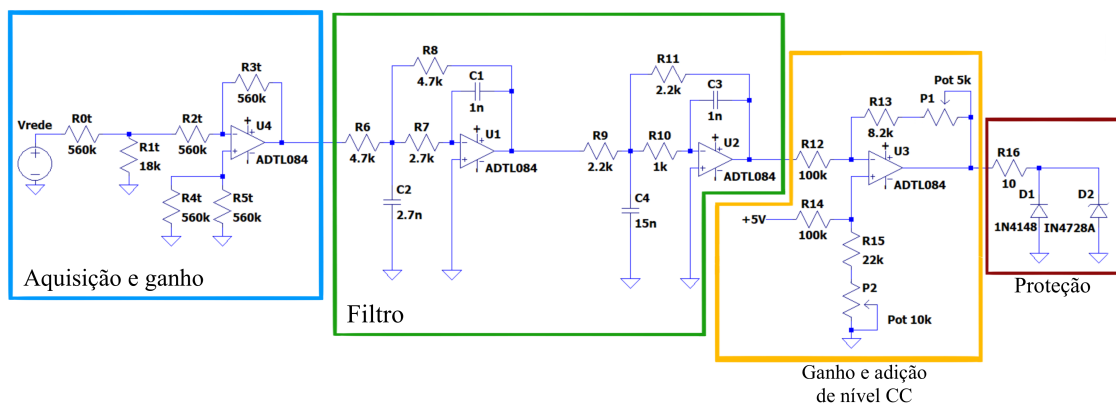
No primeiro estágio do circuito da Figura 3.2, que pode ser visto na Figura 3.4, é utilizada uma fonte de corrente para representar o sensor que se comporta como uma fonte de corrente controlada pela corrente que se deseja medir. A relação entre a corrente de saída pela de entrada é de um para mil, de modo que se tiver uma corrente de 50 A passando pelo orifício do sensor, este irá fornecer uma corrente de 50 mA.

Figura 3.2 – Circuito para aquisição e condicionamento do sinal de corrente



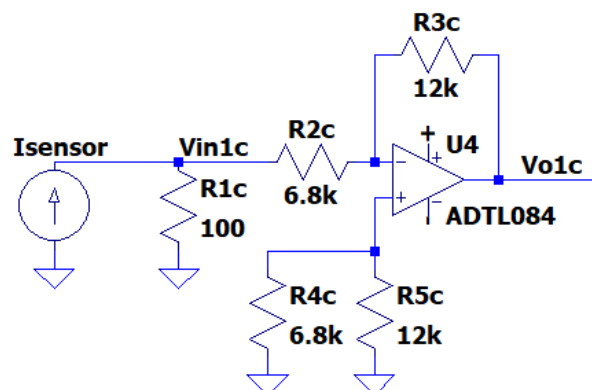
Fonte: Autor.

Figura 3.3 – Circuito para aquisição e condicionamento do sinal de tensão



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de corrente, onde ocorre a aquisição do sinal e o ganho



Fonte: Autor.

O resistor $R1c$ deve ser entre $50\ \Omega$ e $160\ \Omega$, sendo assim, foi escolhido uma resistência de $100\ \Omega$, de modo que a corrente de saída do sensor é transformada em um sinal de tensão de acordo com as equações 3.1 e 3.2. Então, em seguida é utilizado um amplificador inversor e dado um ganho de acordo com as equações 3.3 e 3.4 antes de passar para o próximo estágio.

$$V_{in1c} = I_{sensor} \cdot R1c \quad (3.1)$$

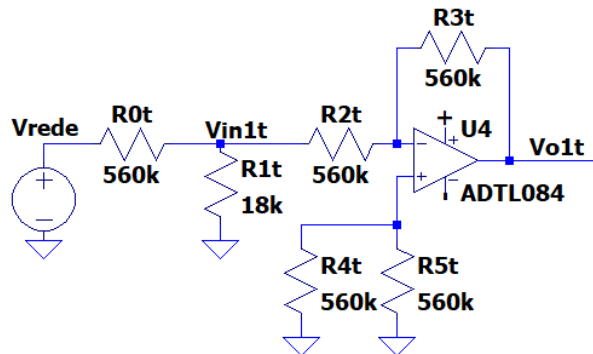
$$V_{in1c} = 100 \cdot I_{sensor} \quad (3.2)$$

$$V_{o1c} = -\frac{R3c}{R2c} V_{in1c} \quad (3.3)$$

$$V_{o1c} = -1,76 \cdot V_{in1c} \quad (3.4)$$

No caso do primeiro estágio do circuito da Figura 3.3 que pode ser visto na Figura 3.5, tem o propósito de fazer a aquisição do sinal de tensão. Este é projetado para medir uma tensão de até 270 V eficaz, que representa 20% acima da tensão nominal da rede. Para fazer a aquisição desse sinal, é utilizado um divisor de tensão, que é descrito de acordo com as equações 3.5 e 3.6.

Figura 3.5 – Primeiro estágio do circuito de condicionamento do sinal de tensão, onde ocorre a aquisição do sinal e o ganho



Fonte: Autor.

$$V_{o1t} = \frac{R1t}{R0t + R1t} V_{in1t} \quad (3.5)$$

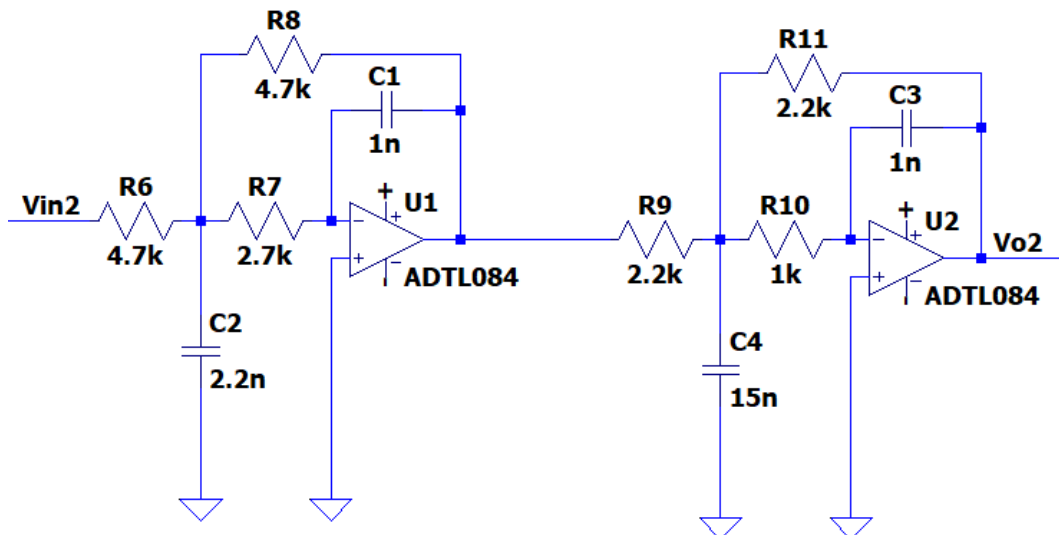
$$V_{o1t} = 0,0311 \cdot V_{in1t} \quad (3.6)$$

A equação 3.5 é na realidade uma simplificação, que pode ser feita com a condição de que a corrente que passa pelo resistor $R1t$ seja bem maior que a corrente que segue pelo resistor $R2t$, o que acontece neste circuito.

Logo em seguida, o sinal passa por um amplificador inversor com ganho unitário, assim, $Vo1t = -Vin1t$. Foram escolhidos resistores de $560\ \Omega$ para $R2t$ e $R3t$, justamente para que a corrente que passa por $R1t$ seja bem maior que a corrente que segue para o resto do circuito. Depois disso, o sinal segue para a próxima parte do circuito.

O próximo estágio, que pode ser visualizado na Figura 3.6, tem a função de filtrar ruídos. Assim, através do software FilterPro®, foi projetado um filtro passa baixas, com algumas condições.

Figura 3.6 – Segundo estágio do circuito



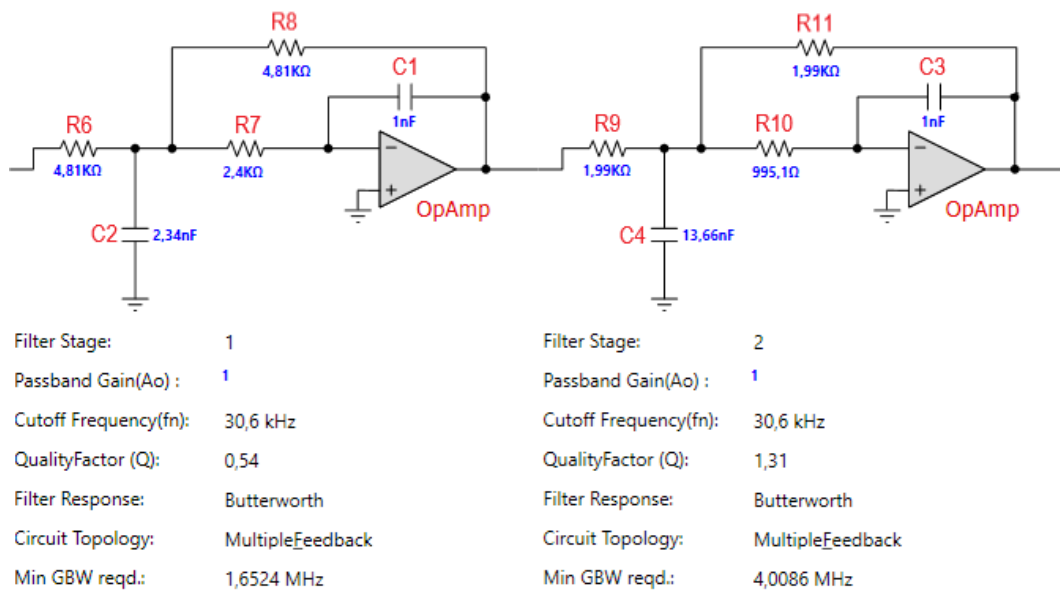
Fonte: Autor.

A norma IEC 61000-3-2, que recomenda os limites de componentes harmônicas em equipamentos, estabelece limites para as primeiras 51 harmônicas. Considerando que se deseja medir a energia reativa, incluindo as geradas pelas harmônicas até o limite estabelecido pela norma, então o circuito deste projeto deve ter essa mesma banda passante. Como a rede em questão é de 60 Hz, é importante que o circuito tenha frequência de corte superior a 3060 Hz. Porém, como a fase do sinal filtrado sofre interferência aproximadamente uma década antes, o filtro projetado tem frequência de corte de 30600 Hz.

A topologia utilizada é a de realimentação múltipla, pois tem a vantagem de ter menos componentes em relação a outras topologias como a *Sallen-key* e como ele trabalha com a entrada não inversora aterrada, faz com que esse circuito seja mais estável no seu ganho c.c. e tenha menos problemas de ruído.

Outras características que se pode destacar, é um filtro de quarta ordem, com ganho unitário e que utiliza dois estágios. O formato de resposta utilizado foi o *Butterworth*, pois tem a resposta em frequência bastante plana, não tendo ondulação como em outros tipos de respostas. O projeto do filtro e os dados podem ser visualizados na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Filtro de realimentação múltipla com dois estágios projetado utilizando o software FilterPro



Fonte: Autor.

No circuito da simulação os valores dos componentes, foram substituídos por valores comerciais próximos aos valores obtidos no projeto.

No próximo estágio foi projetado um circuito, como pode ser visto na Figura 3.8, que aplica um nível c.c. ao sinal, pois o processador trabalha apenas com sinais positivos. Sendo assim, essa etapa é necessária para que o processador possa trabalhar com este sinal.

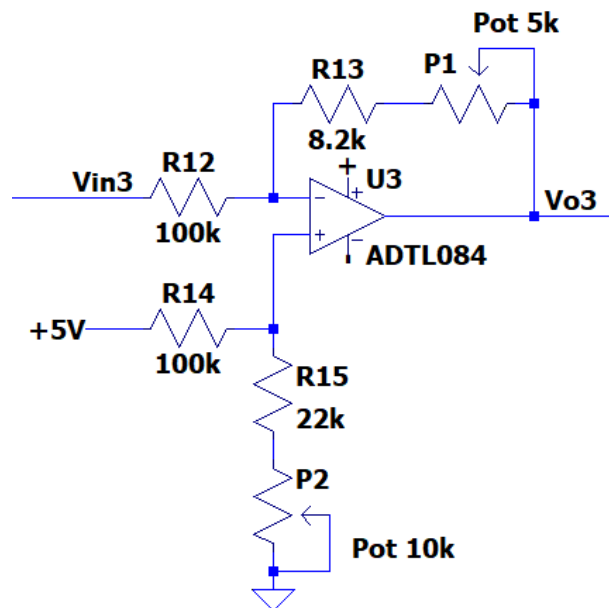
Observa-se que, no microcontrolador escolhido para este projeto, o conversor analógico digital não é linear em toda sua faixa de leitura e, sendo assim, o circuito projetado adiciona um nível c.c. de 1,22 V, a fim de operar apenas na faixa linear do conversor analógico digital.

Além disso, este estágio aplica um ganho no circuito, a fim de ajustar a escala deste sinal, para que fique nos níveis de trabalho do processador. Este ganho e esse nível c.c. aplicados ao sinal, estão representados pelas equações 3.7 e 3.8. Assim, pode-se alterar P1 para ajustar o ganho e P2 para ajustar o nível c.c. do sinal.

$$Vo3 = -Vin3 \cdot \frac{R13 + P1}{R12} + \frac{5(R15 + P2)}{(R14 + R15 + P2)} \frac{(R12 + R13 + P1)}{R12} \quad (3.7)$$

$$Vo3 = -Vin3 \cdot \frac{8,2k + P1}{100k} + \frac{(110k \cdot P1 + 108,2k \cdot P2 + 5 \cdot P1 \cdot P2 + 11902M)}{100k \cdot P2 + 12200M} \quad (3.8)$$

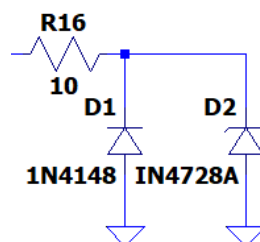
Figura 3.8 – Terceiro estágio do circuito, responsável por dar um ganho e adicionar um nível c.c. ao sinal



Fonte: Autor.

Por último, como pode ser visto na Figura 3.9, foram utilizados dois diodos, um para evitar que a tensão se torne negativa, e um zener, para evitar que a tensão exceda os 3,3V, para evitar tensões acima e abaixo do limite que o microcontrolador trabalha, e também para proteger caso venha a ocorrer algum pico de tensão que possa afetar o microcontrolador.

Figura 3.9 – Último estágio do circuito



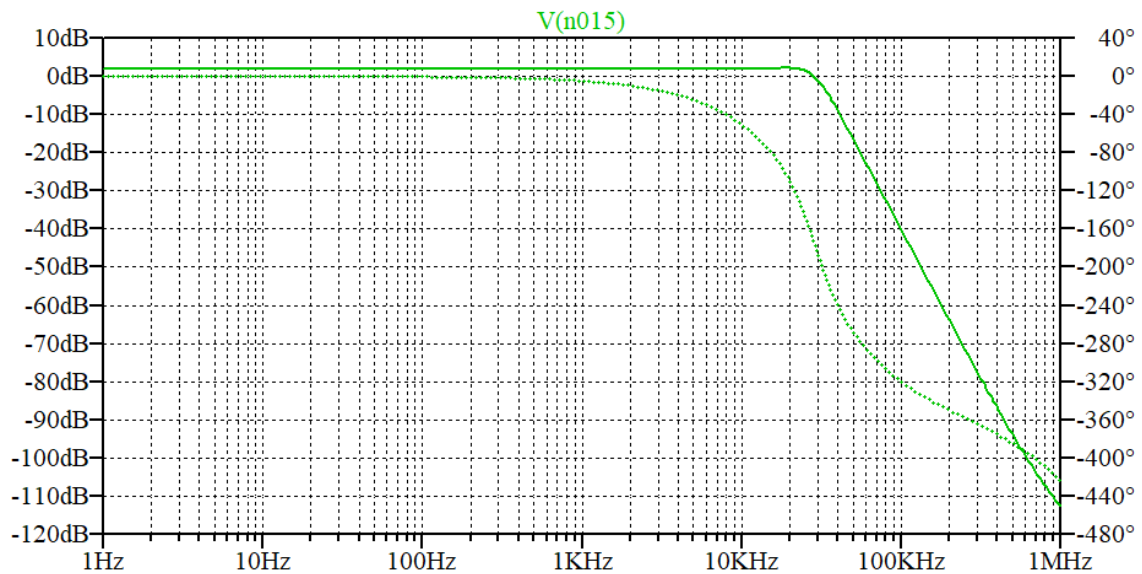
Fonte: Autor.

A função de transferência do circuito pode ser vista na Figura 3.10, que possui uma característica passa-baixas com a frequência de corte em aproximadamente 30600 Hz e, como esperado uma década antes, a fase já está sofrendo interferência. Também se pode notar que tem uma resposta bastante plana na banda passante.

3.3 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

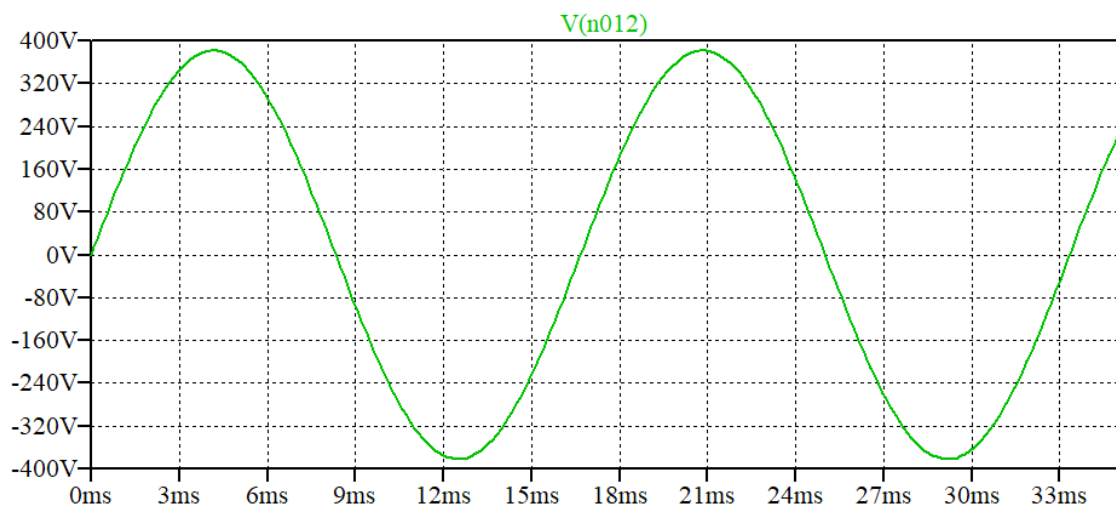
Realiza-se as simulações para conferir o funcionamento dos circuitos onde a tensão de entrada simulada pode ser vista na Figura 3.11, que é uma tensão de 382 V de pico.

Figura 3.10 – Módulo e fase da função de transferência do circuito de condicionamento



Fonte: Autor.

Figura 3.11 – Tensão de entrada de 270 V eficaz



Fonte: Autor.

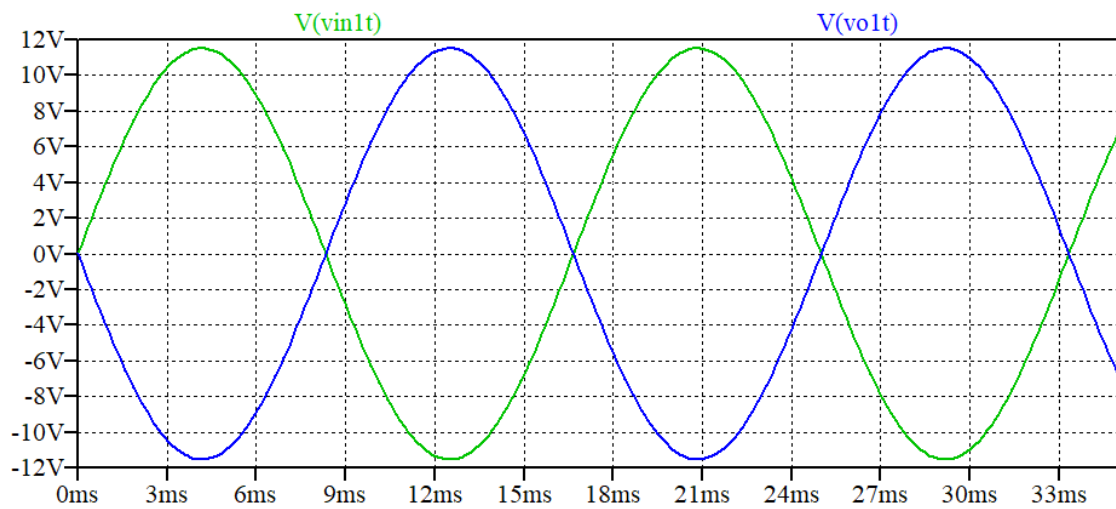
Com o divisor de tensão V_{in1t} , como descrito na equação 3.6, na saída deste tem-se uma tensão de aproximadamente 11,9 V de pico, como pode ser visto na Figura 3.12. E logo após passar pelo amplificador inversor, o sinal V_{o1t} , pode ser visto na Figura 3.12

Pode-se verificar o sinal na saída do circuito, com as características desejadas para poder ser digitalizado pelo microcontrolador, na Figura 3.13.

Também são realizadas simulações para o circuito de aquisição do sinal de corrente, fornecido pelo sensor de aproximadamente 7,1 mA pode ser visto na Figura 3.14

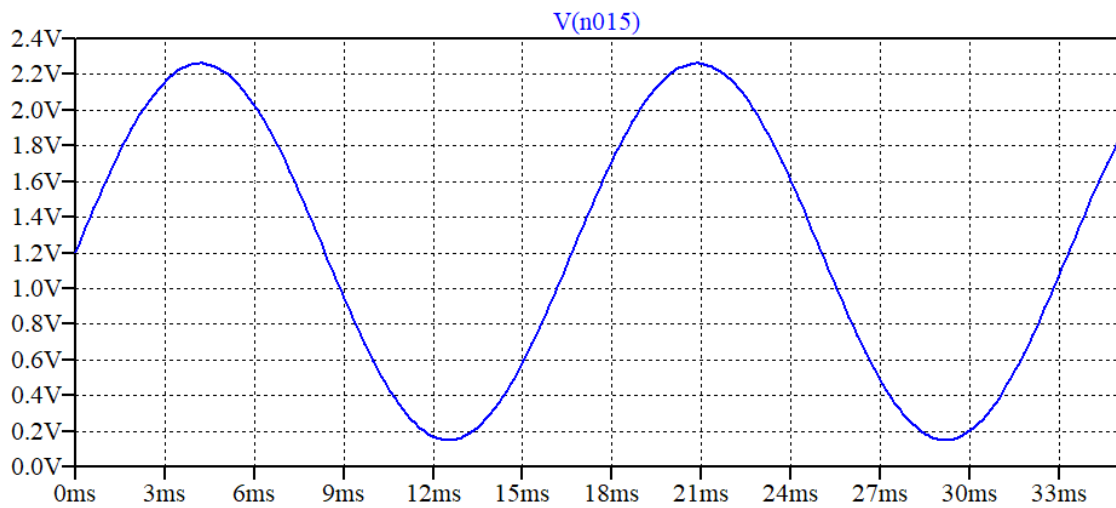
O sinal é convertido em tensão, como na equação 3.2, e pode ser visto na Figura 3.15. Em seguida, um ganho é dado ao sinal, como na equação 3.4, e pode também ser visto na Figura 3.15.

Figura 3.12 – Sinal em Vin1t e Volt



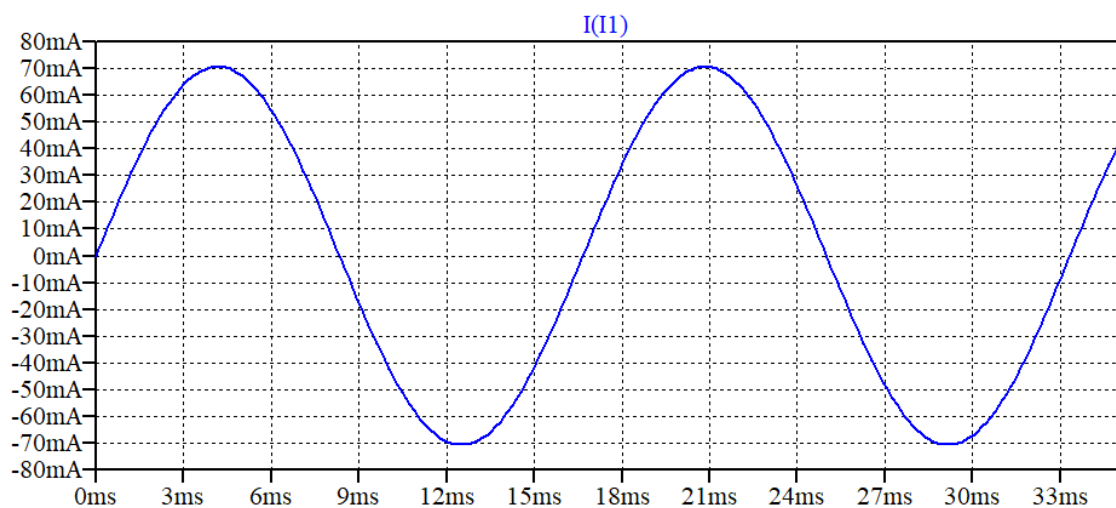
Fonte: Autor.

Figura 3.13 – Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de tensão



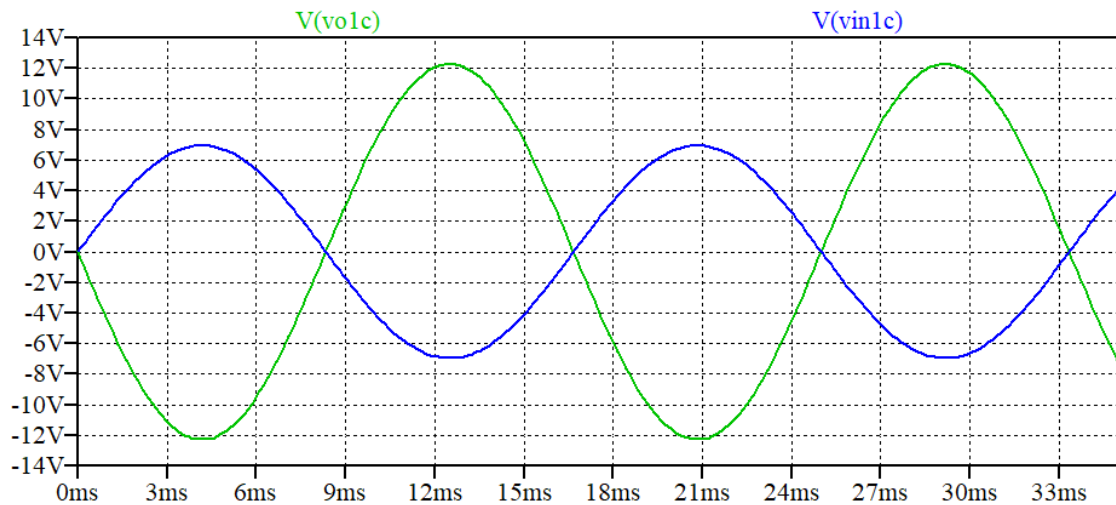
Fonte: Autor.

Figura 3.14 – Corrente fornecida pelo sensor de corrente



Fonte: Autor.

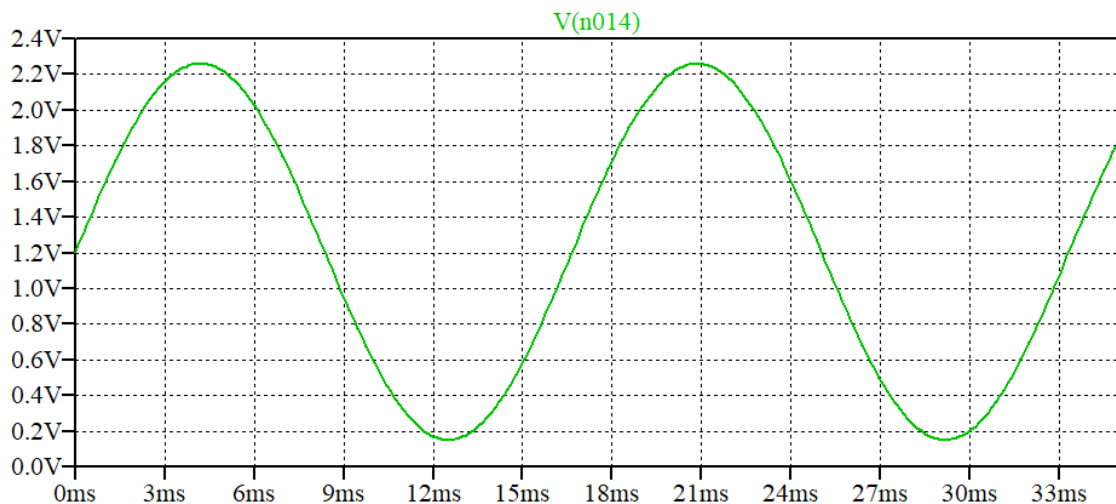
Figura 3.15 – Sinal em Vin1c e Vo1c



Fonte: Autor.

Assim, o sinal de saída do circuito, também com as características necessárias para ser digitalizado pelo microcontrolador, pode ser visto na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de corrente

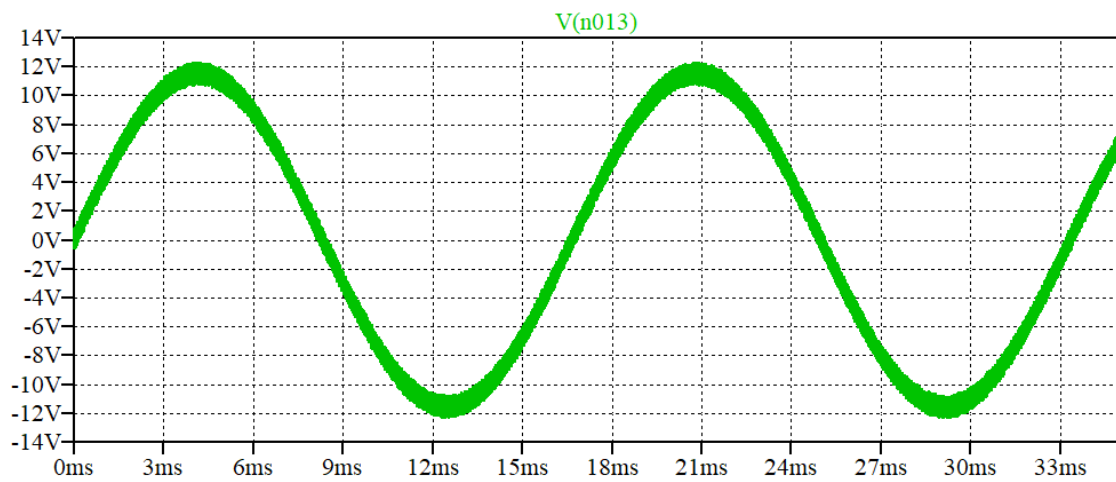


Fonte: Autor.

São feitas simulações introduzindo ruídos no circuito, em que o sinal de entrada de tensão com ruído é observado na Figura 3.17 e, assim, pode-se observar que a amplitude de ruído do sinal apresentado em Vin1t é de 1,8 V, e o ruído no sinal de saída do circuito, observado na Figura 3.18, foi atenuado, apresentando uma amplitude de 0,048 V.

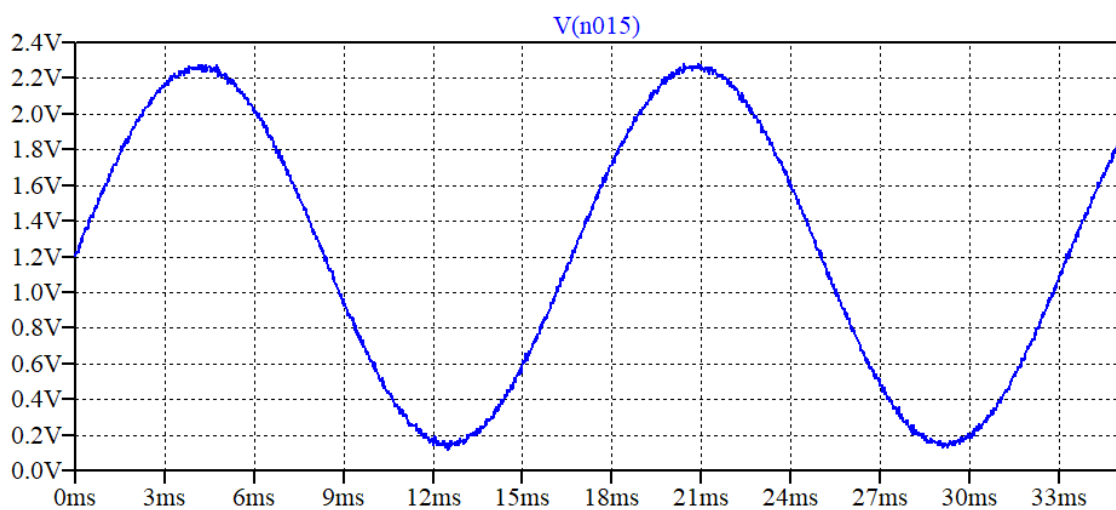
O circuito para condicionar o sinal do sensor de corrente também é simulado introduzindo ruídos. O sinal do sensor simulado com ruído, é observado na Figura 3.19, em que o ruído em Vin1c apresenta uma amplitude de 1,0 V, e o sinal que se apresenta na saída deste circuito, que pode ser observado na Figura 3.20, apresenta uma ruído com alitude de 0,040 V, podendo-se também observar que o ruído foi atenuado.

Figura 3.17 – Sinal com ruído em Vin1t do circuito de aquisição do sinal de tensão



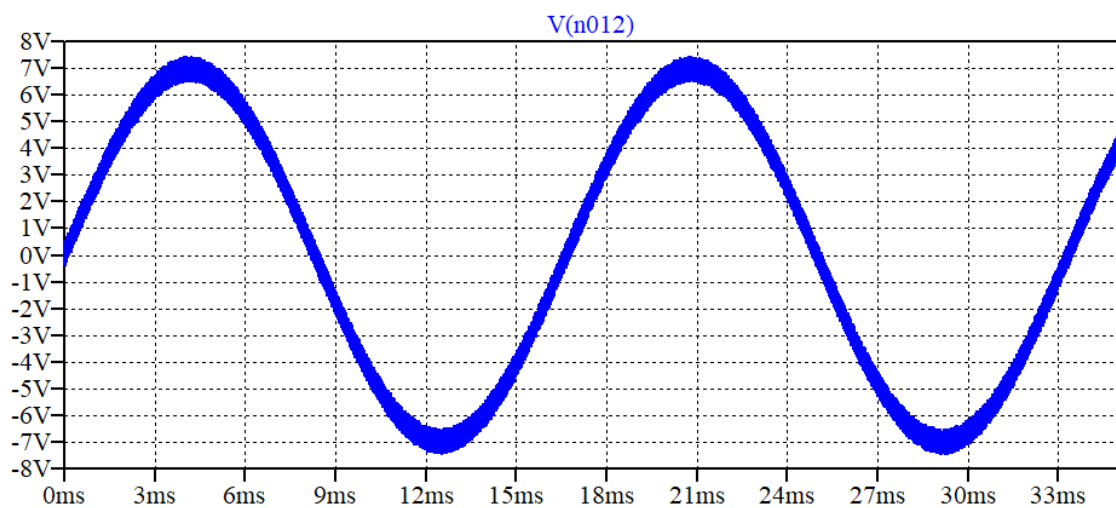
Fonte: Autor.

Figura 3.18 – Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de tensão com ruído na entrada



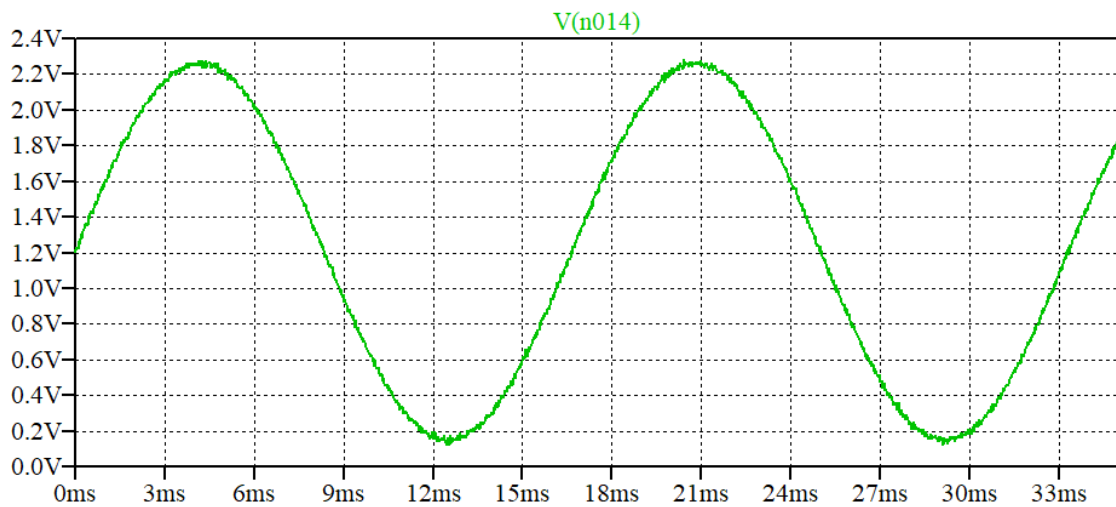
Fonte: Autor.

Figura 3.19 – Corrente fornecida pelo sensor de corrente com ruído



Fonte: Autor.

Figura 3.20 – Sinal de saída do circuito de condicionamento do sinal de corrente com ruído na entrada

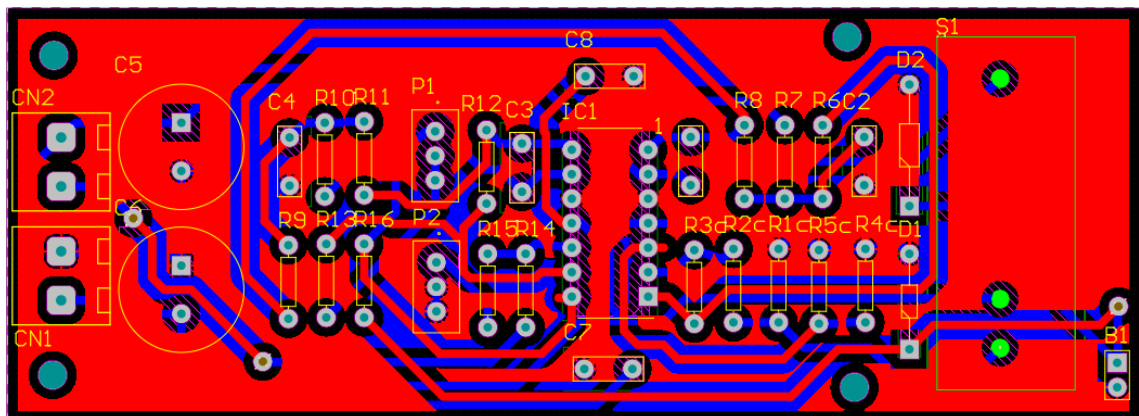


Fonte: Autor.

Assim, terminado o projeto, foram feitos os esquemáticos dos circuitos, que podem ser visualizados no Anexo B e a confecção dos *layouts* das placas de circuito impresso (PCIs), do circuito do sensoriamento de corrente, como pode ser visto nas Figuras 3.21 e 3.22, e do sensoriamento de tensão, como pode ser visto nas Figuras 3.23 e 3.24.

As listas de componentes para a confecção dos circuitos podem ser observadas no Anexo C.

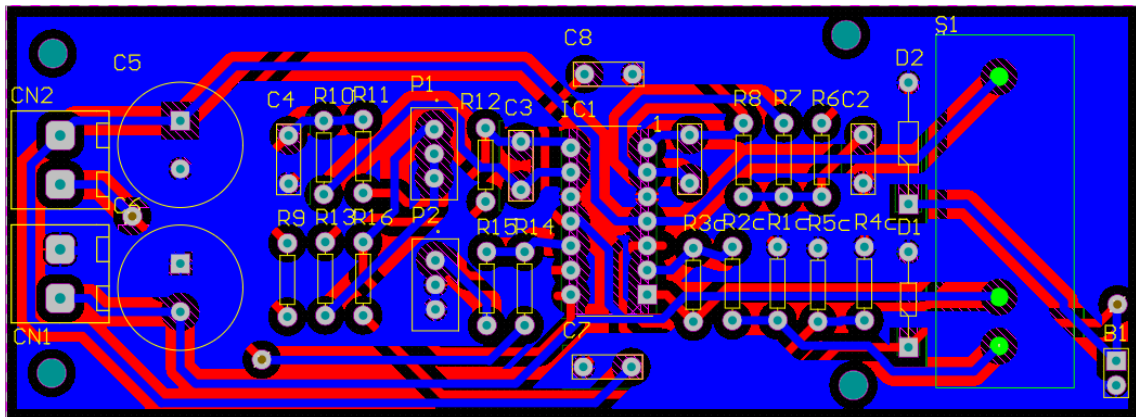
Figura 3.21 – Face superior do layout do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente



Fonte: Autor.

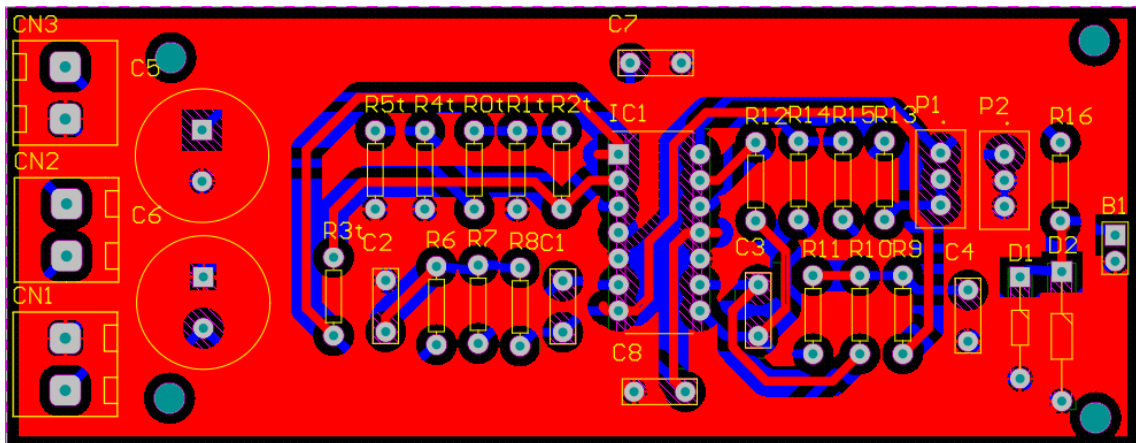
Com o layout das PCIs prontos, as placas foram montadas, podendo ser visto o resultado nas Figuras 3.25 e 3.26.

Figura 3.22 – Face inferior do layout do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente



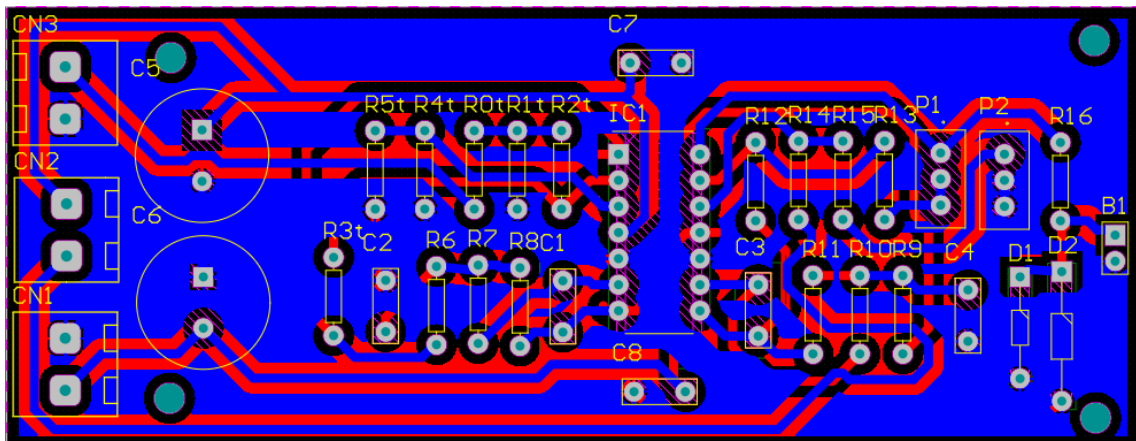
Fonte: Autor.

Figura 3.23 – Face superior do layout do circuito de condicionamento do sinal de tensão



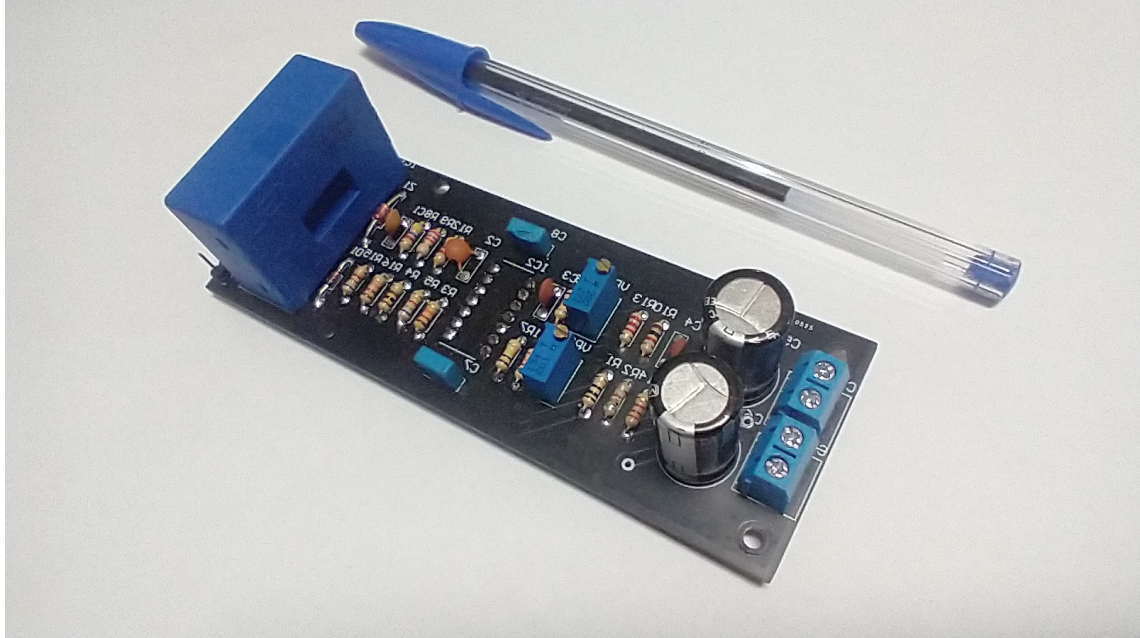
Fonte: Autor.

Figura 3.24 – Face inferior do layout do circuito de condicionamento do sinal de tensão



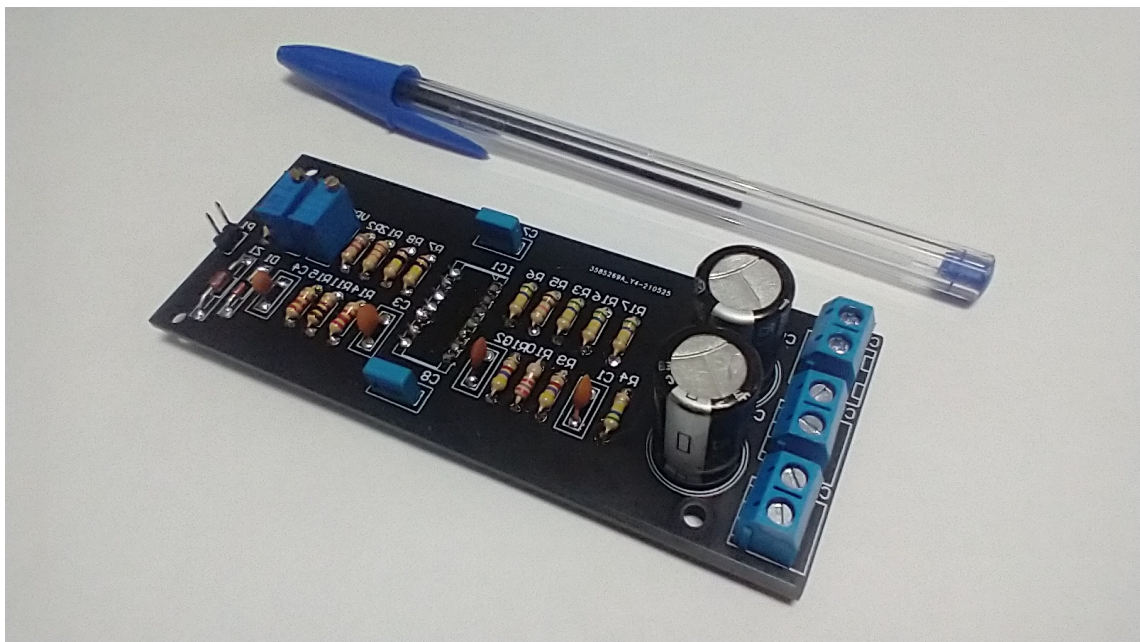
Fonte: Autor.

Figura 3.25 – Módulo de medição de corrente



Fonte: Autor.

Figura 3.26 – Módulo de medição de tensão



Fonte: Autor.

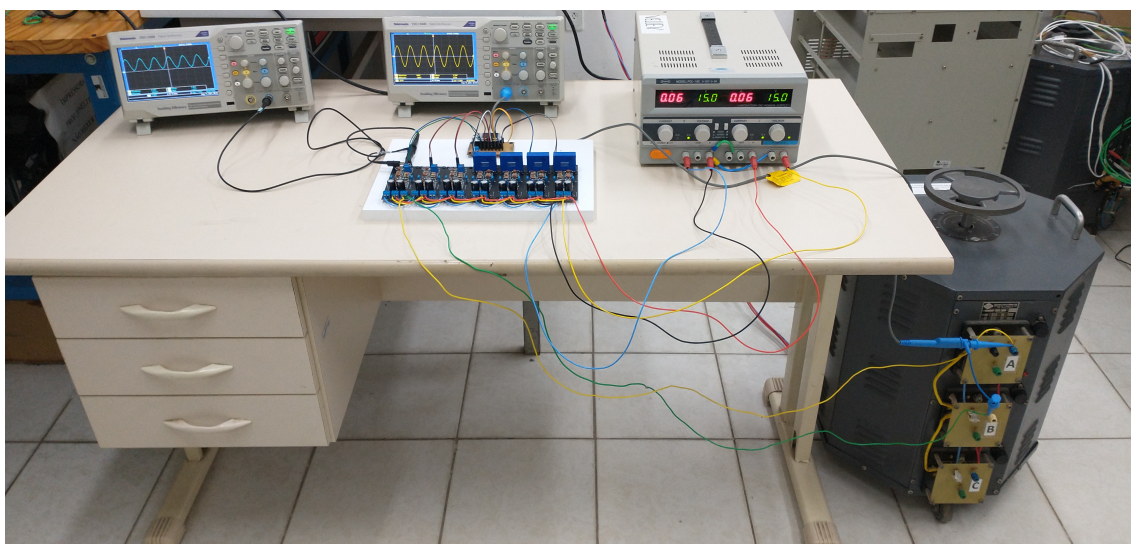
3.4 RESULTADOS

Com as placas montadas é possível então fazer os ensaios.

Dessa forma, nos ensaios, como pode ser visto na Figura 3.27, foi utilizado a fonte Politem MODEL:POL-16E para alimentar as placas, com tensões de -15 V, 0 V, 5,05 V e 15 V. Com a placa alimentada, mas ainda sem sinal na entrada, é possível verificar que a saída da placa possui um nível c.c., como projetado, e que através do potenciômetro pode-se ajustar para ficar em 1,22 V.

Foi, então, utilizado o varivolt trifásico Aute T-3820, pois o protótipo foi projetado para poder medir uma tensão de até 20% superior à tensão nominal da rede de 220 V, que é aproximadamente 270 V, e com tal equipamento, pode-se utilizar tensão de linha, e assim chegar a esse valor.

Figura 3.27 – *Setup* da realização dos ensaios do módulo de medição de tensão



Fonte: Autor.

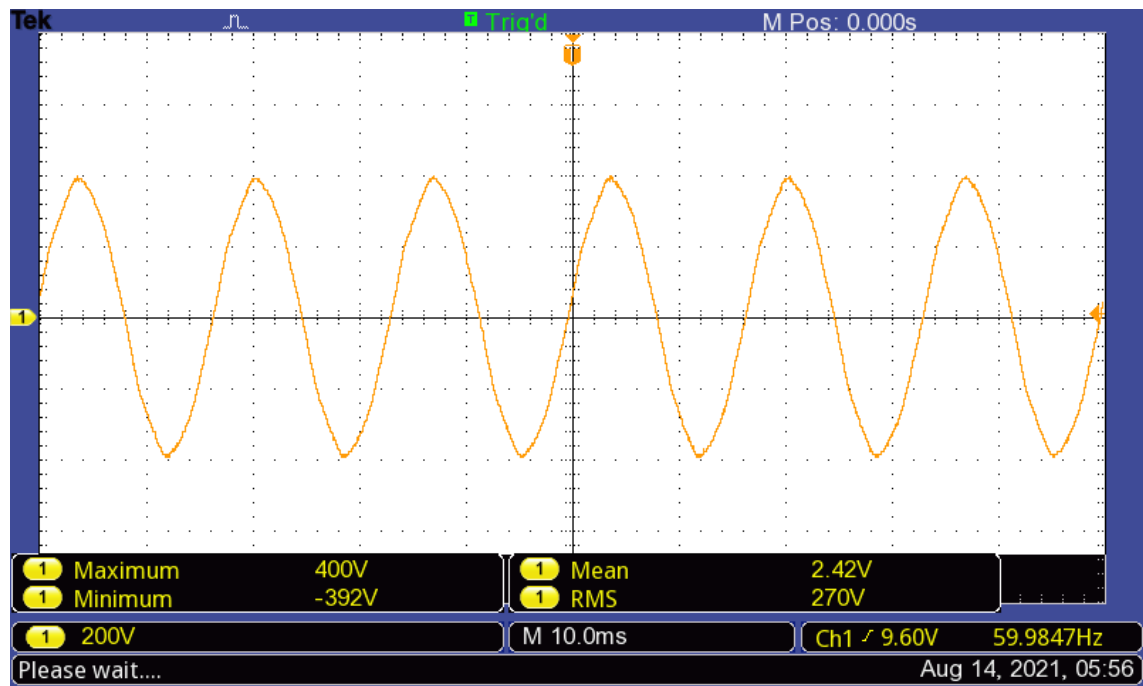
Feito isso, foi utilizado o osciloscópio TBS 1102B para analisar os sinais. Então, a forma de onda da entrada do sensor, como pode ser visto na Figura 3.28, é uma tensão de 270 V eficaz.

No divisor de tensão, mostrado na Figura 3.29, pode-se observar um sinal de 12 V de pico, que é o sinal V_{in1t} .

Pode-se observar um ganho unitário no sinal, que passa pelo amplificador inversor, e o sinal após ele passar pelo filtro, como está mostrado nas Figuras 3.30 e 3.31.

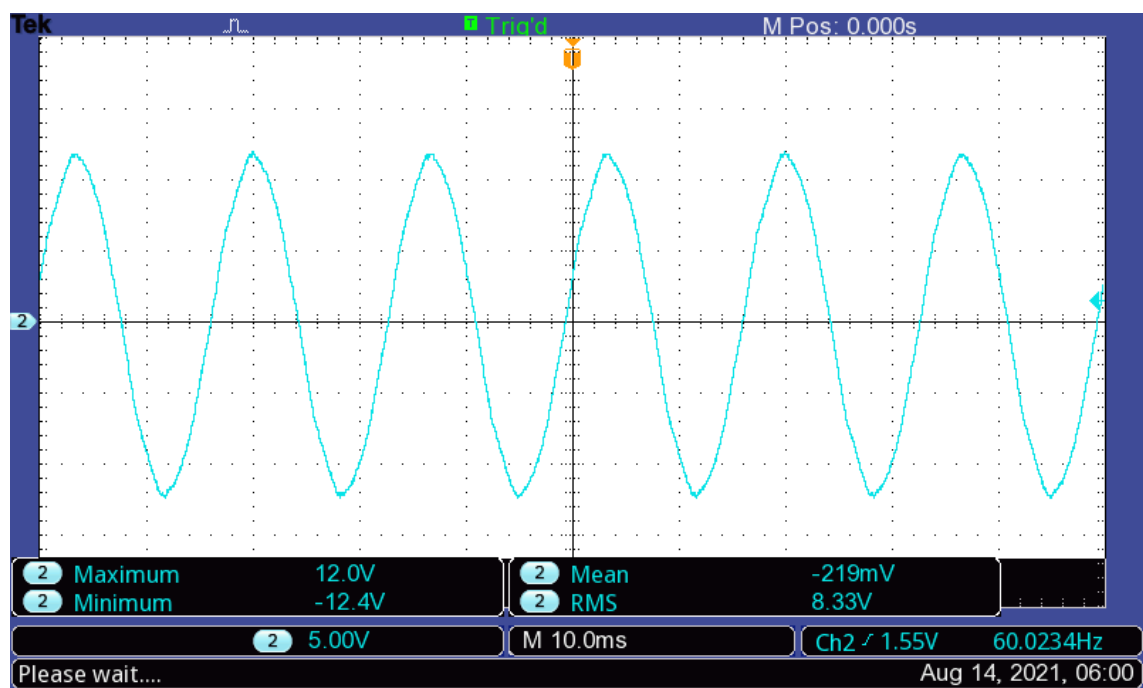
Por fim, é adicionado um nível c.c. ao sinal, e dado um ganho para que fique com a amplitude desejada para poder ser lido pelo microcontrolador. Logo, o sinal já calibrado, que se apresenta na saída do circuito, pode ser visto na Figura 3.32.

Figura 3.28 – Sinal de entrada do sensor gerado pela tensão de linha do varivolt Aute T-3820



Fonte: Autor.

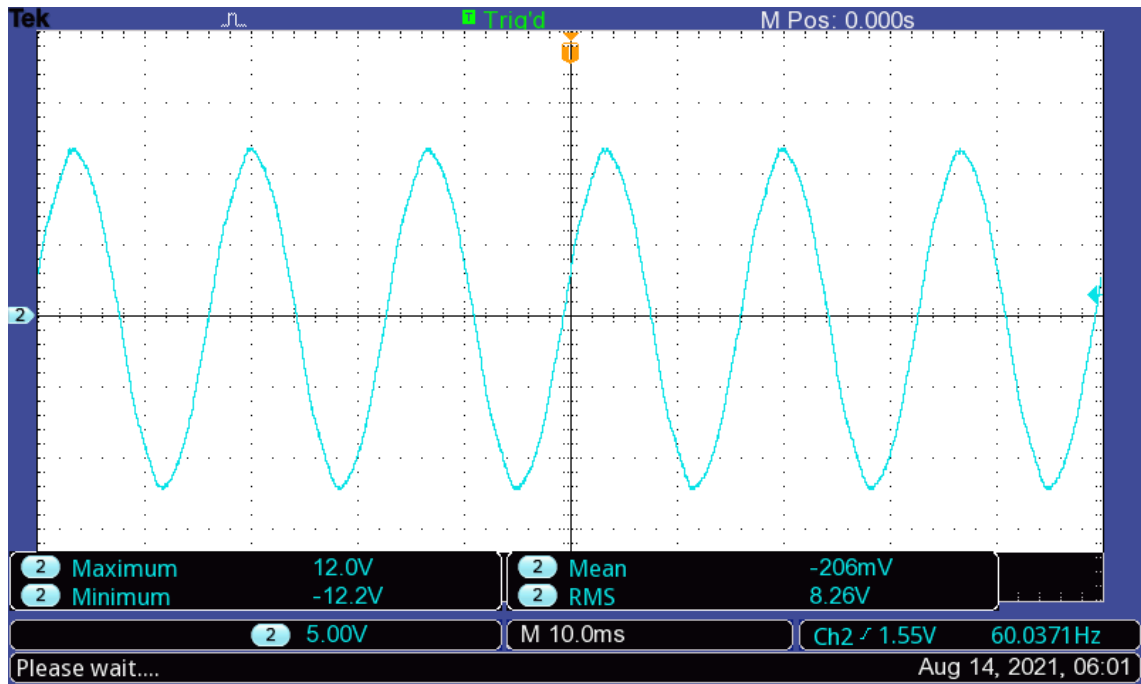
Figura 3.29 – Sinal Vin1t na saída do divisor de tensão na primeira etapa do circuito



Fonte: Autor.

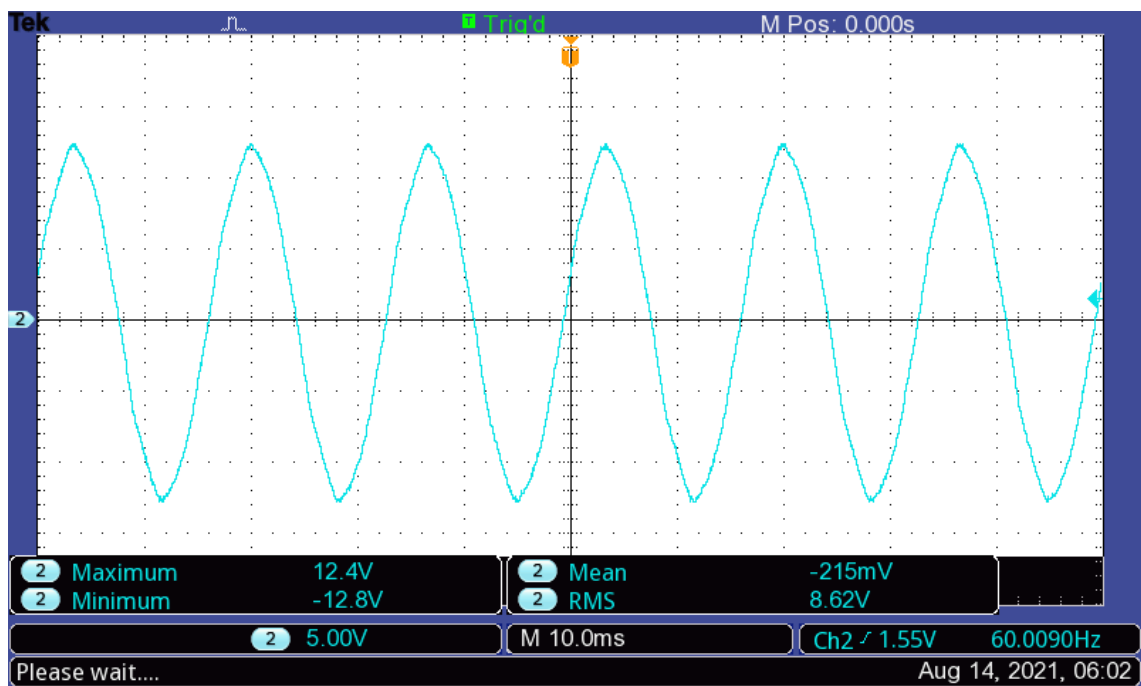
No caso do circuito para medição da corrente, como pode ser visto na Figura 3.33, este foi alimentado igualmente pela fonte Politerm MODEL:POL-16E, e também foi possível observar e ajustar o nível c.c. do sinal. Para fazer o ensaio com o sensor, e utilizar o fundo de escala, que é 50 A eficaz, foi utilizado o mesmo varivolt e um banco de resistores como carga, e então

Figura 3.30 – Sinal de saída da primeira etapa do circuito, Vo1t



Fonte: Autor.

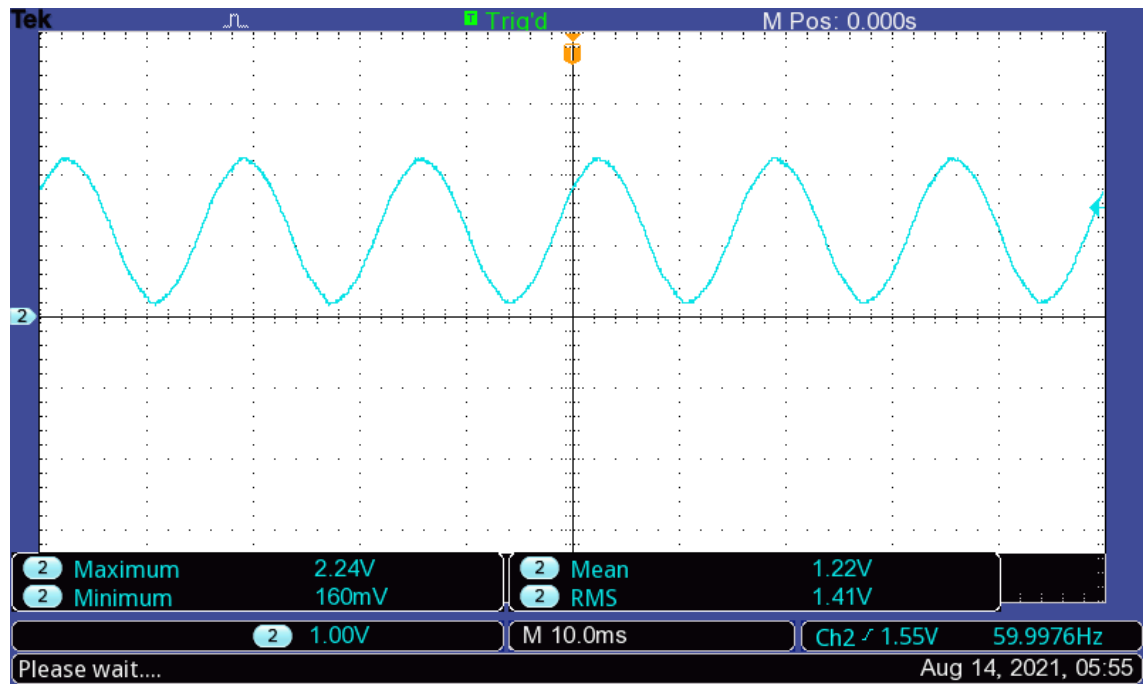
Figura 3.31 – Sinal Vo2, na saída da etapa do filtro



Fonte: Autor.

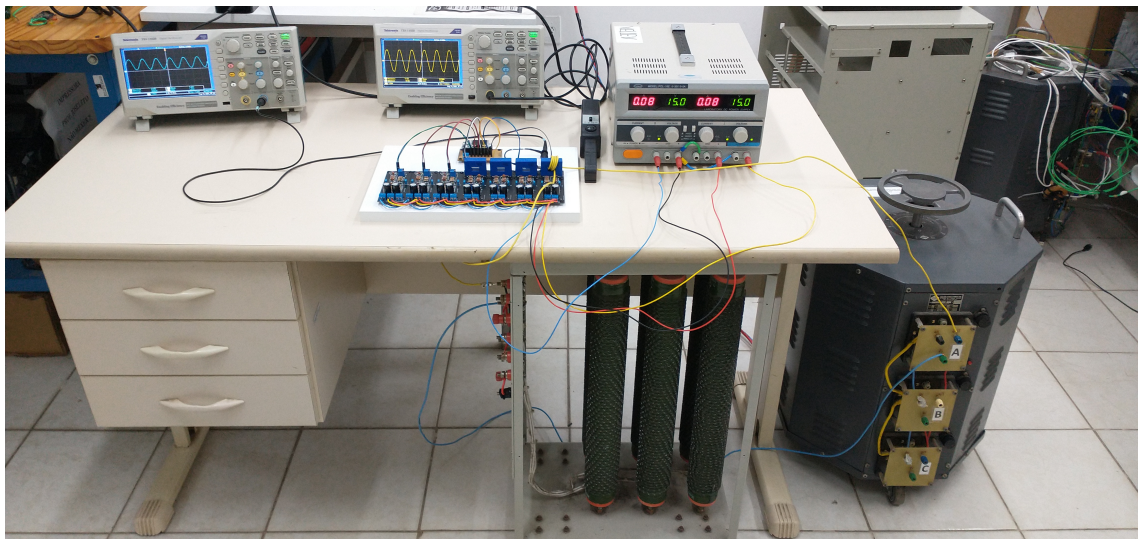
ajustando a tensão de tal modo que uma corrente de 10 A fosse fornecida a carga, como pode ser visto na Figura 3.34. Ao realizar cinco espiras com o fio pelo sensor de corrente, é possível atingir o fundo de escala do sensor.

Figura 3.32 – Sinal que se apresenta na saída do circuito quando é submetido a uma tensão de 270 V na entrada



Fonte: Autor.

Figura 3.33 – *Setup* da realização dos ensaios do módulo de medição de corrente



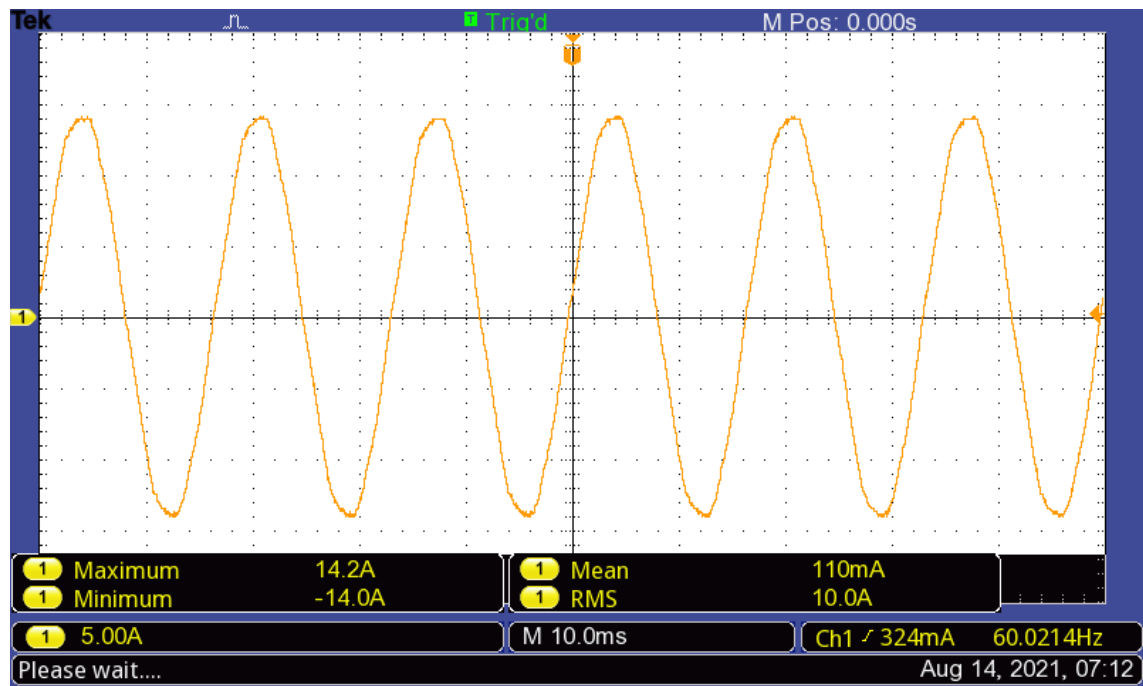
Fonte: Autor.

O sinal que sai do sensor é um sinal de corrente, e como é utilizado um resistor de $100\ \Omega$, temos um sinal de 7 V de pico aproximadamente em V_{in1c} , como é mostrado na Figura 3.35.

Em seguida, é dado um ganho ao sinal, utilizando um amplificador inversor, como é mostrado na Figura 3.36. O sinal passa pelo filtro, e o sinal de saída é visto na Figura 3.37.

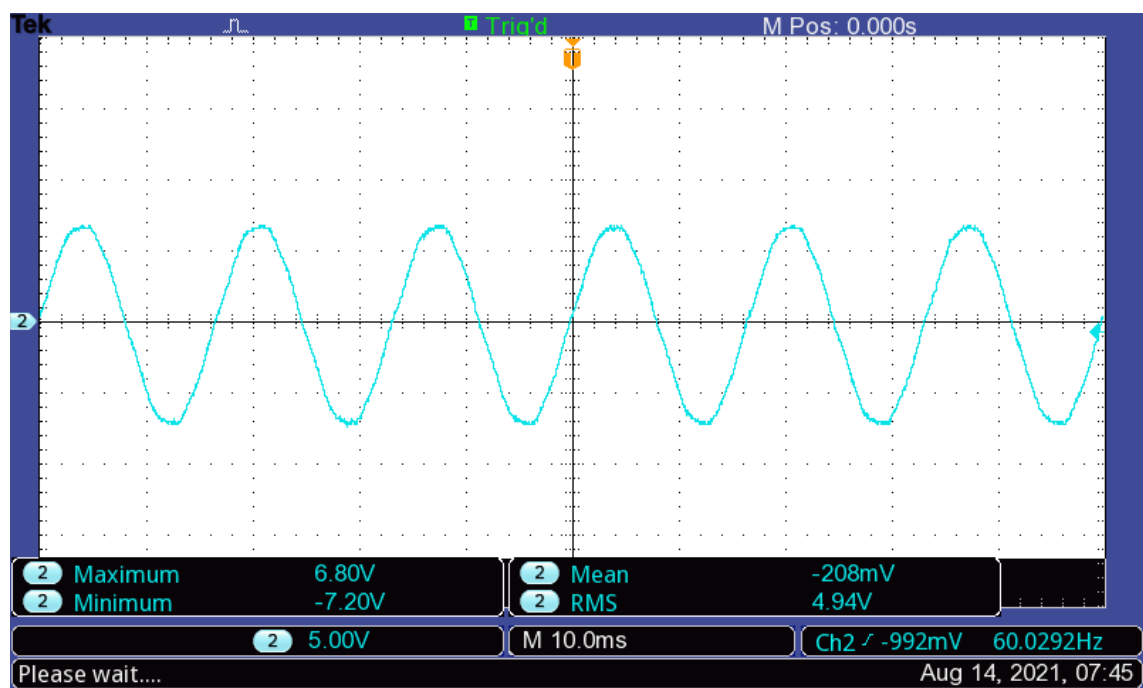
Então, o sinal de saída do circuito, com um nível c.c. e com a amplitude desejada, já ajustado e calibrado, pode ser visto na Figura 3.38.

Figura 3.34 – Corrente a ser medida pelo sensor



Fonte: Autor.

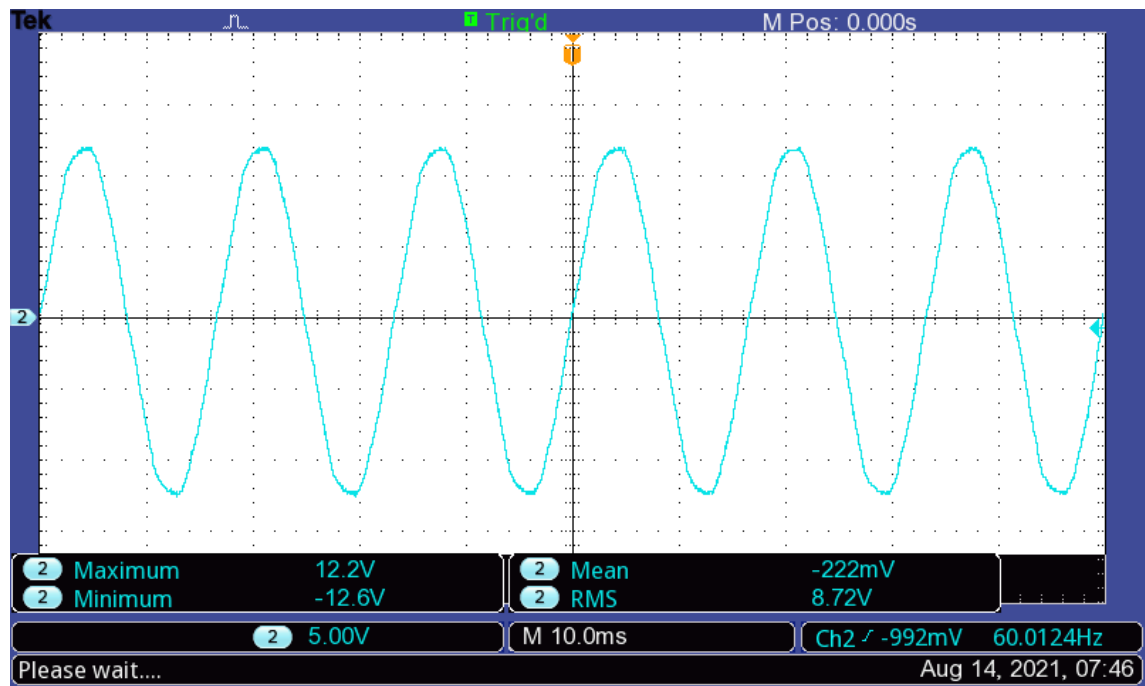
Figura 3.35 – Sinal de tensão Vin1c, no primeiro estágio do circuito



Fonte: Autor.

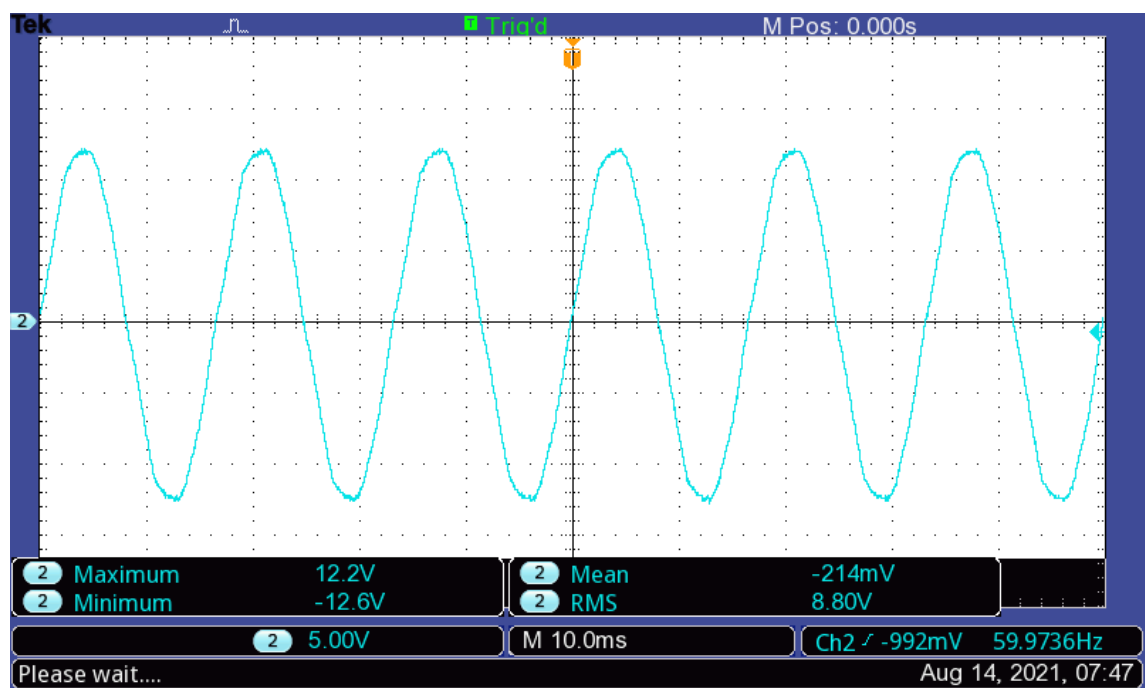
Tendo averiguado a funcionalidade dos circuitos, os terminais da saída do circuito são conectados às entradas analógicas do microcontrolador, para que seja efetuada a aquisição do sinal, os cálculos e o envio dos dados por meio da conexão WiFi.

Figura 3.36 – Sinal Vo1c, logo após passar pelo amplificador inversor



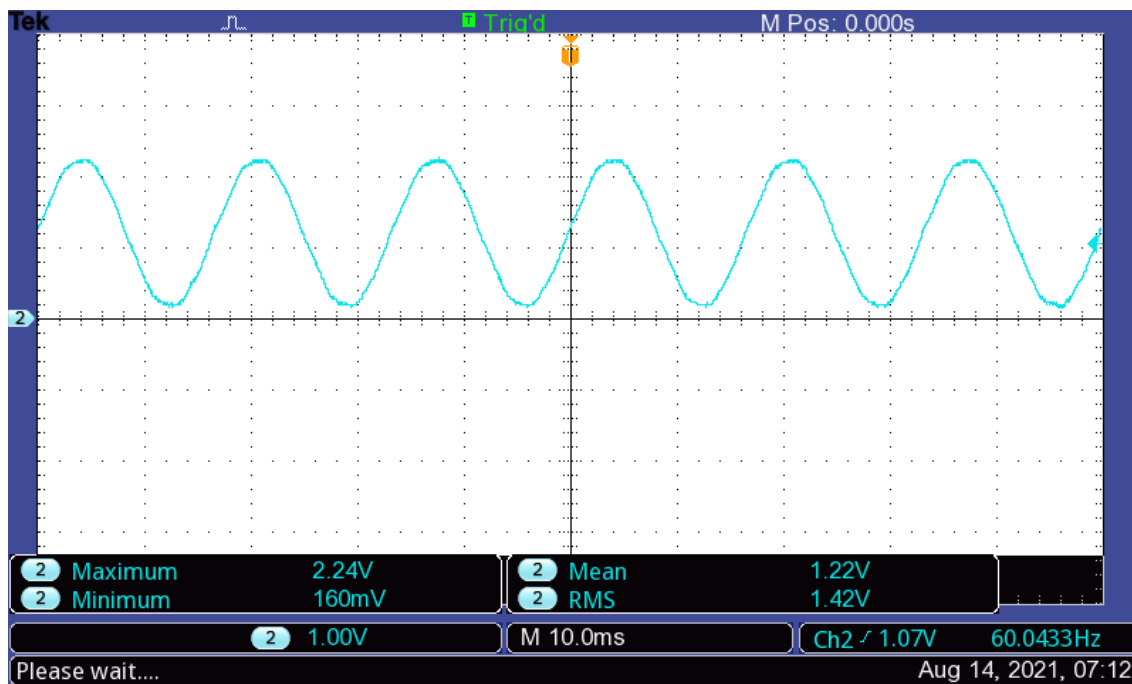
Fonte: Autor.

Figura 3.37 – Sinal Vo2, apresentado na saída do filtro



Fonte: Autor.

Figura 3.38 – Sinal que se apresenta na saída do circuito quando apresenta 50 A a ser medido pelo sensor



Fonte: Autor.

3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS E COMUNICAÇÃO IOT

O microcontrolador é muito importante para o projeto, pois é ele que recebe os sinais, realiza os cálculos e faz a transmissão dos dados para um dispositivo WiFi com conexão a internet.

Como o objetivo é fazer a medição de cargas trifásicas, deve-se considerar que são medidas as correntes e tensões de três fases e a corrente do neutro, totalizando assim sete variáveis medidas e, portanto, o microcontrolador deve ter no mínimo sete entradas analógicas.

Para que o sinal medido, que é de 60 Hz, fique com uma boa resolução, precisa ser medido, no mínimo, duzentos pontos por ciclo, mas, considerando que se deseja medir as 51 primeiras harmônicas, que seja possível medir até uma frequência de 3060 Hz, com 200 pontos por ciclo, o que exigiria um microcontrolador, cuja taxa de amostragem do conversor analógico-digital, fosse de 612 mil amostras por segundo, porém, um microcontrolador com tal taxa de amostragem custa um valor alto, o que não é conveniente a este projeto. Por isso, limitou-se a escolher um microcontrolador mais simples. O microcontrolador utilizado tem uma capacidade de digitalizar um sinal a uma taxa de aproximadamente 16000 amostras por segundo.

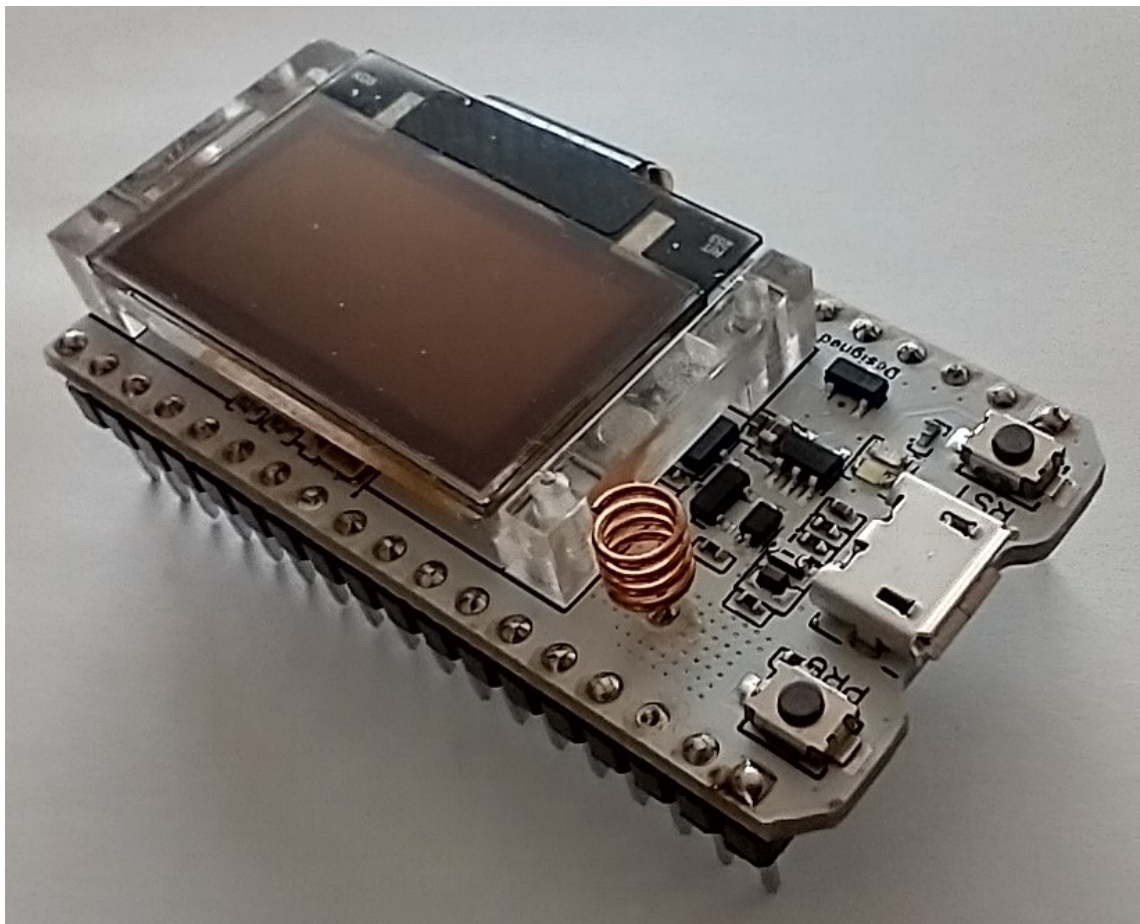
O microcontrolador usado para o projeto foi o ESP32, que pode ser programado utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino, que possui uma linguagem de

programação baseada em C++. Este microcontrolador possui Bluetooth e WiFi integrado, sendo que o WiFi é utilizado neste projeto, o que o torna bastante conveniente.

A versão utilizada neste projeto foi o ESP32 WiFi LoRa 32 SX127X da Heltec, que pode ser vista na Figura 3.39. O ESP32 tem 18 canais ADC, separados em dois microcontroladores: o ADC1 com oito canais e o ADC2 com dez canais. Porém o ADC2 não pode ser usado junto ao WiFi, pois o ADC2 e o driver do módulo de comunicação sem fio compartilham o mesmo canal.

Como o uso do WiFi é essencial neste projeto, nos resta apenas o ADC1, que possui oito canais, sendo que são necessários sete canais ADC. Assim, o módulo de desenvolvimento escolhido é o único que disponibiliza mais de seis canais do ADC1 para ser utilizado.

Figura 3.39 – Heltec ESP32 WiFi LoRa 32 SX127X



Fonte: Autor.

Para fazer a aquisição do sinal, deve-se notar que o ADC deste microcontrolador não é linear em toda a excursão. Segundo o datasheet, a faixa de linearidade ocorre entre 150 mV e 2,45 V. Foi, então, adicionado uma componente contínua de 1,22 V ao sinal na saída do circuito de condicionamento, para que possa trabalhar com valores positivos apenas, e dessa forma, a

saída do circuito passa a estar na faixa de 150 mV até 2,29 V, quando estiver medindo o máximo para que foi projetado, evitando a distorção do sinal.

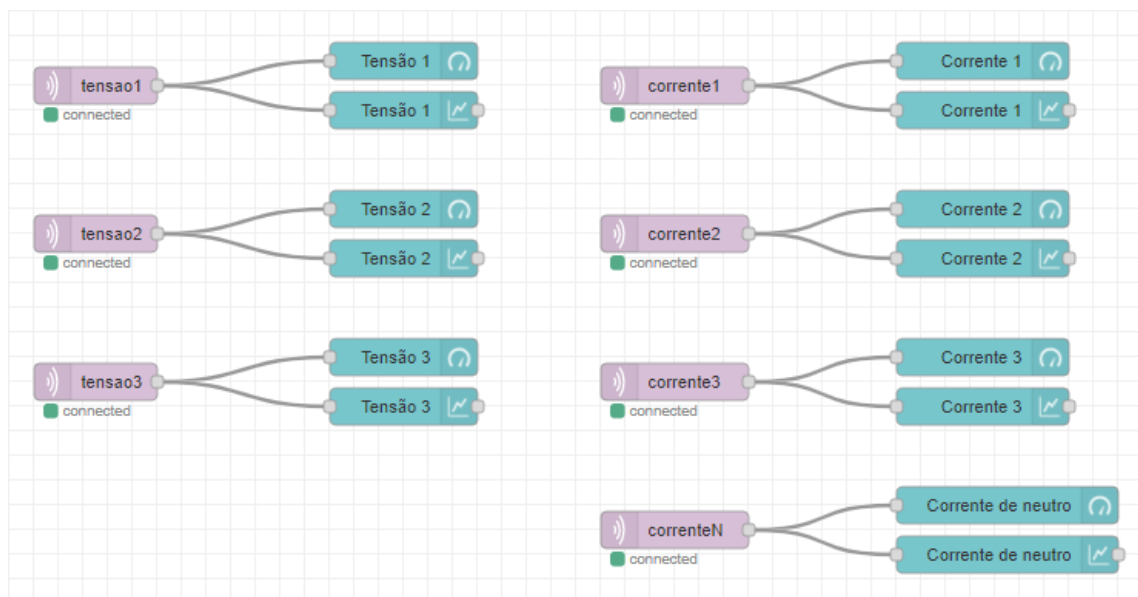
Com isso, este microcontrolador faz os cálculos de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa e potência aparente, e transmite esses dados utilizando WiFi para um dispositivo central conectado à internet utilizando um chip GSM. Isso aumenta a possibilidade de fazer uma conexão com diversos dispositivos. O código utilizado para fazer os cálculos, conectar o dispositivo via WiFi e transmitir os dados, pode ser visto no Anexo A.

O ESP32 envia os dados calculados para a internet através de um dispositivo WiFi, utilizando o protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Este é um protocolo de comunicação entre máquinas, baseado no método de publicação e assinatura de dados (publish/-subscriber), permitindo o envio e leitura de mensagens entre dispositivos. Assim, o ESP32 faz a publicação dos dados em um servidor MQTT, e o Node-RED recebe esses dados.

Node-RED é uma ferramenta visual de ambiente de código aberto, onde a programação baseada em fluxo é uma maneira de descrever o comportamento de um aplicativo, como uma rede de "*nodes*" ou "nós", chamados no Node-RED. Cada nó tem uma finalidade bem definida: o recebimento de dados, efetua determinadas tarefas com os dados e então os passa adiante. Nesse caso, a rede é responsável pelo fluxo de dados entre os nós. Mais sobre esta ferramenta pode ser encontrado em <https://nodered.org/>.

Essa ferramenta pode receber os dados do servidor MQTT que foram enviados anteriormente pelo ESP32. O código feito através de *nodes*, responsável por receber os dados, podem ser vistos nas Figuras 3.40 e 3.41.

Figura 3.40 – Nodes utilizados para receber os dados de tensão e corrente



Fonte: Autor.

Figura 3.41 – Nodes utilizados para receber os dados das potências



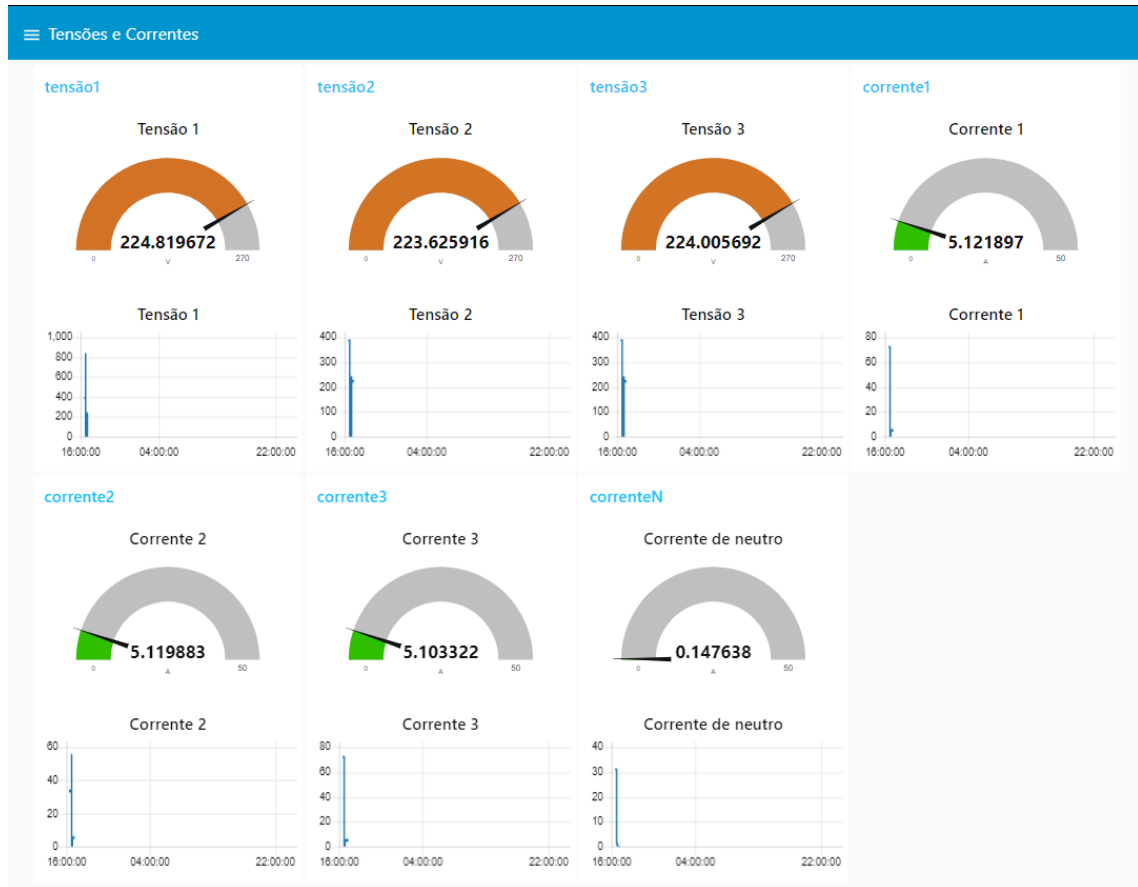
Fonte: Autor.

Por fim, foi elaborado um painel virtual para fazer a apresentação desses dados em forma de medidores e gráficos, como podem ser vistos nas Figuras 3.42 e 3.43.

3.6 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação é o circuito que fornece a energia para alimentar o sensor, o circuito de tratamento de sinal e o microcontrolador. Esta fonte deve converter o sinal c.a. de 220 V 60 Hz da rede para um sinal c.c. de 5 V para alimentar o microcontrolador, e precisa fornecer também um sinal c.c. simétrico de 12 V a 15 V para alimentação dos circuitos de tratamento de sinal e dos sensores. Opta-se por fazer um conversor sem a utilização de um transformador, a fim de reduzir o custo, o volume e o peso do conversor. Sendo assim, foi proposto um conversor

Figura 3.42 – Página para visualizar as tensões e correntes



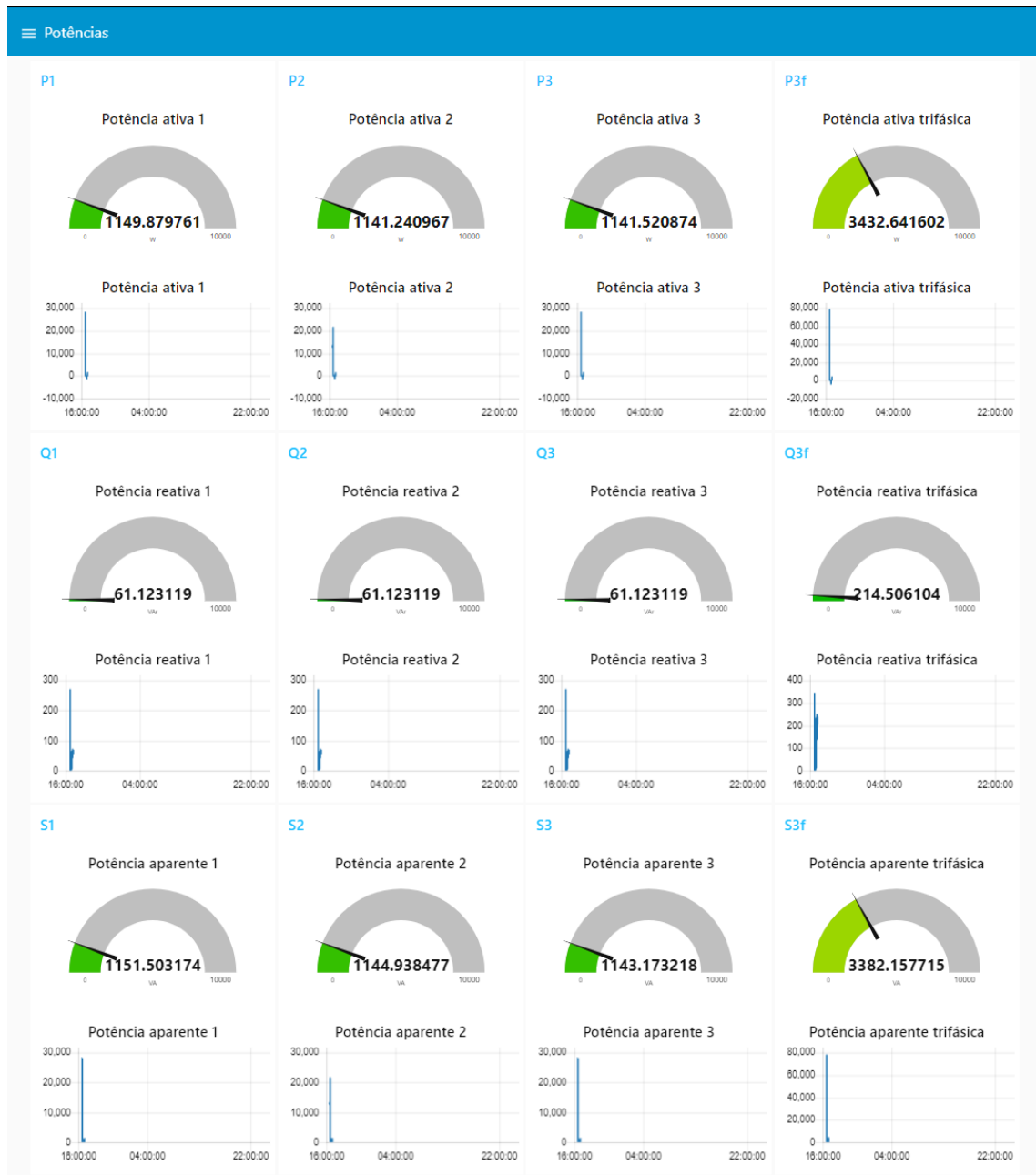
Fonte: Autor.

com capacitores na entrada ao lado da rede para se ter uma impedância de entrada. Considerando um consumo de energia máximo do sensor de 60 mA alimentado simetricamente com 15 V, sendo que quatro deles são usados no projeto, um consumo de energia do microcontrolador de 80 mA alimentado com 5 V, e o CI do circuito de tratamento de sinal, tem consumo máximo de 11,2 mA alimentado simetricamente com 15 V, sendo que são necessários sete destes. Então, o circuito consome no máximo 318,4 mA da alimentação de 15 V e 80 mA da alimentação de 5 V, consumindo uma potência total de 5176 mW. Foi elaborado uma fonte simétrica que pode fornecer até 5200 mW, com uma alimentação simétrica de 15 V e uma saída de 5 V, conforme mostrado na Figura 3.44.

Observando a simulação, definiu-se que é necessário uma tensão de pico de 74,63 V antes da ponte, e que tenha uma fase de 54° e, como a tensão de entrada é de 220 V, precisa-se de uma queda de tensão de 193,74 de $\angle -12,73^\circ$ V nos capacitores, e também foi observado que é necessária uma corrente de 0,5 A nos capacitores. Assim, é possível calcular a reatância capacitiva que é necessária, como pode-se observar nas equações 3.10 e 3.11.

$$-v_{Rede} + 2 \cdot X_C \cdot i_C + \frac{v_{Ponte}}{\sqrt{2}} = 0 \quad (3.9)$$

Figura 3.43 – Página para visualizar as potências ativas, reativas e aparentes



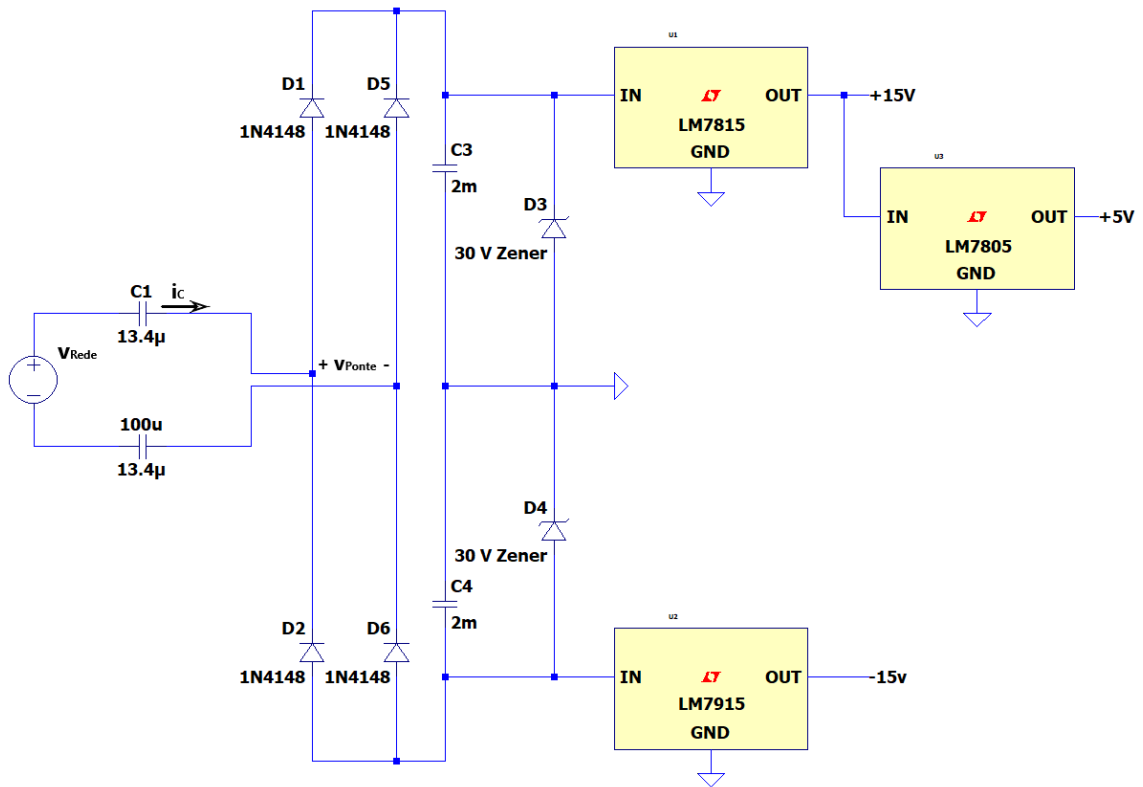
Fonte: Autor.

$$-220 + 2 \cdot X_C \cdot 0,5 + \frac{74,6 \angle 54^\circ}{\sqrt{2}} = 0 \quad (3.10)$$

$$X_C = 193,8 \angle -12,7^\circ \quad (3.11)$$

Com isso, é possível calcular os capacitores que são necessários na entrada do circuito, como pode-se observar nas equações 3.12 a 3.14.

Figura 3.44 – Fonte de alimentação bipolar de 15 V e unipolar de 5 V



Fonte: Autor.

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 193,8} \quad (3.13)$$

$$C = 13,4\mu F \quad (3.14)$$

Importante destacar que foram realizadas simulações para analisar o circuito em diversas condições, e foi observado que este circuito funciona muito bem para potências mais baixas que o necessário para este projeto, pois a vazão apresenta uma dissipação de 11,73 W de potência nos diodos zeners, o que é um valor muito alto para a aplicação. Assim, como solução pode ser projetada uma fonte para cada módulo ou ser feita a escolha de sensores que consumam menos energia, o que eliminaria o problema de consumo de energia, viabilizando assim a aplicação deste circuito. Também pode ser visualizado um outro tipo de fonte, como um flyback.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho, foi possível estudar conceitos sobre microrredes, sensores e suas características, optando-se pelo sensor LA 55-P. Dessa forma, foi possível projetar e construir um circuito para o condicionamento do sinal do sensor, e um para aquisição e condicionamento do sinal de tensão.

Observou-se que o emprego de resistências muito elevadas na realimentação e na entrada dos amplificadores operacionais, resulta em um funcionamento incorreto desses amplificadores, caso a corrente do circuito seja próxima à corrente de polarização. Ajustou-se ainda os valores dos resistores empregados no divisor de tensão composto pelos resistores R_0 e R_1 , para que a corrente circulante neste divisor seja bem mais elevada que a corrente do amplificador inversor presente no estágio seguinte. Dessa forma, o amplificador inversor não se torna uma carga para o divisor de tensão, possibilitando o funcionamento linear e adequado do divisor de tensão.

Não foi possível fazer a fonte de alimentação desejada, pois a topologia escolhida funciona com uma potência mais baixa do que a que o circuito consome neste projeto, que foi maior que o esperado.

Observou-se características sobre os microcontroladores analisados, conforme consta na Tabela 2.1, elucidando como usá-los para transmitir dados via WiFi, podendo ser analisadas as informações remotamente, utilizando o conceito de internet das coisas. No laboratório, foi realizado um ensaio utilizando um varivolt, com o qual foi possível digitalizar informações no microcontrolador ESP32 e transmiti-las via WiFi.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Percebendo que o consumo de energia do sensor é importante, podem ser escolhidos sensores que consomem menos energia, sendo uma sugestão para futuros trabalhos a utilização de sensores da série HMSR da LEM.

Propõem-se a análise dos circuitos e dos layouts, a fim de torná-los mais compactos, escolhendo também um amplificador operacional com alimentação de 5 V, assim necessitando somente de alimentação de mesma tensão.

Com base nos resultados obtidos, sugere-se a utilização, se viável, de um microcontrolador mais rápido, que possa coletar mais amostras por segundo.

Este projeto também pode ser aprimorado, podendo incluir cálculo de fator de potência e ser implementado para diversas cargas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUABUD, J. P. M.; BARRA, P. H. A. **Estudo sistemático sobre microrredes e redes elétricas inteligentes**. Curitiba, Brasil: Brazilian Journal of Development, 2020.

ATMEL. **ATmega328P**. [S.l.]: Atmel Corporation, 2015. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>. Rev. 7810D.

Barman, B. K.; Yadav, S. N.; Kumar, S.; Gope, S. Iot based smart energy meter for efficient energy utilization in smart grid. In: **2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.

Chaudhari, S.; Rathod, P.; Shaikh, A.; Vora, D.; Ahir, J. Smart energy meter using arduino and gsm. In: **2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 598–601.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2009.

Clenitiaa, F. R.; Ilakya, E.; Preetha, G. S.; Meenakshi, B. Enhanced digital energy meter. In: **2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 588–591.

Das, H.; Saikia, L. C. Gsm enabled smart energy meter and automation of home appliances. In: **2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.

ESPRESSIF. **ESP32 Series**. [S.l.]: Espressif Systems, 2020. <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Version 3.4.

FALCAO, D. M. Integração de tecnologias para viabilização da smart grid. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2010. p. 1–5, 2010.

Kabalci, Y.; Kabalci, E. The low cost voltage and current measurement device design for power converters. In: **2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

MACEDO, L. R. de. **Análise comparativa entre microrredes em corrente contínua e em corrente alternada**. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Santa Eulália, Portugal, 2020.

MUSSOI, F. L. R. **Resposta em Frequência: FILTROS PASSIVOS**. 2. ed. Florianópolis, Brasil: Gerência Educacional de Eletrônica, 2004.

NEVES, M. da S. **DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE UMA MÁQUINA CC VIRTUAL APLICADA AMICRORREDES EM CORRENTE CONTÍNUA**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

Nicolae, P.; Stănescu, D.; Nicolae, M.; Bojoi, I. Considerations on signals conditioning circuits. In: **11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.

OLIVEIRA, J. **Arduino, ESP32 e ESP8266 – Comparação**. 2019. Disponível em: <<https://xprojetos.net/arduino-esp32-e-esp8266-comparacao/>>.

Rawat, N.; Rana, S.; Yadav, B.; Yadav, N. A review paper on automatic energy meter reading system. In: **2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3254–3257.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Makron Books, 2007.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 9. ed. Bela Vista, Brasil: Saraiva Educação, 2020.

VAZ, P. G. P. G. **Análise dos sistemas G2V e V2G no Contexto da Integração de Geração Renovável**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2019.

ANEXO A – Código fonte ESP32

```
1 #include<WiFi.h>
2 #include <PubSubClient.h> // https://github.com/knolleary/
   pubsubclient
3 #include "Esp32MQTTClient.h" // https://github.com/esp32/libraries
4 #include "SSD1306.h" //responsavel pela comunicacao com o
   display
5
6 /*Variaveis utilizadas para fazer a conexao do ESP32 com a
   internet e para mandar os dados para o servidor*/
7
8 // Credenciais para conectar o ESP32 ao roteador
9 const char* ssid = "SSID";
10 const char* password = "SENHA";
11
12 // Endereco do servidor MQTT broker
13 const char* mqtt_server = "broker.emqx.io";
14
15 // Inicializa o espClient.
16 WiFiClient espClient;
17 PubSubClient client(espClient);
18
19 // Variaveis auxiliares
20 long now = millis();
21 long lastMeasure = 0;
22
23 //Configurando pinos analogicos
24 const byte qtdePinosAnalogicos = 8;
25 byte pinosAnalogicos[qtdePinosAnalogicos] =
   {32,33,34,35,36,37,38,39};
26 float analogPin = 0;
27
28 /*Variaveis utilizadas para mandar os dados para o MQTT broker
29 #define MSG_BUFFER_SIZE (50)
30 char msg[MSG_BUFFER_SIZE];
31
32 /*****
33
34 /*Configuracao do display*/
35
36 //parametros: address,SDA,SCL
37 SSD1306 display(0x3c, 4, 15); //construtor do objeto que
   controlaremos o display
38
39 /*****
40
41 /*Declara as variaveis utilizadas no calculo das tensoes
   correntes e potencias*/
42
```

```

43 float tensao_1[450]; float tensao_2[450]; float tensao_3[450];
44 float corrente_1[450]; float corrente_2[450]; float corrente_3
    [450]; float corrente_N[450];
45
46 float tensao_real_1[450]; float tensao_real_2[450]; float
    tensao_real_3[450];
47 float corrente_real_1[450]; float corrente_real_2[450]; float
    corrente_real_3[450]; float corrente_real_N[450];
48
49 float tensao_1_RMS; float tensao_2_RMS; float tensao_3_RMS;
50 float corrente_1_RMS; float corrente_2_RMS; float corrente_3_RMS;
    float corrente_N_RMS;
51
52 float potencia_ativa_1; float potencia_ativa_2; float
    potencia_ativa_3; float potencia_ativa_trifasica;
53 float potencia_aparente_1; float potencia_aparente_2; float
    potencia_aparente_3; float potencia_aparente_trifasica;
54 float potencia_reativa_1; float potencia_reativa_2; float
    potencia_reativa_3; float potencia_reativa_trifasica;
55
56 float V1[450]; float V2[450]; float V3[450];
57 float I1[450]; float I2[450]; float I3[450]; float IN[450];
58 float P1[450]; float P2[450]; float P3[450];
59
60 /*****
61
62 // Essa funcao conecta o ESP8266 ao roteador
63 void setup_wifi() {
64     delay(10);
65     // Comeamos conectando a rede WiFi
66     Serial.println();
67     Serial.print("Connecting to ");
68     Serial.println(ssid);
69
70     display.clear();
71     display.drawString(0, 0, "Connecting to");
72     display.drawString(0, 10, ssid);
73     display.display(); //mostra o conteudo na tela
74
75     WiFi.begin(ssid, password);
76     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
77         delay(500);
78         Serial.print(".");
79     }
80     Serial.println("");
81     Serial.print("WiFi connected - ESP IP address: ");
82     Serial.println(WiFi.localIP());
83
84     display.drawString(0, 20, "WiFi connected");
85     display.display(); //mostra o conteudo na tela
86 }

```

```

87
88 // Essa fun o reconecta o ESP32 ao MQTT broker
89 void reconnect() {
90     // Loop at estar conectado
91     while (!client.connected()) {
92         Serial.print("Attempting MQTT connection...");
93         display.drawString(0, 30, "Attempting MQTT connection...");
94         display.display(); //mostra o conte do na tela
95         // Attempt to connect
96         if (client.connect("espClient")) {
97             Serial.println("connected");
98             display.drawString(0, 40, "connected");
99             display.display(); //mostra o conte do na tela
100         } else {
101             Serial.print("failed, rc=");
102             Serial.print(client.state());
103             Serial.println(" try again in 5 seconds");
104             // Espera de 5 segundos antes de tentar novamente
105             delay(5000);
106         }
107     }
108 }
109
110 // Come a a comunica o serial com o baud rate de 115200
111 void setup() {
112
113     pinMode(16, OUTPUT); //RST do oled
114     digitalWrite(16, LOW); // reseta o OLED
115     delay(50);
116     digitalWrite(16, HIGH); // enquanto o OLED estiver ligado, GPIO16
117         // deve estar HIGH
118
119     display.init(); //inicializa o display
120     display.flipScreenVertically();
121     display.setFont(ArialMT_Plain_10); //configura a fonte para um
122         // tamanho maior
123     display.clear(); //apaga todo o conte do da tela do display
124
125     Serial.begin(115200);
126     setup_wifi();
127     client.setServer(mqtt_server, 1883); //Seta o MQTT broker
128
129 }
130
131 // Fun o que realiza os calculos e manda os dados ao MQTT broker
132 void loop() {
133
134     if (!client.connected()) {
135         reconnect();
136     }
137     if(!client.loop())

```

```

136     client.connect("espClient");
137
138     float soma_tensao_1 = 0; float soma_tensao_2 = 0; float
        soma_tensao_3 = 0;
139     float soma_corrente_1 = 0; float soma_corrente_2 = 0; float
        soma_corrente_3 = 0; float soma_corrente_N = 0;
140     float soma_potencia_1 = 0; float soma_potencia_2 = 0; float
        soma_potencia_3 = 0;
141
142     int samples = 450;
143
144     int i;
145
146     for(i = 0; i < samples; i++)
147     {
148         V1[i] = analogRead(36);
149         V2[i] = analogRead(37);
150         V3[i] = analogRead(38);
151         I1[i] = analogRead(39);
152         I2[i] = analogRead(34);
153         I3[i] = analogRead(35);
154         IN[i] = analogRead(32);
155
156         delayMicroseconds(63);
157     }
158
159     for(i = 0; i < samples; i++)
160     {
161         tensao_1[i] = ((V1[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 356.8576;
162         tensao_2[i] = ((V2[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 356.8576;
163         tensao_3[i] = ((V3[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 356.8576;
164
165         tensao_real_1[i] = tensao_1[i];
166         tensao_real_2[i] = tensao_2[i];
167         tensao_real_3[i] = tensao_3[i];
168
169         tensao_real_1[i] = tensao_real_1[i] * tensao_real_1[i];
170         tensao_real_2[i] = tensao_real_2[i] * tensao_real_2[i];
171         tensao_real_3[i] = tensao_real_3[i] * tensao_real_3[i];
172
173         soma_tensao_1 = tensao_real_1[i] + soma_tensao_1;
174         soma_tensao_2 = tensao_real_2[i] + soma_tensao_2;
175         soma_tensao_3 = tensao_real_3[i] + soma_tensao_3;
176
177         corrente_1[i] = ((I1[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 66.0847;
178         corrente_2[i] = ((I2[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 66.0847;
179         corrente_3[i] = ((I3[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 66.0847;
180         corrente_N[i] = ((IN[i] * 0.00084 + 0.13) - 1.22) * 66.0847;
181
182         corrente_real_1[i] = corrente_1[i];
183         corrente_real_2[i] = corrente_2[i];

```

```

184     corrente_real_3[i] = corrente_3[i];
185     corrente_real_N[i] = corrente_N[i];
186
187     corrente_real_1[i] = corrente_real_1[i] * corrente_real_1[i];
188     corrente_real_2[i] = corrente_real_2[i] * corrente_real_2[i];
189     corrente_real_3[i] = corrente_real_3[i] * corrente_real_3[i];
190     corrente_real_N[i] = corrente_real_N[i] * corrente_real_N[i];
191
192     soma_corrente_1 = corrente_real_1[i] + soma_corrente_1;
193     soma_corrente_2 = corrente_real_2[i] + soma_corrente_2;
194     soma_corrente_3 = corrente_real_3[i] + soma_corrente_3;
195     soma_corrente_N = corrente_real_N[i] + soma_corrente_N;
196 }
197 tensao_1_RMS = soma_tensao_1 / samples;
198 tensao_2_RMS = soma_tensao_2 / samples;
199 tensao_3_RMS = soma_tensao_3 / samples;
200
201 tensao_1_RMS = sqrt(tensao_1_RMS);
202 tensao_2_RMS = sqrt(tensao_2_RMS);
203 tensao_3_RMS = sqrt(tensao_3_RMS);
204
205 corrente_1_RMS = soma_corrente_1 / samples;
206 corrente_2_RMS = soma_corrente_2 / samples;
207 corrente_3_RMS = soma_corrente_3 / samples;
208 corrente_N_RMS = soma_corrente_N / samples;
209
210 corrente_1_RMS = sqrt(corrente_1_RMS);
211 corrente_2_RMS = sqrt(corrente_2_RMS);
212 corrente_3_RMS = sqrt(corrente_3_RMS);
213 corrente_N_RMS = sqrt(corrente_N_RMS);
214
215 for(i = 0; i < samples; i++)
216 {
217     P1[i] = tensao_1[i] * corrente_1[i];
218     P2[i] = tensao_2[i] * corrente_2[i];
219     P3[i] = tensao_3[i] * corrente_3[i];
220     soma_potencia_1 = P1[i] + soma_potencia_1;
221     soma_potencia_2 = P2[i] + soma_potencia_2;
222     soma_potencia_3 = P3[i] + soma_potencia_3;
223 }
224 potencia_ativa_1 = soma_potencia_1 / samples;
225 potencia_ativa_2 = soma_potencia_2 / samples;
226 potencia_ativa_3 = soma_potencia_3 / samples;
227 potencia_ativa_trifasica = potencia_ativa_1 + potencia_ativa_2 +
    potencia_ativa_3;
228
229 potencia_aparente_1 = tensao_1_RMS * corrente_1_RMS;
230 potencia_aparente_2 = tensao_2_RMS * corrente_2_RMS;
231 potencia_aparente_3 = tensao_3_RMS * corrente_3_RMS;
232 potencia_aparente_trifasica = potencia_aparente_1 +
    potencia_aparente_2 + potencia_aparente_3;

```

```

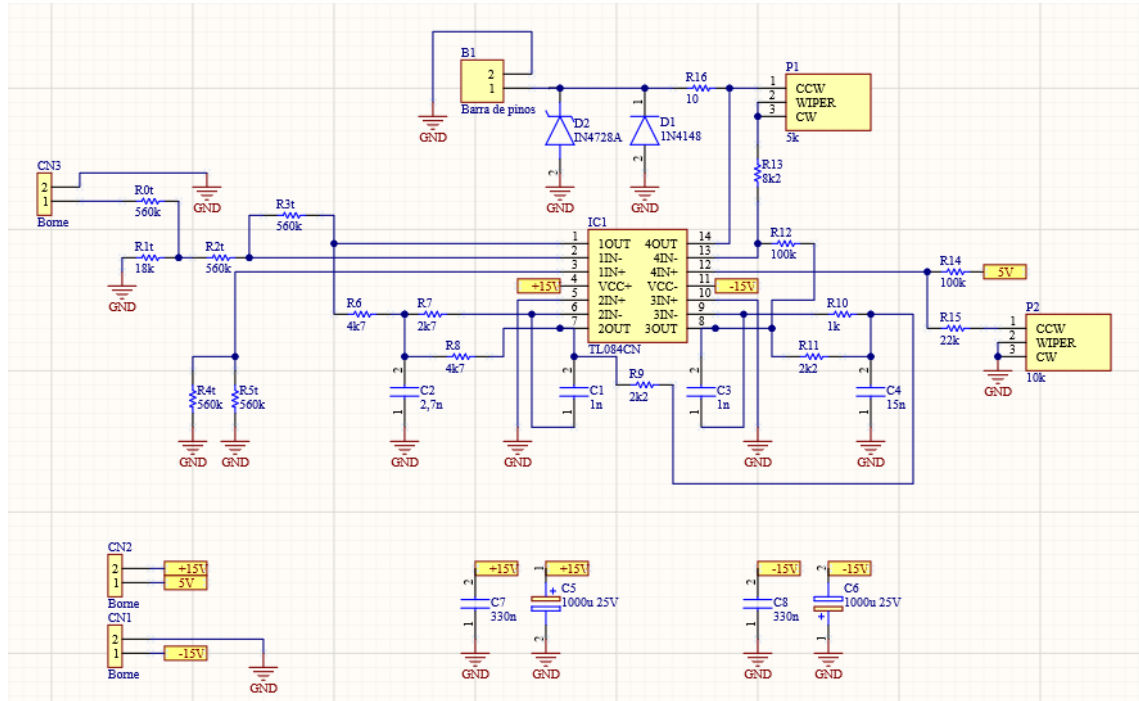
233
234     potencia_reativa_1 = sqrt(potencia_aparente_1*potencia_aparente_1
235                               - potencia_ativa_1*potencia_ativa_1);
236     potencia_reativa_2 = sqrt(potencia_aparente_2*potencia_aparente_2
237                               - potencia_ativa_2*potencia_ativa_2);
238     potencia_reativa_3 = sqrt(potencia_aparente_3*potencia_aparente_3
239                               - potencia_ativa_3*potencia_ativa_3);
240     potencia_reativa_trifasica = potencia_reativa_1 +
241                                   potencia_reativa_2 + potencia_reativa_3;
242
243     now = millis();
244     // Publica os dados a cada um segundo
245     if (now - lastMeasure > 1000) {
246         lastMeasure = now;
247
248         //client.publish("teste", "ol ");
249         //display.drawString(0, 50, "Ol !");
250         //display.display(); //mostra o conte do na tela
251
252         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", tensao_1_RMS);
253         client.publish("tensao1", msg);
254
255         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", tensao_2_RMS);
256         client.publish("tensao2", msg);
257
258         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", tensao_3_RMS);
259         client.publish("tensao3", msg);
260
261         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", corrente_1_RMS);
262         client.publish("corrente1", msg);
263
264         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", corrente_2_RMS);
265         client.publish("corrente2", msg);
266
267         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", corrente_3_RMS);
268         client.publish("corrente3", msg);
269
270         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", corrente_N_RMS);
271         client.publish("correnteN", msg);
272
273         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_ativa_1);
274         client.publish("potenciaAtiva1", msg);
275
276         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_ativa_2);
277         client.publish("potenciaAtiva2", msg);
278
279         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_ativa_3);
280         client.publish("potenciaAtiva3", msg);
281
282         snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_ativa_trifasica)
283         ;

```

```
279     client.publish("potenciaAtiva3f", msg);
280
281     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_reativa_1);
282     client.publish("potenciaReativa1", msg);
283
284     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_reativa_1);
285     client.publish("potenciaReativa2", msg);
286
287     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_reativa_1);
288     client.publish("potenciaReativa3", msg);
289
290     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f",
291             potencia_reativa_trifasica);
292     client.publish("potenciaReativa3f", msg);
293
294     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_aparente_1);
295     client.publish("potenciaAparente1", msg);
296
297     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_aparente_2);
298     client.publish("potenciaAparente2", msg);
299
300     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f", potencia_aparente_3);
301     client.publish("potenciaAparente3", msg);
302
303     snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%f",
304             potencia_aparente_trifasica);
305     client.publish("potenciaAparente3f", msg);
306 }
```

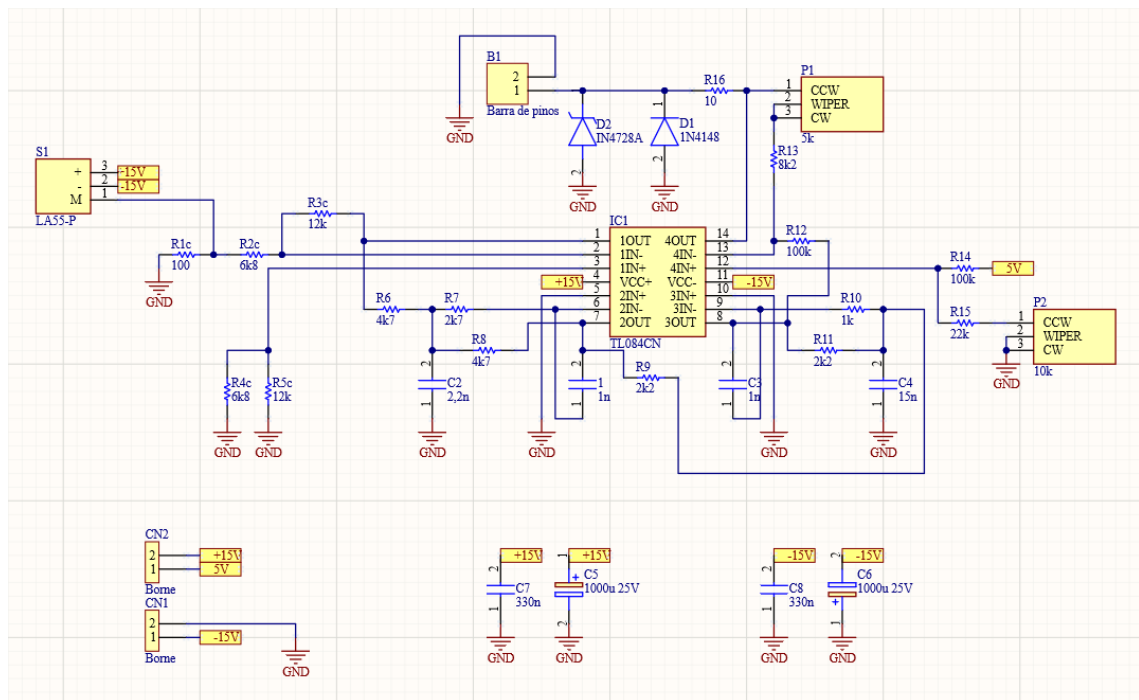
ANEXO B – Projetos dos circuitos de condicionamento

Figura B.1 – Projeto do circuito de condicionamento do sinal de tensão



Fonte: Autor.

Figura B.2 – Projeto do circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente



Fonte: Autor.

ANEXO C – Lista de componentes

Circuito de condicionamento do sinal de tensão:

R0t – 560 k
R1t – 18 k
R2t – 560 k
R3t – 560 k
R4t – 560 k
R5t – 560 k
R6 – 4,7 k
R7 – 2,7 k
R8 – 4,7 k
R9 – 2,2 k
R10 – 1 k
R11 – 2,2 k
R12 – 100 k
R13 – 8,2 k
R14 – 100 k
R15 – 22 k
R16 – 10
P1 – 5 k
P2 – 10 k
C1 – 1 nF
C2 – 2,7 nF
C3 – 1 nF
C4 – 15 nF
C5 – 1000 μ F 25 V
C6 – 1000 μ F 25 V
C7 – 330 nF
C8 – 330 nF
D1 – 1N4148
D2 – IN4728A
IC1 – TL084CN
CN1 – Borne
CN2 – Borne
CN3 – Borne
B1 – Barra com dois pinos

Circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente:

R1c – 100
R2c – 6,8 k
R3c – 12 k
R4c – 6,8 k
R5c – 12 k
R6 – 4,7 k
R7 – 2,7 k
R8 – 4,7 k
R9 – 2,2 k
R10 – 1 k

R11 – 2,2 k
R12 – 100 k
R13 – 8,2 k
R14 – 100 k
R15 – 22 k
R16 – 10
P1 – 5 k
P2 – 10 k
C1 – 1 nF
C2 – 2,7 nF
C3 – 1 nF
C4 – 15 nF
C5 – 1000 μ F 25 V
C6 – 1000 μ F 25 V
C7 – 330 nF
C8 – 330 nF
D1 – 1N4148
D2 – IN4728A
IC1 – TL084CN
S1 – LA55-P
CN1 – Borne
CN2 – Borne
B1 – Barra com dois pinos