



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

LUCAS REIS SOUSA

**POTENCIOSTATO DE BAIXO CUSTO COM TRANSMISSÃO DE DADOS
SEM FIO**

Sorocaba

2021

LUCAS REIS SOUSA

Potenciostato de Baixo Custo com Transmissão de Dados Sem Fio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Sorocaba

2021

S725p Sousa, Lucas Reis
Potenciostato de baixo custo com transmissão de dados sem fio /
Lucas Reis Sousa. -- Sorocaba, 2021
55 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Eletroanalítica. 2. Eletrodo Impresso. 3. Transmissão de dados. 4.
Redes sem fio. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

Potenciostato de Baixo Custo com Transmissão de Dados Sem Fio

LUCAS REIS SOUSA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Prof. Dr. Mauricio Becerra Vargas
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY
Orientador/UNESP-Campus de Sorocaba

Prof. Dr. EVERSON MARTINS
UNESP- Campus de Sorocaba

Me. RODRIGO PITA ROLLE
UNESP – Campus de Sorocaba

Dezembro de 2021

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Jesus Cristo, nosso único redentor e salvador, pela minha vida e pelo dom da perseverança, e a Maria Santíssima, nossa intercessora e advogada, por todas as vezes que recorri e fui atendido nos momentos de angústia.

Agradeço aos meus pais Carlos e Ladir, por me proporcionarem a oportunidade de estudar, por todos os conselhos e por sempre me apoiarem em todas as decisões, também agradeço por tudo que me ensinaram, principalmente as virtudes da humildade e gratidão.

Ao meu irmão Ed, minha cunhada Fernanda e minhas sobrinhas Isabelli e Lorena, por todos os momentos de descontração e pelas palavras de conforto em momentos difíceis.

A minha namorada Letícia, que sempre esteve comigo nessa jornada, escutando meus desabafos, me aconselhando, me animando e sempre me mantendo firme para continuar.

Aos amigos/irmãos da Turma XIII, agradeço pelo companheirismo de todos, pela sinceridade, pelas festas, pela amizade verdadeira, pelos momentos difíceis, pelas confraternizações, pelos grupos de estudo e por todos os momentos que vivemos juntos, sem vocês com certeza tudo se tornaria muito mais difícil, vou levá-los para sempre comigo, alguns mais próximos e alguns mais distantes, porém sempre em minha lembrança.

Ao professor Dr. Eduardo Paciência Godoy por todos os conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento do trabalho, pela orientação, dedicação e oportunidade em desenvolver este trabalho.

Agradeço a todos meus familiares e amigos, que sempre torceram por mim e pelo meu sucesso, vocês fizeram parte significativa da minha história: GRATIDÃO!

SOUSA, L. R. Potenciostato de Baixo Custo com Transmissão de Dados Sem Fio. Trabalho de Graduação (Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2021.

Resumo

Com o avanço da tecnologia, o tempo em que as informações são transmitidas se torna cada vez menor, a miniaturização e a intercambialidade de dispositivos têm sido amplamente exploradas em diferentes frentes de pesquisa. A eletroanalítica tem conseguido avançar bastante no âmbito portabilidade e miniaturização, principalmente no desenvolvimento dos chamados eletrodos impressos, que são células eletroquímicas produzidas por um processo de deposição de tintas especiais sobre um substrato, geralmente feito de um material cerâmico de dimensões milimétricas. Esses eletrodos são amplamente utilizados para análises *in situ*, porém necessitam de um potenciostato portátil para a leitura e processamento do sinal elétrico provindo do eletrodo, dispositivo que possui um valor elevado e poucas opções de transmissão de dados. O presente trabalho consiste do desenvolvimento de um potenciostato de baixo custo e com transmissão de dados sem fio, além de uma interface para armazenamento e apresentação gráfica de dados. São utilizados circuitos elétricos para adequação, amplificação e tratamento dos sinais provenientes do eletrodo impresso, um módulo ESP32 para aquisição de dados e transmissão sem fio utilizando Wi-Fi e os protocolos de comunicação TCP/IP, um microcomputador com módulo Wi-Fi e o *software* LabVIEW para configurar o recebimento e adequação dos dados enviados do ESP32 e posteriormente armazená-los e apresentá-los na interface gráfica desenvolvida.

Palavras-chave: Eletrodo Impresso, Eletroanalítica, Potenciostato, Transmissão de Dados, Redes Sem Fio.

SOUSA, L. R. Low Cost Potentiostat with Wireless Data Transmission. Graduation Project (bachelor's degree in Control and Automation Engineering) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2021.

Abstract

With the advancement of technology, the time over which information is transmitted becomes less and less, the miniaturization and interchangeability of devices has been widely explored in different research fronts. Electroanalytics has managed to advance a lot in the scope of portability and miniaturization, mainly in the development of so-called printed electrodes, which are electrochemical cells produced by a process of deposition of special inks on a substrate, usually made of a ceramic material with millimeter dimensions. These electrodes are widely used for *in situ* analysis, but they need a portable potentiostat to read and process the electrical signal coming from the electrode, an expensive device and few data transmission options. The present work consists of the development of a low-cost potentiostat with wireless data transmission, in addition to an interface for storage and graphical presentation of data, using electrical circuits for adaptation, amplification and processing of signals from the printed electrode, a module ESP32 for data acquisition and transmission using Wi-Fi and TCP/IP communication protocols, a microcomputer with Wi-Fi module and LabVIEW software to configure the reception and adequacy of data sent from ESP32 and later store and display them in the developed graphical interface.

Keywords: Printed Electrode, Electroanalytical, Potentiostat, Data Transmission, Wireless Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes principais de um sensor eletroquímico.	15
Figura 2 - Eletrodo impresso comercial.	16
Figura 3 - Etapas da produção de um SPE.	17
Figura 4 - Circuito básico de um potenciostato.	19
Figura 5 - Potenciostato comercial de bancada.	20
Figura 6 - Potenciostato comercial portátil conectado à um computador.	20
Figura 7 - Realimentação positiva e negativa.	22
Figura 8 - Padrões de redes sem fio.	23
Figura 9 - Camadas TCP/IP	25
Figura 10 - Arquitetura do potenciostato desenvolvido.	28
Figura 11 - Eletrodo impresso comercial.	29
Figura 12 - Circuito <i>buffer</i>	30
Figura 13 - Pinagem LM741	31
Figura 14 - Módulo NodeMCU-32S ESP32	32
Figura 15 - Circuito elétrico montado no simulador.	36
Figura 16 - Gráfico de teste de filtragem do capacitor.	36
Figura 17 - Circuito de amplificação montado no simulador.	37
Figura 18 - Circuito gerador de tensão simétrica.	38
Figura 19 - Circuitos montados em protoboard.	39
Figura 20 - Código desenvolvido para transmissão de dados sem fio.	41
Figura 21 - Fluxograma de funcionamento da função tcp.	42
Figura 22 - Conexão com a rede Wi-Fi criada.	43
Figura 23 - Código desenvolvido em diagrama de blocos.	43
Figura 24 - SubVI desenvolvido.	44
Figura 25 - Interface gráfica desenvolvida no LabVIEW.	45
Figura 26 - Parte do diagrama de blocos para salvar dados.	46
Figura 27 - Curvas de corrente (uA) <i>versus</i> tempo (s) obtidas pelo potenciostato comercial (preta) e potenciostato desenvolvido (vermelha) para concentração de 1,0 mM.	48
Figura 28 - Curvas de corrente (uA) <i>versus</i> tempo (s) obtidas pelo potenciostato comercial (preta) e potenciostato desenvolvido (vermelha) para concentração de 5,0 mM.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os valores médio de corrente obtidos no dispositivo desenvolvido e comercial.	49
--	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Estrutura do Trabalho	13
2.	REVISÃO CONCEITUAL	15
2.1	Sensores eletroquímicos	15
2.1.1	Eletrodos impressos.....	16
2.1.2	Modificação da superfície do eletrodo	18
2.1.3	Potenciostatos.....	18
2.2	Amplificadores operacionais	21
2.2.1	Modos de operação e aplicações	21
2.2.2	Tensão de <i>offset</i>	22
2.3	Redes sem fio.....	23
2.4	Protocolo TCP/IP	24
2.4.1	Modelo do TCP/IP	25
2.4.1.1	Camada de aplicação	25
2.4.1.2	Camada de transporte	26
2.4.1.3	Camada de rede	26
2.4.1.4	Camada de interface de rede.....	26
3.	SISTEMA DESENVOLVIDO.....	27
3.1	Proposta de trabalho.....	27
3.2	<i>Hardware</i> s e <i>software</i> s utilizados	28
3.2.1	Eletrodo impresso modificado	28
3.2.2	Amplificador inversor e <i>buffer</i>	30
3.2.3	Multisim	31

3.2.4	Módulo NodeMCU-32S ESP32.....	32
3.2.5	Arduino IDE.....	33
3.2.6	LabVIEW.....	33
4.	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO.....	35
4.1	Circuito elétrico.....	35
4.1.1	Projeto do circuito elétrico.....	35
4.1.2	Montagem do circuito na <i>protoboard</i>	39
4.2	Integração circuito elétrico e módulo ESP32.....	40
4.3	Conexão do módulo ESP32 com LabVIEW.....	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1	Validação do dispositivo.....	47
6.	CONCLUSÃO.....	51
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Com o avanço da eletroanalítica, que é um conjunto de métodos para detecção e quantificação de um analito em uma substância baseado em suas propriedades elétricas, se tornou cada vez mais necessário a utilização desses métodos em campo, uma vez que a análise da amostra no momento da coleta elimina uma grande quantidade de erros que podem vir a ocorrer no transporte da amostra até o laboratório. Porém uma das barreiras para esse avanço era justamente a portabilidade dos dispositivos utilizados, desde a célula eletroquímica até os aparatos eletrônicos para processamento do sinal que possuem um tamanho considerável dificultando a logística. Dessa forma vem se desenvolvendo cada vez mais a portabilidade desses dispositivos, o eletrodo impresso surgiu dessa necessidade e logo em seguida os potenciostatos comerciais portáteis para análises *in situ*, entretanto com elevadíssimo custo.

Os potenciostatos em conjunto com eletrodos impressos possuem uma variedade de aplicações, análises ambientais, resíduos industriais, agricultura, microbiologia, indústria farmacêutica e alimentícia entre outras diversas aplicações. Em aplicações de análises ambientais tem-se medições de poluição do ar, solo, água, identificação de poluentes em resíduos industriais, sejam líquidos, sólidos ou gasosos. Na indústria alimentícia, por exemplo, utiliza-se na identificação de pesticidas, elementos tóxicos em alimentos, componentes farmacêuticos e contaminação biológica em alimentos de origem animal. Aplica-se em identificação de vírus e drogas em excreções humanas, análises de qualidade de solo e água para agricultura, controle de qualidade de combustíveis e mais uma imensa gama de aplicações.

O sensoriamento eletroquímico é extremamente útil, como visto acima, os dados obtidos são utilizados na tomada de decisões para que riscos sejam mitigados, contaminações sejam evitadas e controladas, doenças recebam tratamentos corretos, alimentos tenham qualidade, crimes sejam elucidados e outras diversas variáveis sejam controladas. Um potenciostato de baixo custo munido de transmissão de dados sem fio em tempo real impacta diretamente na viabilidade financeira, portabilidade e tempo de ação para as aplicações citadas [1, 2].

Nesse contexto, torna-se relevante a busca pelo desenvolvimento de soluções de potenciostato de baixo custo usando circuitos eletrônicos com capacidade de comunicação

sem fio para habilitar portabilidade e versatilidade. Essa proposta de trabalho faz parte de uma cooperação entre o aluno/orientador e o projeto de Pós-doutorado da aluna Maísa Azevedo Beluomini do curso de Engenharia Química do campus UNESP de Araraquara, que desenvolveu o sensor eletroquímico baseado em eletrodo impresso modificado para análise da água residual da indústria cítrica, que possui uma rica composição orgânica o que a torna altamente poluente. Entretanto, esse resíduo pode ser reaproveitado mediante a análises da biomassa, o sensor desenvolvido drena um valor de corrente específico para cada uma das diferentes concentrações dos flavonoides de interesse. Dessa forma, o conhecimento em química e eletroanalítica foi fornecido pelo pessoal da Unesp Araraquara, enquanto que o conhecimento em instrumentação eletrônica e comunicação sem fio foi fornecido pelo pessoal da Unesp Sorocaba. Através dessa cooperação, propõe-se o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um potenciostato de baixo custo e com transmissão de dados sem fio, bem como uma interface de plotagem gráfica em tempo real com opção de armazenamento de dados, destinado à análises em campo e coleta de dados utilizando um eletrodo impresso modificado.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de graduação está estruturado da seguinte forma:

Revisão da literatura: neste capítulo estão os levantamentos relevantes acerca dos conceitos teóricos para embasar o leitor, sobre os temas necessários para a compreensão dos demais capítulos do trabalho.

Sistema desenvolvido: este capítulo apresenta o trabalho proposto, bem como uma breve descrição de todos os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho, tanto *hardwares* quanto *softwares*.

Desenvolvimento do dispositivo: neste capítulo é apresentado o projeto, simulação, montagem e teste do circuito elétrico. Também é explanado sobre a programação do módulo ESP32 e a comunicação com o programa no LabVIEW. Além da apresentação detalhada do programa desenvolvido no LabVIEW e sua interface gráfica.

Resultados e discussões: neste capítulo são apresentados os testes realizados com o dispositivo desenvolvido, as curvas e a tabela de comparações com os resultados de um potenciostato comercial, bem como as discussões dos resultados e das dificuldades encontradas.

Conclusões: neste capítulo são apresentadas as considerações da funcionalidade do dispositivo e os objetivos alcançados com o trabalho, além de um breve texto sobre trabalhos futuros.

2. REVISÃO CONCEITUAL

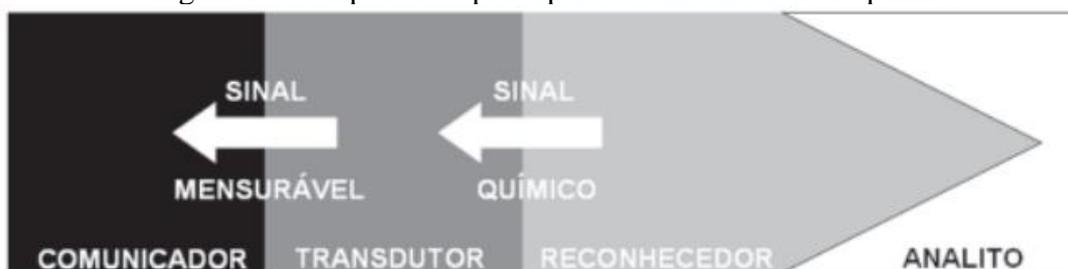
2.1 Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos são componentes amplamente utilizados no estudo da química, eles são capazes de realizar medições para obter dados com o mínimo de interferência possível no sistema analisado, são utilizados em uma larga escala de aplicações. Estes por sua vez não possuem a precisão e exatidão de um grande sistema químico montado em bancada, métodos instrumentais, que são os que permitem maior fidelidade nos dados entregues, mas não têm a possibilidade de serem levados a campo para análises em tempo real. Diferentemente dos sensores eletroquímicos que tem a portabilidade como uma grande vantagem e possuem também um baixo custo e facilidade na automação. Mesmo os dados não sendo tão fiéis quanto os de um sistema de bancada, estes se fazem suficientes para que sejam tomadas decisões.

A substância a ser reconhecida, chamada analito, é depositada em uma das extremidades do sensor, onde está situada a membrana de diferenciação, que deve ter a capacidade de diferenciar este analito diante de outras substâncias.

A modificação química nessa membrana permite a identificação do analito desejado, uma vez que esse tratamento faz com que a interação com o analito seja maximizada. Sendo assim, o sinal químico passa pelo elemento de transdução no sensor, convertendo-o em um sinal elétrico mensurável, a Figura 1 abaixo mostra o esquema dos principais elementos de um sensor eletroquímico. [4]

Figura 1 - Componentes principais de um sensor eletroquímico.



Fonte: LOWINSOHN; BERTOTTI, 2006.

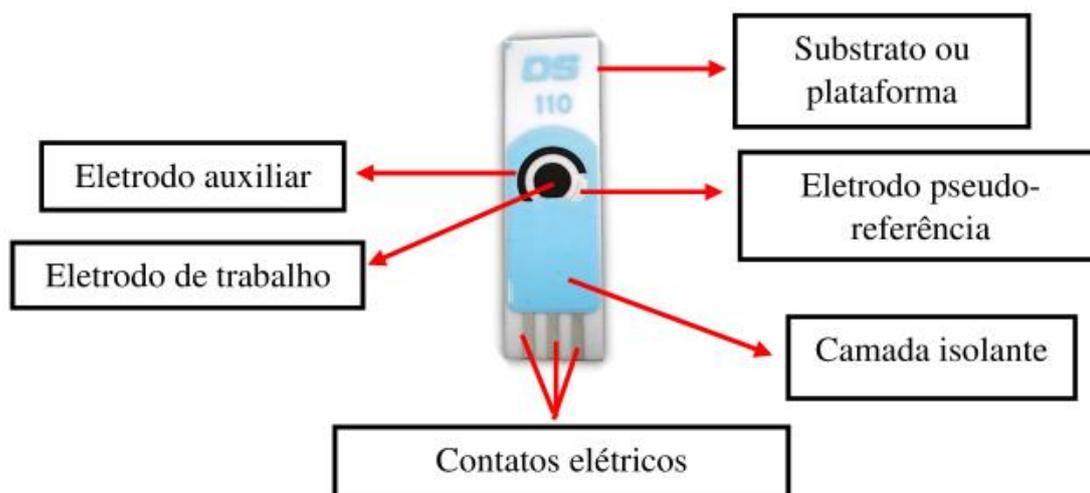
Os sensores eletroquímicos possuem uma vasta aplicabilidade, análises ambientais e biológicas, indústria alimentícia, química, muitas vezes aplicados em processos de fabricação para identificação de parâmetros e tomadas de decisão.

2.1.1 Eletrodos impressos

Nos sensores eletroquímicos o elemento de transdução de sinal é o eletrodo. Na década de 1990, o avanço da serigrafia facilitou a fabricação em larga escala dos eletrodos impressos em telas descartáveis, atualmente esses eletrodos são chamados de SPE's (*screen-printed electrodes*) e desde que foram criados sempre mostraram excelente aplicabilidade como sensores eletroquímicos, além disso a facilidade de fabricação permite que sejam produzidos em qualquer laboratório sem necessidade uma grande infraestrutura.

As placas descartáveis geralmente são compostas por três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho (ET), eletrodo de referência (ER) e o eletrodo auxiliar (EA), estes formam o sensor eletroquímico, que é comercializado em diferentes tamanhos e formatos, o eletrodo de trabalho pode ser modificado dependendo do analito que se deseja obter dados, essa modificação química na superfície do eletrodo altera a sua característica e faz com que a transdução do sinal seja mais efetiva para o tipo de analito desejado [5].

Figura 2 - Eletrodo impresso comercial.



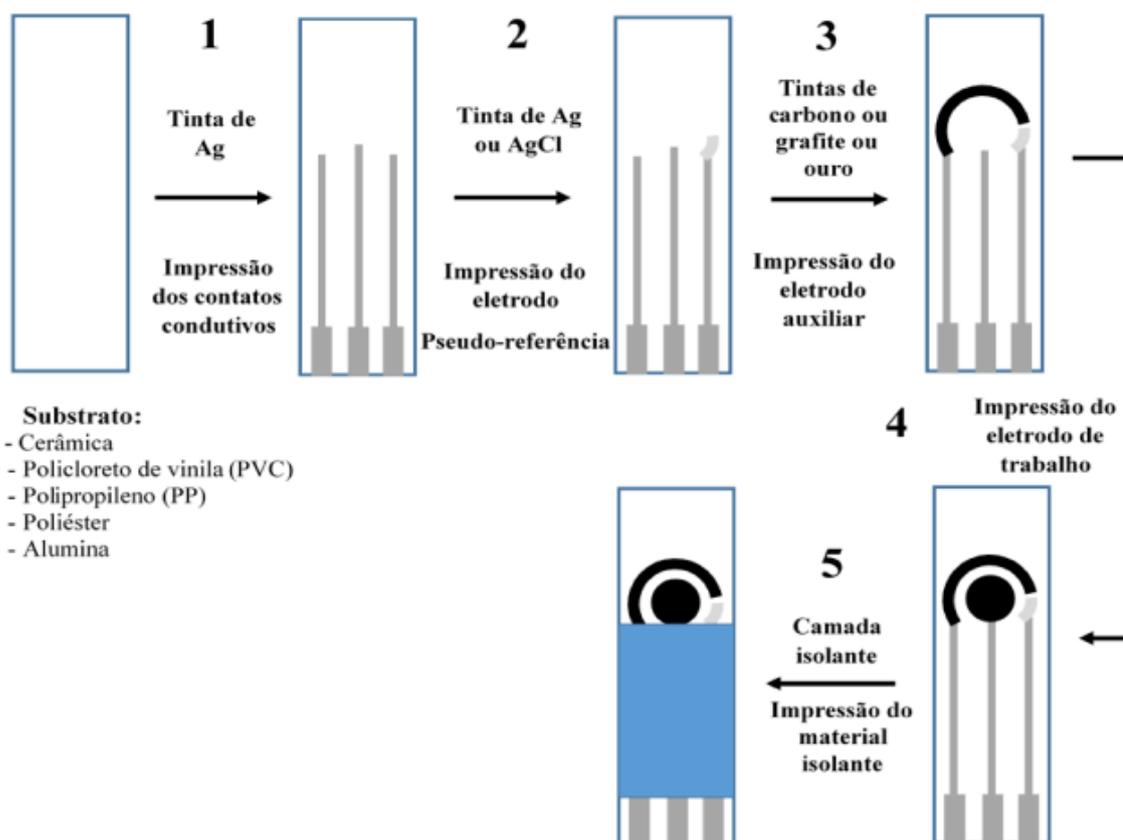
Fonte: SQUISSATO, 2019.

Na produção do SPE's todos os processos são bem estabelecidos pelas indústrias, o que facilita a produção em larga escala. O substrato ou plataforma deve ser de um material que apresente uma elevada estabilidade química e eletroquímica, geralmente um material cerâmico, mas também pode ser feito de policloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP), poliéster, alumina, entre outros.

Antes da impressão dos eletrodos em si, ocorre a impressão dos contatos condutivos, aqueles que farão a ligação do eletrodo químico com o circuito elétrico utilizado para obtenção dos dados desejados.

O processo de *screen-printing* consiste em depositar camadas de tintas inertes e condutivas sobre a plataforma utilizando-se um molde ou máscara para delimitar a área de aplicação das tintas, dessa forma definindo o formato dos eletrodos, geralmente são utilizadas tintas de carbono, ouro, prata e cobre. As camadas de tinta devem possuir um padrão de espessura para aumentar a estabilidade do eletrodo e também garantir que exista um padrão na confecção de larga escala, após cada camada aplica-se um tratamento térmico para auxiliar o processo de secagem, diferentes tipos de tintas são utilizados com a finalidade de desenvolver as características eletroquímicas do eletrodo. Após a deposição das tintas no substrato é colocada então uma faixa de material isolante delimitando os eletrodos e os contatos elétricos. Na Figura 3 abaixo é possível ver o processo de produção de um SPE comercial [5].

Figura 3 - Etapas da produção de um SPE.



Fonte: SQUISSATO, 2019.

2.1.2 Modificação da superfície do eletrodo

Os SPE's comerciais produzidos em larga escala geralmente possuem as mesmas características químicas, ou seja, têm uma resposta padrão para alguns analitos ou muitas vezes não são capazes de identificar outros deles, dessa forma a modificação da superfície do eletrodo de trabalho é uma opção bastante utilizada em pesquisas. Essa modificação faz com que as características do eletrodo sejam alteradas promovendo um melhor desempenho eletroquímico.

Essas modificações eram feitas utilizando deposição de filmes de mercúrio nos eletrodos de carbono, porém essa técnica foi gradativamente abandonada devido à toxicidade do mercúrio para o ser humano e meio ambiente. Desde então outros materiais tem sido estudados para modificar eletrodos de carbono, tais como filmes de ouro, prata, níquel e bismuto.

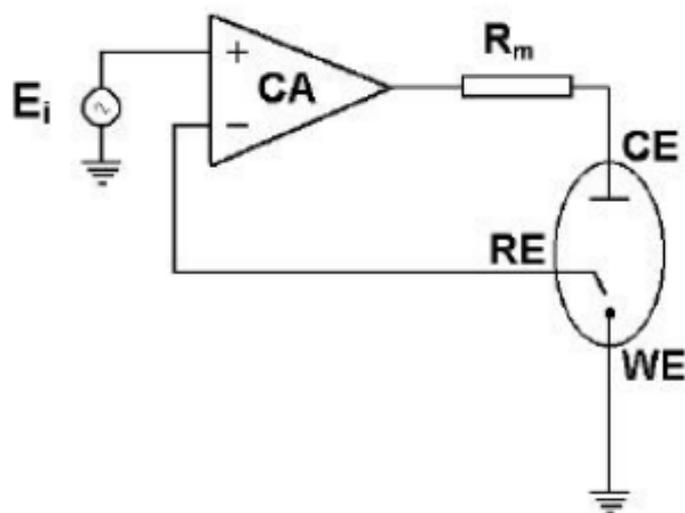
A modificação das superfícies dos eletrodos traz uma melhora significativa na sensibilidade química, técnicas que utilizam nanomateriais aplicados a superfície também são muito interessantes no sentido de aumento da área superficial do eletrodo que tem como resultado a melhora nos parâmetros de seletividade do analito. Porém, após diversas modificações, umas das principais dificuldades está na reprodutibilidade [5].

2.1.3 Potenciostatos

Os potenciostatos são dispositivos utilizados em células eletroquímicas e tem a função de controlar o potencial aplicado entre os eletrodos e medir a corrente resultante após aplicação de potenciais elétricos entre eletrodos, o dispositivo foi desenvolvido por A. Hickling em 1942 para ser utilizado na célula eletroquímica de três eletrodos desenvolvida por ele.

Os circuitos potenciostatos aplicam tensão entre os eletrodos de trabalho (WE) e referência (RE) forçando uma corrente a circular no eletrodo auxiliar, também chamado de contra eletrodo (CE), essa corrente é medida entre os eletrodos de trabalho (WE) e auxiliar (CE), basicamente o potenciostato funciona como um gerador de funções para aplicar o potencial juntamente com um amperímetro para medir a corrente resultante. O circuito básico de um potenciostato está mostrado Figura 4, no circuito a corrente de interesse pode ser medida no resistor R_m .

Figura 4 - Circuito básico de um potenciostato.



Fonte: CANTASINI, 2019.

Os potenciostatos comerciais para uso em laboratório são muito precisos e oferecem grande variedade de métodos. Além de valores fixo de tensão eles podem fornecer funções como rampas de tensão, ondas quadradas, pulsos de tensão e outras formas.

Existem duas técnicas de potencial:

- Cronoamperometria: nesta técnica mantém-se uma tensão constante aplicada nos eletrodos e coleta-se as correntes resultantes para diferentes concentrações de analito;
- Voltametria: na voltametria aplica-se uma função de tensão e mede-se as correntes em função do tempo;

Ambas técnicas podem ser configuradas em um potenciostato de bancada, que oferece diversos recursos gráficos, processamento de dados, plotagem de dados, armazenamento, análises gráficas, conexão com outros dispositivos, entre outros.

A Figura 5 abaixo apresenta um potenciostato de bancada completo juntamente com uma célula eletroquímica à direita e um computador que é utilizado para configuração das análises, armazenamento e na análise dos dados e interface gráfica. Uma desvantagem dos potenciostatos de bancada é a inviabilidade logística para análises em campo, além do elevado custo.

Figura 5 - Potenciostato comercial de bancada.



Fonte: METROHM , 2021.

Os potenciostatos portáteis comerciais, como o exemplo apresentado na Figura 6, surgiram para atender à necessidade das análises em campo juntamente com os eletrodos impressos, em geral eles têm a limitação de técnicas e são tão precisos quanto os potenciostatos de bancada, possuem a vantagem da portabilidade, porém também tem alto valor de mercado.

Figura 6 - Potenciostato comercial portátil conectado à um computador.



Fonte: PAULA, 2013.

Devido ao custo dos potenciostatos comerciais, as pesquisas em torno do desenvolvimento de potenciostatos portáteis de baixo custo tem aumentado, principalmente para aplicações específicas que não necessitam de uma variedade de técnicas e nem de elevada precisão. O desenvolvimento dos mesmos em geral é baseado em amplificadores operacionais transistorizados, microcontroladores e outros componentes de baixo custo [1, 3].

2.2 Amplificadores operacionais

O amplificador operacional, também chamado de amp-op ou AOP, é um componente muito utilizado na instrumentação. O nome composto se dá porque além de ser capaz de amplificar um sinal de entrada também consegue fazer operações matemáticas (soma, subtração, derivação, integração e multiplicação) com esse sinal.

O esquemático de uma amp-op tem necessariamente 5 terminais de interesse, entrada inversora (V_-), entrada não-inversora (V_+), alimentação positiva ($+V_{cc}$), alimentação negativa ($-V_{cc}$) e saída (V_s). A saída é o produto entre um fator de ganho geralmente chamado A e o valor da diferença entre as duas entradas, expressa pela equação (1):

$$V_s = A * [(V_+) - (V_-)] \quad (1)$$

Por definição o fator de ganho A sempre será positivo, e a tensão de saída V_s será negativa quando V_+ for menor que V_- .

As principais de características de um amplificador operacional são:

- Impedância de entrada elevada: em um cenário ideal é admitida impedância infinita;
- Impedância de saída tendendo a zero;
- Ganho de tensão elevado em malha aberta: um ganho de tensão elevado é muito útil para pequenos sinais, idealmente adota-se esse ganho como infinito;
- Resposta em frequência elevada: devido a amplificação é importante que a faixa de frequência seja extensa para que não haja cortes ou atenuações;
- Baixa sensibilidade à temperatura: as variações térmicas podem alterar algumas características dos amp-ops, idealmente este não apresentaria sensibilidade a temperatura [6,7].

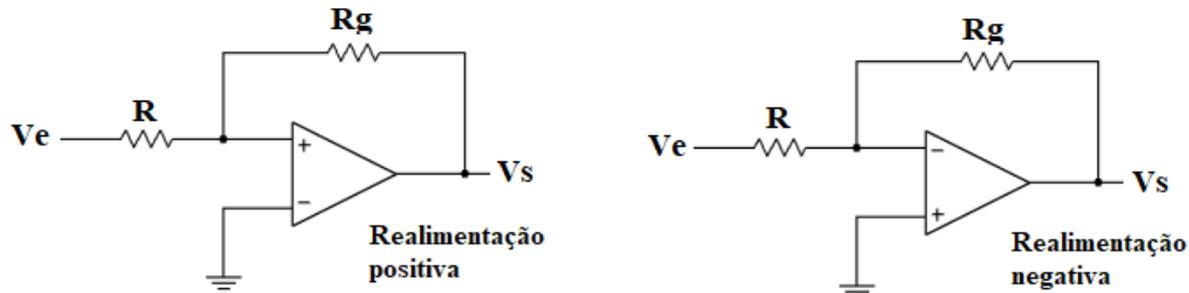
2.2.1 Modos de operação e aplicações

Os amplificadores operações possuem em geral três modos de operação, sendo eles:

- Sem realimentação: é a operação em malha aberta, ou seja, não há um ramo de realimentação ligando a saída e a entrada, nesse modo ele opera com o seu próprio ganho interno estipulado no *datasheet* pelo fabricante;
- Realimentação positiva: um dos modos de operação em malha fecha, ou seja, há um ramo de realimentação tem saída ligada a entrada não-inversora; nesse modo há uma desvantagem de instabilidade no circuito, logo essa configuração é usada em circuitos osciladores;
- Realimentação negativa: modo de operação em malha fechada, possui uma resposta linear e um bom controle de ganho; assim como na realimentação positiva o ganho é definido pela relação entre resistor na entrada e resistor da realimentação.

A Figura 7 acima representa os modos de operação em malha fechada com realimentação positiva e negativa respectivamente, nesse caso o fato de ganho (A) é definido pela relação entre R_g e R . Existem inúmeros tipos de circuitos que utilizam amplificadores operacionais, circuito diferenciador, integrador, isolador (*buffer*), filtros ativos, além dos circuitos de amplificação, amplificador inversor, não-inversor, subtrator, somador [6,7].

Figura 7 - Realimentação positiva e negativa.



Fonte: Autoria Própria.

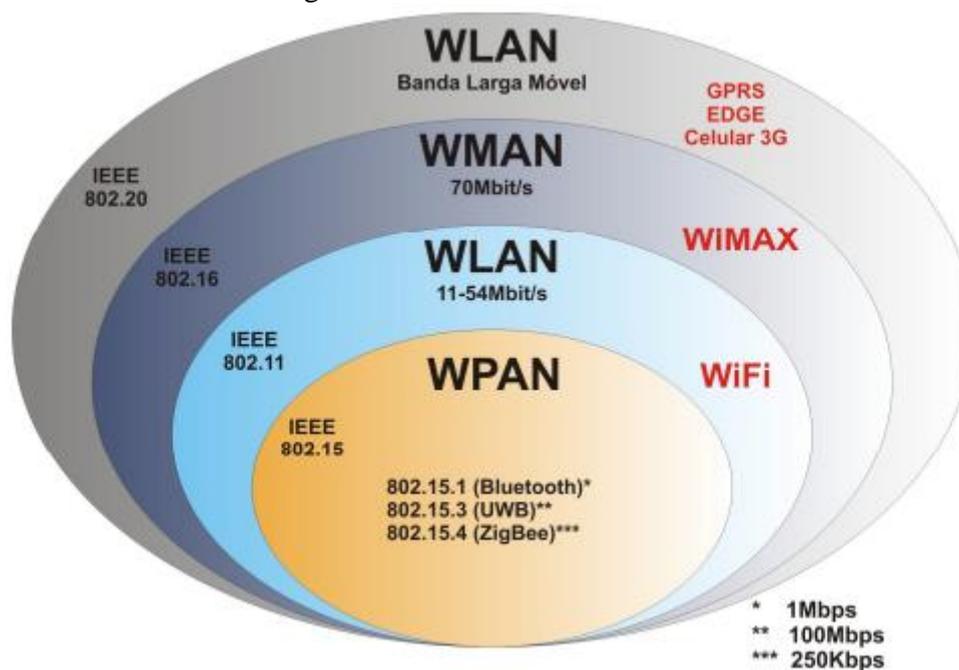
2.2.2 Tensão de *offset*

Os amplificadores operacionais possuem uma tensão de *offset* na saída, essa tensão é considerada um erro de saída e está descrita no *datasheet* pelos fabricantes, idealmente quando as duas entradas do amplificador operacional estão zeradas, a saída também deveria ser nula, porém a tensão de *offset* faz com que a saída um valor proporcional ao ganho. Em aplicações que necessitam de certa precisão essa tensão pode levar a erros de medição, comprometendo a qualidade do circuito e por isso é necessário anular essa tensão [6].

2.3 Redes sem fio

As redes sem fio ou *wireless* utilizam as tecnologias de ondas eletromagnéticas para realizar a transmissão de pacotes de dados. Essas redes tem se tornado cada vez mais comuns, justamente pela disseminação do uso de *smartphones*, *smart devices*, *tablets*, *notebooks*, etc. A Figura 8 apresenta um panorama das redes sem fio.

Figura 8 - Padrões de redes sem fio.



Fonte: ZUCATO, 2009.

Como citados os *smartphones* possuem acesso a diferentes tipos de redes mostradas acima, as redes móveis de dados são utilizadas em outras soluções, principalmente em soluções de IoT (*Internet Of Things*). Outra tecnologia que vem sendo difundida são as ondas de rádio micrométricas para transmissão chamada fibra-rádio, uma rede com núcleo de fibra óptica e acesso via rádio, o WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é o nome da tecnologia empregada e já padronizada.

As redes chamadas WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) são redes pessoais que foram desenvolvidas inicialmente para conexão de dispositivos tais como, relógios inteligentes, fones de ouvido, celulares, por isso possuem um baixo raio de alcance, aproximadamente 10 metros, entre as WPAN estão as tecnologias ZigBee e Bluetooth, definidas pela norma IEEE 802.15 [8, 9].

O Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), uma rede WLAN (*Wireless Local Area Network*), é uma das redes mais utilizadas em aplicações residenciais e comerciais, é definida pelo noma IEEE

802.11, todos os dispositivos conectados a rede sem fio são chamados de estações, esses podem ser clientes de rede ou *Access Point*. As arquiteturas básicas de rede sem fio são:

- IBSS (*Independent Basic Service Set*) – Os dispositivos se comunicam diretamente entre si, nessa arquitetura existem apenas clientes, como tablets, computadores e outros dispositivos, são chamadas de redes Ad-Hoc, a rede é criada e utilizada para transmissão de dados e depois é desmontada;
- BSS (*Basic Service Set*) – Nessa arquitetura os dispositivos cliente estão interconectados através de um *Access Point (AP)*, toda BSS possui um nome de identificação configurado no AP chamado SSID (*Service Set Identifier*).
- ESS (*Extend Service Set*) – Consiste em um conjunto de BSS's com intuito de aumentar o alcance e a capacidade da rede Wi-Fi, pode conter diversos *Access Points* que são conectados entre si por meio de um serviço de distribuição, podendo conter milhares de clientes conectados [8, 9].

2.4 Protocolo TCP/IP

A sigla TCP/IP significa *Trasmission Control Protocol/Internet Protocol* (Protocolo de controle de transmissão/protocolo da internet) e é um dos principais protocolos de envio e recebimento de dados para internet. O TCP/IP na verdade é um conjunto ou pilha de protocolos. Um protocolo é um conjunto de regras que gera uma espécie de idioma permitindo a comunicação entre dois ou mais dispositivos conectados em rede, se existirem dispositivos na mesma rede, mas com protocolos diferentes, eles não conseguirão se comunicar.

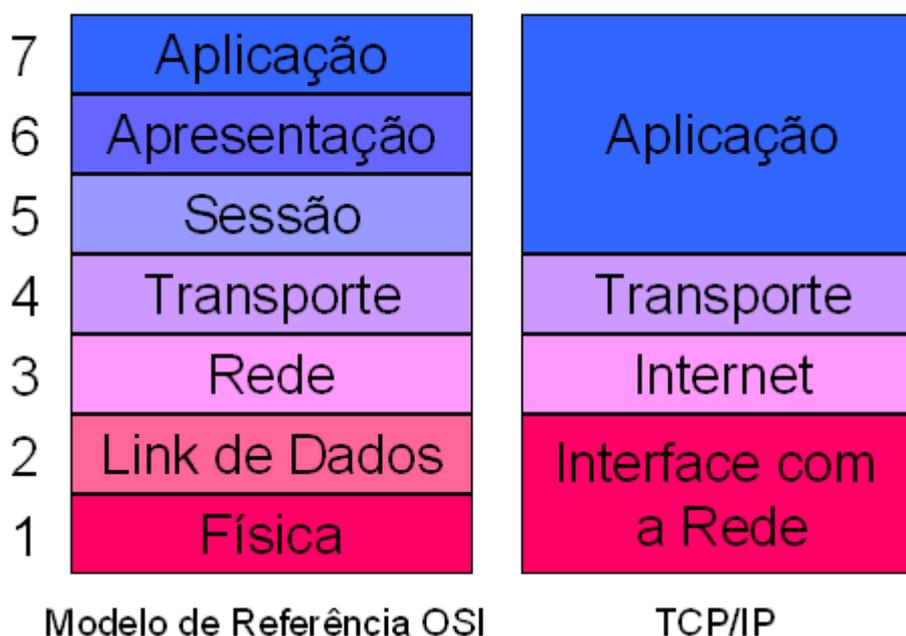
Atualmente o TCP/IP é bastante utilizado nos computadores, tornou-se um padrão entre os fabricantes, facilitando a comunicação entre diferentes máquinas. O método utilizado pelo TCP/IP é o de cliente/servidor, quando um dispositivo da rede faz uma solicitação, por exemplo de um dado, é o TCP que fragmenta a informação em pequenos pacotes de dados e os envia pela rede, para que esses dados cheguem de forma correta é necessário que haja um endereço de entrega, nessa etapa o IP fornece esse endereço, quando o dispositivo que fez a solicitação recebe esses pequenos pacotes ele utiliza novamente o TCP para montar a mensagem que foi enviada. Nesse tipo de comunicação nem sempre os pedaços das informações vão por uma mesma rota, eles alteram caso tenha alguma rota indisponível, porém o endereço IP garante que elas chegarão no mesmo lugar de forma completa, as vantagens de utilizar o TCP/IP são muitas, entre elas se destacam a

padronização, segurança na troca de informações entre os *hosts*, compatibilidade, conexão remota, robustez [10, 11, 12].

2.4.1 Modelo do TCP/IP

O modelo TCP/IP é separado em camadas de comunicação conforme o modelo de referência OSI, porém possui apenas 4 camadas ao invés de 7, cada uma delas tem funções distintas e tem extrema importância para a correta transmissão e recepção dos pacotes de dados, garantindo a entrega dos dados com integridade preservada para a camada acima. Elas são divididas em quatro: aplicação, transporte, rede e interface de rede, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Camadas TCP/IP



Fonte: TORRES, 2019.

2.4.1.1 Camada de aplicação

A camada de aplicação é a que está no topo, ela é responsável pelo envio e recebimento de dados entre as aplicações. É nela que ocorrem a maioria das requisições de tarefas na rede, além disso é a camada mais próxima do usuário onde existe maior interação com o mesmo. Na camada de aplicação existem diversos protocolos que são utilizados: TELNET (Terminal virtual), FTP (*File Transfer Protocol*) para transferências de arquivos, SMTP (*Send Mail Transfer Protocol*) para *e-mail*, DNS (*Domain Name System*), HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) para navegação *web*, entre outros.

2.4.1.2 Camada de transporte

A camada de transporte está localizada na segunda posição de baixo para cima, conforme a Figura 9 apresenta, tal camada é responsável por diversas funções relacionadas a confiabilidade e controle dos dados, é nessa camada que o protocolo TCP é utilizado, os dados são recebidos da camada de aplicação, verificados quanto a sua integridade e divididos em pequenos pacotes. Nessa camada o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), Protocolo de Datagrama do Usuário que não possui os mecanismos de reordenação de pacote e nem confirmação de recebimento como o TCP, dessa forma o UDP é considerado um não confiável e é utilizado quando nenhum dado importante está sendo transmitido, nesse caso a aplicação que solicitou a transmissão que será responsável por reordenar e verificar o pacote de dados, devido a isso o UDP se torna mais rápido do que o TCP, mesmo assim torna-se uma alternativa ao TCP.

2.4.1.3 Camada de rede

Também chamada de camada de internet ou inter-redes, é responsável por enviar os pacotes de dados que foram fragmentados na camada de transporte, essa camada garante que os dados cheguem corretamente ao destino final e para isso utiliza o IP (*Internet Protocol*) para dar os endereços corretos aos pacotes.

2.4.1.4 Camada de interface de rede

Essa camada, também chamada de camada de enlace ou camada física, é a camada que lida com as etapas físicas da comunicação, é por ela que é possível comunicar-se com outro dispositivo na mesma rede física. Também cuida dos elementos físicos, cabos de rede, redes sem fio, placas de rede, drives de dispositivo e outros elementos de conexão. Os protocolos utilizados nessa camada são: Ethernet para redes locais (LAN – *Local Area Network*) e PPP (*Point-to-Point Protocol*) e (WAN – *Wide Area Network*), essa última utilizada para rede de longa distância [10, 11, 13].

3. SISTEMA DESENVOLVIDO

No presente trabalho foram utilizadas diversas ferramentas de *software*, sendo eles para simulação do circuito analógico, programação e comunicação do microcontrolador e um para apresentação gráfica e numérica de dados, também se fez uso de uma série de componentes de *hardware* que serão descritos na seção abaixo, onde serão elencados todos os materiais utilizados bem como a metodologia de trabalho adotada para elaboração do projeto.

3.1 Proposta de trabalho

Tendo em vista o custo elevado de potenciostatos comerciais portáteis e a necessidade de transmitir, por um meio de comunicação sem fio, os dados de sensores eletroquímicos baseados em eletrodos impressos, para que esses pudessem ser coletados e processados remotamente, propôs-se o desenvolvimento de um potenciostato de baixo custo conectado a um dispositivo de transmissão de dados sem fio e uma interface de visualização gráfica com possibilidade de armazenamento de dados, que terá sua estrutura descrita abaixo.

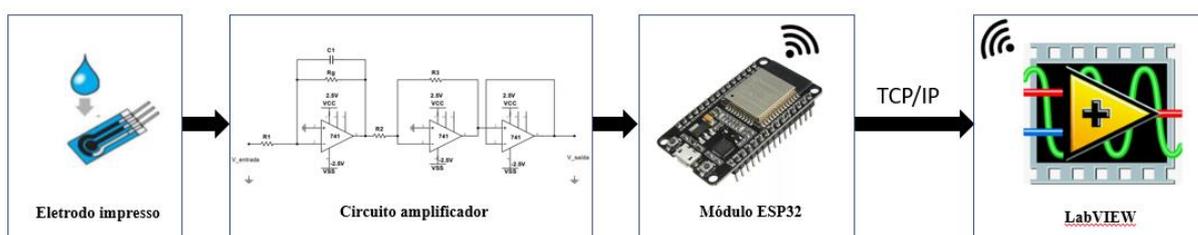
O desenvolvimento do projeto partiu-se primeiramente do entendimento acerca do eletrodo impresso (sensor eletroquímico) a ser utilizado, o qual drena uma corrente de ordem de microampère (μA) em um dos seus pinos, chamado eletrodo de trabalho, quando uma solução química é gotejada em sua superfície. Essa corrente é resultado de uma reação química que promove a movimentação de elétrons através dos eletrodos. O pino de trabalho do sensor foi conectado à entrada circuito elétrico de amplificadores operacionais, esse circuito tem a função de converter a corrente em tensão e amplificá-la até um valor que esteja adequado para ser lida pelas portas do microcontrolador. Os amplificadores operacionais LM741 foram montados na configuração de amplificador inversor e *buffer* respectivamente, além disso um circuito para gerar tensão simétrica também foi desenvolvido, uma vez que a os amplificadores operacionais necessitam de alimentação simétrica (positiva e negativa) para operar na configuração utilizada.

A saída do circuito elétrico com a tensão já amplificada foi conectada a uma das portas analógicas de um microcontrolador ESP32, o qual foi programado utilizando a interface de programação Arduino IDE. O programa desenvolvido utiliza as bibliotecas *WiFi* e *WiFiServer*, primeiramente são criados dois objetos, sendo um servidor em uma porta específica e um cliente, após isso o ESP32 é configurado para ser um ponto de acesso (*access point*), ou seja, uma rede com um nome escolhido é criada para que o cliente possa se

conectar possibilitando assim a comunicação, o protocolo de comunicação utilizada foi o *TCP/IP*. Dentro do programa é criada uma função que tem sua chamada contida dentro do laço de repetição (*loop*), essa função verifica se há clientes conectados no servidor e então, caso haja, inicia a leitura de dados em uma das portas analógicas do ESP32, esse dado é enviado para o cliente a cada intervalo de tempo escolhido no programa, configurado com o uso da função *delay* do Arduino IDE.

O cliente a ser conectado no servidor é configurado no *software LabVIEW* da *National Instruments* instalado em um computador, o qual se conectará na rede *WiFi* criada no ESP32, a programação no *LabVIEW* consistiu em configurar os blocos de programação para se comunicar com o servidor e receber os dados enviados, o programa faz a plotagem em uma interface gráfica dos dados em tempo real dando a possibilidade de salvá-los a qualquer momento que o usuário desejar. A arquitetura do dispositivo está mostrada na Figura 10, os materiais utilizados e o desenvolvimento detalhado do potenciostato estarão detalhados nas seções seguintes.

Figura 10 - Arquitetura do potenciostato desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Hardwares e softwares utilizados

Nos próximos tópicos serão descritos os *hardwares e softwares* utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

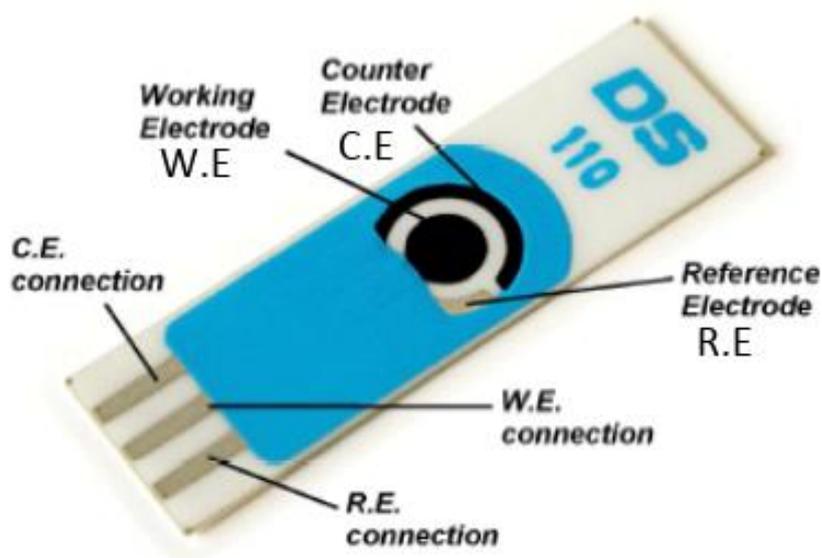
3.2.1 Eletrodo impresso modificado

O eletrodo impresso utilizado no projeto teve a sua superfície modificada com nanoporos de níquel tridimensionais (DnpNi/SPE), a eletrodeposição do nanoporos foi realizada com densidade de corrente constante em uma solução contendo $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de NiCl_2 , $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl e $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NH_4Cl em uma solução contendo $0,01 \text{ mol L}^{-1}$

de NiCl_2 , $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl e $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NH_4Cl . Este método, conhecido como modelo dinâmico de geração de bolhas de hidrogênio (do inglês *dynamic hydrogen bubble template*, ou DHBT) foi escolhido ao invés do método de corrosão eletroquímica seletiva, pois produziu poros de níquel livre de contaminação. Nesse método, a redução dos íons níquel e a reação de evolução do hidrogênio acontecem simultaneamente. Os parâmetros que afetam a formação dos nanoporos são: fonte e concentração de H^+ presente na solução de eletrodeposição, densidade de corrente aplicada, substrato e sal metálico utilizado. Para obter nanoporos de níquel em uma única etapa, a escolha do eletrólito suporte é fundamental devido à sua forte influência na morfologia e nas propriedades dos poros. Assim, o NH_4Cl foi escolhido como um dos eletrólitos, pois sua presença além de aumentar a taxa de evolução de H^+ , melhora a resistência mecânica do material. Além disso, a presença de NaCl contribui para a formação de NiCl^+ , evitando a formação de $\text{Ni}(\text{OH})_2$ e mantendo o níquel livre para a eletrodeposição [14].

O eletrodo impresso apresentado na Figura 11 é o mesmo utilizado no projeto, a modificação da superfície não altera o aspecto visual do eletrodo comercial.

Figura 11 - Eletrodo impresso comercial.



Fonte: SQUISSATO, 2019.

O eletrodo impresso acima apresentado possui três eletrodos conforme observado, sendo eles:

- *Working Electrode* (WE) – Eletrodo de trabalho;
- *Counter Electrode* (CE) – Contra-eletrodo ou eletrodo auxiliar;
- *Reference Electrode* (RE) – Eletrodo de referência.

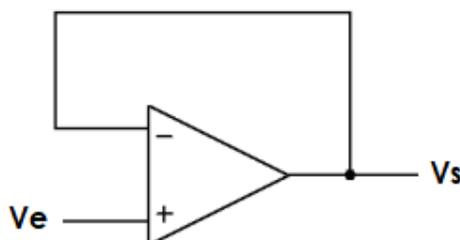
O eletrodo de trabalho (WE) fornece a corrente que entrará no circuito para ser amplificada e os eletrodos auxiliar (CE) e de referência (RE), recebem uma tensão fixa que tem seu valor definido pelo tipo de substância que será analisada.

3.2.2 Amplificador inversor e *buffer*

Os potenciostatos para fins analíticos geralmente utilizam circuito de amplificação com amplificadores operacionais na configuração de amplificador inversor. Um tipo de circuito muito utilizado para aplicações de amplificação de sinal, possui realimentação negativa e seu ganho é definido pela divisão do valor do resistor do ramo de alimentação pelo resistor conectado a entrada inversora, como o nome já pressupõe sua saída possui sinal negativo. É o mesmo circuito de realimentação negativa da Figura 7.

O *buffer*, foi a outra configuração utilizada, também chamado de seguidor unitário, é um circuito que tem em sua saída o mesmo valor da entrada sem inverter a polaridade e nem a fase, tem funções de isolar diferentes estágios, reforçar correntes e casar impedâncias, possui valor de ganho igual a 1.

Figura 12 - Circuito *buffer*



Fonte: Autoria própria.

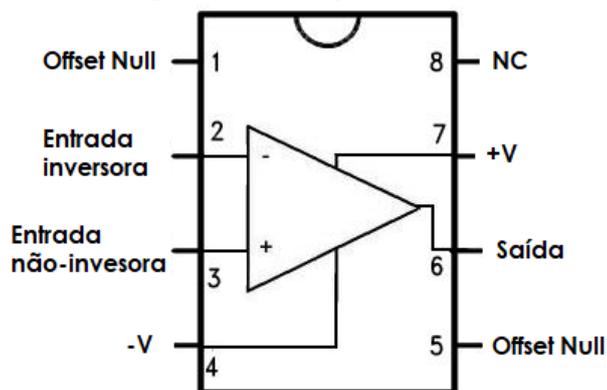
No circuito desenvolvido para amplificação do sinal do eletrodo impresso modificado utilizou-se o amplificador operacional LM741, este é um dos circuitos integrados (CI's) mais utilizados para circuitos de amplificação, é considerado um amp-op padrão e utilizado para como comparação para os demais. Tem como benefícios um baixo custo, simplicidade de utilização e uma boa confiabilidade. Por outro lado, necessita de uma fonte de tensão simétrica para alimentação, o que pode ser visto como uma desvantagem. O CI possui algumas características interessantes:

- Ganho interno elevado, aproximadamente 100000 (cem mil);
- Alta impedância de entrada, aproximadamente 2 M Ω ;

- Impedância de saída muito baixa, aproximadamente 75Ω .

Quando é utilizado nos modos de operação de malha fechada tem seu ganho definido pelo valor dos resistores empregados no circuito. Na Figura 13 é possível ver a pinagem do LM741.

Figura 13 - Pinagem LM741



Fonte: Adaptado de NETSONIC, 2021.

Os pinos 1 e 5 são chamados *offset null*, esses pinos são utilizados para compensar a tensão de erro interna do amplificador operacional, os pinos 2 e 3 são respectivamente entradas de sinal inversora e não-inversora, os pinos 4 e 5 são a alimentação do CI, sendo o pino 4 a tensão negativa e o pino 5 a tensão positiva simétrica à negativa, a saída de sinal amplificado é o pino 6 [6, 15].

3.2.3 Multisim

Para realizar a simulação dos circuitos de amplificação e geração de tensão simétrica foi utilizado o *software* Multisim versão 14.2 da *National Instruments*. Esse *software* utiliza um ambiente de simulação SPICE com padrão industrial e possibilita a simulação de circuitos elétricos de forma interativa, podendo analisar e visualizar o funcionamento de circuitos analógicos, digitais e de potência. A montagem dos circuitos dentro do programa é muito simples e intuitiva, as bibliotecas padrão possuem uma grande quantidade de componentes, ideais e comerciais.

O Multisim é muito utilizado em ambiente educacional e de pesquisa, uma vez que mitiga diversos riscos de um projeto, auxilia na compreensão de circuitos e na fixação de conteúdos teóricos, a utilização em ambiente profissional reduz custos de um projeto diminuindo a quantidade de erros em protótipos.

Na tela inicial do Multisim, os componentes são adicionados ao espaço de trabalho através da barra *place*, o circuito é simulado na mesma tela possibilitando obter dados em tempo real com as ferramentas de medição. Além disso, é possível exportar os circuitos e gráficos para outros formatos, também é possível gerar projetos para placa de circuito impresso [16].

3.2.4 Módulo NodeMCU-32S ESP32

O Módulo NodeMCU-32 ESP32 é uma plataforma de prototipagem que utiliza como microcontrolador o ESP32, fabricado pela empresa chinesa ESPRESSIF, possui Wi-Fi e Bluetooth integrados e por isso é muito utilizado em aplicações de internet das coisas, outra vantagem é o baixo custo e o baixíssimo consumo de energia do módulo. Com interfaces sem fio embutidas, o módulo permite desenvolver aplicações de acesso remoto, armazenamento em nuvens, banco de dados, monitoramento em tempo real, entre outros [17].

Figura 14 - Módulo NodeMCU-32S ESP32



Fonte: KOYANAGI, 2017.

A Figura 14 apresentado o módulo utilizado no projeto, existem diversos módulos de prototipagem de várias marcas diferentes, porém todos utilizam o chip da LX6 da Tensilica. O módulo NodeMCU-32S tem as seguintes características:

- Wi-Fi embutido: padrão 802.11 B/G/N;
- Modos de operação: *Client, Access Point, Station + Access Point*;
- Microprocessador *dual core* Tensilica Xtensa 32-bit LX6;

- *Clock* ajustável de 80 MHz a 240 MHz;
- SRAM de 512 Kb;
- ROM de 448 Kb;
- Flash: 4 Mb;
- Corrente de até 12 mA;
- GPIOs com função PWM, I2C e SPI;
- *Bluetooth* V4.2 BR, EDR e BLE (*Bluetooth Low Energy*) [18].

3.2.5 Arduino IDE

Para realizar a programação do módulo ESP32 utilizou-se o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino, chamado de Arduino IDE (*Integrated Development Environment Arduino*), um *software open-source* com facilidade de utilização, intercambialidade de dispositivos e variedade de bibliotecas externas que podem ser adicionadas, é utilizado para programação de dispositivos que são conectados no computador em uma porta USB e são reconhecidos como porta serial na IDE, a linguagem de programação utilizada geralmente é o C. Após conexão do dispositivo e reconhecimento pela IDE faz-se a compilação e transferência do programa a ser executado. Na IDE existem duas funções predefinidas *setup* e *loop*, a primeira é chamada uma única vez e é nela que o programador geralmente faz as configurações dos parâmetros do programa, já a função *loop*, como o próprio nome sugere, fica sendo chamada constantemente.

Como a IDE é utilizada para programação de dispositivos Arduino, foi necessário fazer a instalação de uma biblioteca de dispositivos para reconhecimento dos módulos ESP32 e dessa forma foi possível conectar e programar a NodeMCU-32S [18].

3.2.6 LabVIEW

O LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) é um software desenvolvido pela *National Instruments* muito utilizado em engenharia de sistemas, é uma ferramenta de instrumentação virtual criada especificamente para aplicações de teste, medição e controle de sistemas. Ele é muito utilizado em ambiente educacional por estudantes de engenharia e pesquisadores para desenvolver protótipos e projetos, na indústria também é muito utilizado em projetos no processo de produção, melhorando a qualidade dos produtos, o tempo de lançamento e melhorando os processos produtivos.

No LabVIEW utiliza-se a linguagem G (programação gráfica), todo desenvolvimento é feito por meio de blocos de programação que são interligados formando um diagrama de blocos funcional, o que torna a programação intuitiva, modular e de fácil entendimento, uma vez que é bem visual. A biblioteca do LabVIEW possui mais de 3000 funções e ferramentas.

Outra grande vantagem do LabVIEW é a conexão direta com equipamentos externos de *hardware*, podendo receber sinais externos em tempo real, de sensores, circuitos e outros dispositivos, permitindo a análise e processamento dos sinais de forma muito confiável. A estrutura do LabVIEW consiste basicamente em dois painéis, o painel frontal e o painel de diagrama de blocos, no painel frontal ocorre a interface com o usuário, contém botões, mostradores, réguas, *displays*, gráficos, entre outros, cada elemento adicionado nesse painel gera uma entrada ou uma saída no painel de blocos.

O painel diagrama de blocos é onde a lógica do programa é montada com utilização dos blocos de funções, nesse painel existe a paleta de controle e a paleta de funções. A primeira possui uma grande variedade de controles e indicadores separados em categorias para facilitar a busca, os tipos de dados mais utilizados são: dados numéricos, *strings* (conjunto de caracteres), booleanos (liga/desliga ou verdadeiro/falso) e *arrays* (matrizes e vetores). No painel de funções é onde estão localizados os blocos de programação, existe uma enorme quantidade de funções: funções matemáticas, funções booleanas, aquisição de dados, tratamento de dados e sinais, estruturas de repetição e mais uma infinidade delas que são utilizadas para desenvolver toda a lógica de programação. A utilização do LabVIEW no trabalho visa o tratamento dos sinais e a criação do *dashboard* para visualização [19, 20].

4. DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

O trabalho teve a intenção de desenvolver um potenciostato de baixo custo com transmissão de dados sem fio e uma interface gráfica de visualização para ser acoplado à um eletrodo impresso modificado desenvolvido pela aluna de pós-doutorado Maisa Azevedo Beluomini do curso de engenharia química do campus UNESP de Araraquara, como já mencionado foram utilizados diversos dispositivos de *hardware e software*, a seguir serão descritos todos procedimentos e etapas de desenvolvimento do dispositivo.

4.1 Circuito elétrico

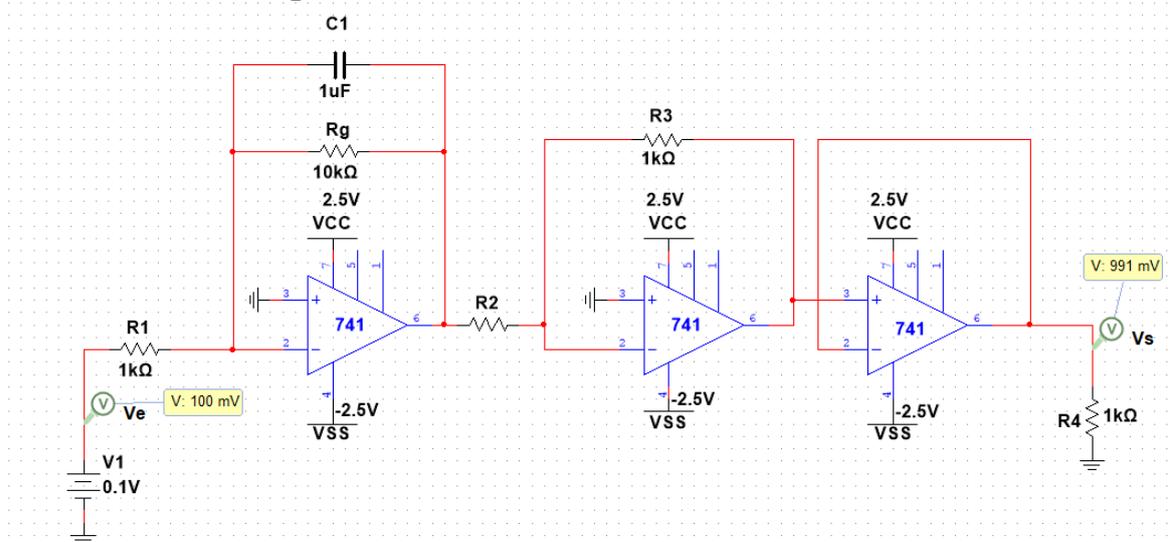
Como o eletrodo impresso modificado tem uma corrente de saída muito baixa no chamado eletrodo de trabalho (ET), na ordem de microampères (uA), fora necessário o desenvolvimento de um circuito para adequação desse sinal a um valor aceitável para leitura nas portas do microcontrolador. Escolheu-se montar um circuito composto por amplificadores operacionais, além de serem circuitos relativamente simples, são eficazes e de baixo custo.

4.1.1 Projeto do circuito elétrico

No desenvolvimento do projeto do circuito buscou-se por amplificadores operacionais e circuitos de amplificação na literatura a fim de nortear a uma escolha mais assertiva. O circuito integrado LM741 foi um dos primeiros a ser cogitado para o circuito, devido a sua fácil utilização e também a disponibilidade de mercado, porém o fato desse CI necessitar de uma fonte simétrica de alimentação fez com que outros circuitos fossem testados primeiramente.

Montou-se alguns circuitos no simulador Multisim utilizando outros amp-ops e notou-se que os mesmos não atendiam a necessidade do projeto, voltou-se então ao circuito amplificador com LM741. Afim de validar o funcionamento do circuito realizou-se algumas simulações, a Figura 15 mostra o circuito montado no simulador com valores simulados.

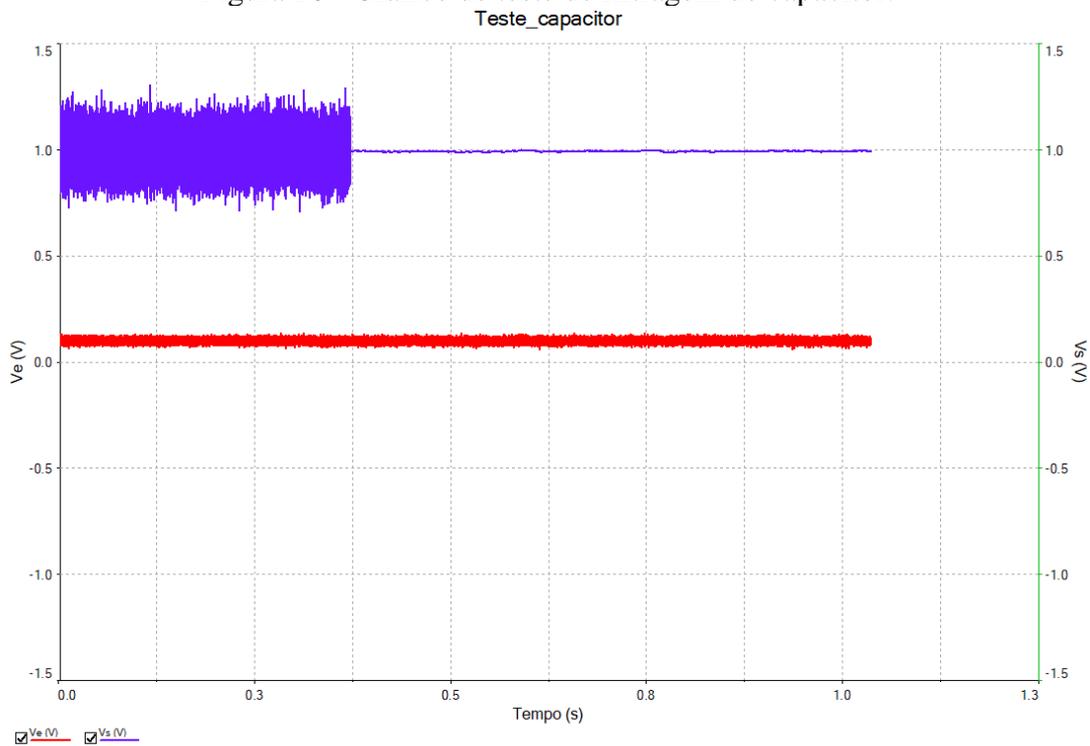
Figura 15 - Circuito elétrico montado no simulador.



Fonte: Autoria Própria.

A simulação mostrada acima apresenta um valor de entrada V_e de 100 mV a esquerda do circuito e valor de saída V_s de 991,0 mV mostrado a direita da simulação, o circuito possui ganho de valor 10 definido pela relação entre os resistores R_g e R_1 . Realizou-se a simulação de um sinal de entrada com ruído para analisar a eficiência do capacitor C_1 em paralelo com R_g na atenuação dos ruídos, o gráfico com a entrada e saída do sinal estão mostrados na Figura 16.

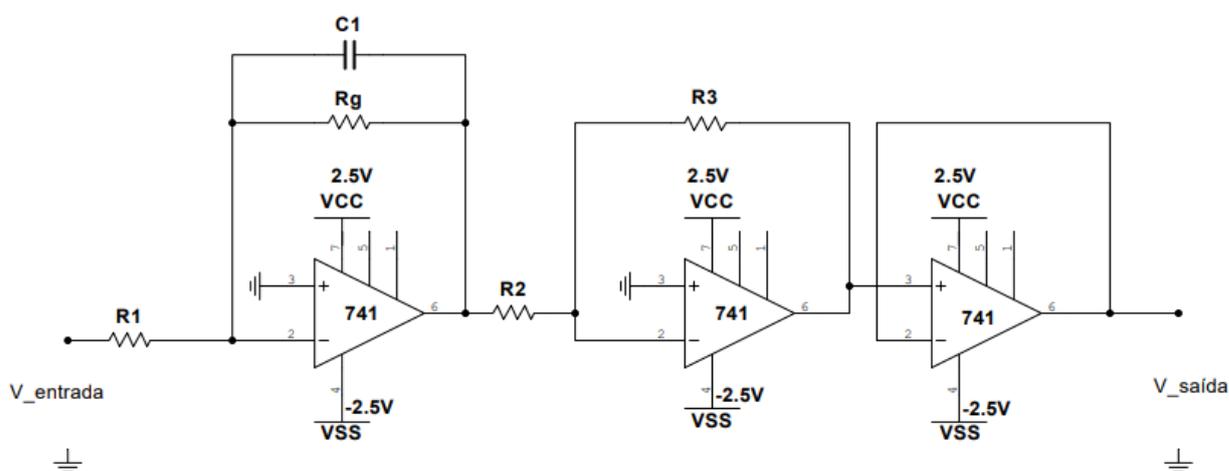
Figura 16 - Gráfico de teste de filtragem do capacitor.



Fonte: Autoria Própria.

Os testes foram realizados colocando uma chave do lado esquerdo do capacitor, e após algum tempo dava-se o comando para fechar a chave adicionando o capacitor ao circuito, a tensão de entrada V_e (V) está apresentada na cor vermelha já com ruído e a tensão de saída V_s (V) está mostrada na cor roxa. A chave foi acionada aproximadamente no tempo 0,4 segundo, antes desse tempo o ruído do sinal de entrada aparece amplificado e após o acionamento da chave e inclusão do capacitor no circuito nota-se uma atenuação no sinal e diminuição na amplitude do ruído, por fim chegou-se à configuração de circuito mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Circuito de amplificação montado no simulador.



Fonte: Autoria própria.

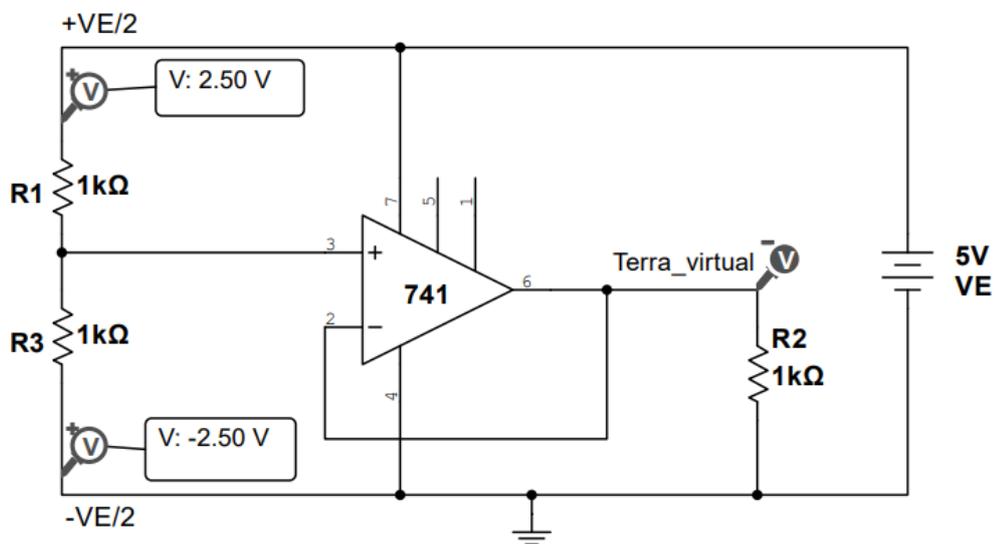
O circuito mostrado acima é composto por três amplificadores operacionais LM741 alimentados por tensão simétrica (+2,5 V e -2,5 V), o circuito completo pode ser dividido em três partes, a primeira consiste no circuito de amplificação e filtragem do sinal, composta pelos resistores R_1 e R_g e pelo capacitor C_1 , além do próprio CI LM741, tal parte possui um ganho definido pela relação entre os resistores R_g e R_1 ($G = R_g/R_1$) e está montada em malha fechada na configuração de amplificador inversor, ou seja, o sinal de saída dessa primeira parte é negativo, o capacitor funciona como um filtro passa baixa, atenuando possíveis ruídos provindos do eletrodo.

A segunda parte composta pelo segundo LM741 e pelos resistores R_2 e R_3 também está na configuração de amplificador inversor, porém se $R_2 = R_3$ o amplificador terá ganho unitário, funcionando apenas como inversor de sinal, o que faz com que sua saída seja positiva.

O terceiro LM741, mais à direita, compõe a terceira parte do circuito, composto por um *buffer* de sinal, ele funciona como um casador de impedâncias, ou seja, conecta um estágio de alta impedância de entrada a uma baixa impedância de saída.

Como o circuito montado necessitava de uma fonte simétrica para alimentação dos LM741 e para não limitar a portabilidade do dispositivo a ser desenvolvido, foi necessário a busca por um circuito capaz de obter tensão simétrica a partir de uma fonte de tensão simples. Iniciou-se então um estudo para encontrar soluções para esse problema e caso não fosse encontrada solução seria necessária a substituição do amplificador operacional por um que operasse com tensão simples e que estivesse disponibilidade de mercado. Encontrou-se então alguns circuitos que geravam uma tensão simétrica a partir de uma fonte de tensão simples, esses circuitos utilizam também um amplificador operacional que impõem um “terra virtual”, ou seja, um novo ponto de referência fazendo com que a tensão de saída seja dois valores iguais com metade da amplitude da tensão de entrada e sinais opostos, o circuito foi montado no simulador com um amp-op genérico e posteriormente com o LM741, vide Figura 18

Figura 18 - Circuito gerador de tensão simétrica.



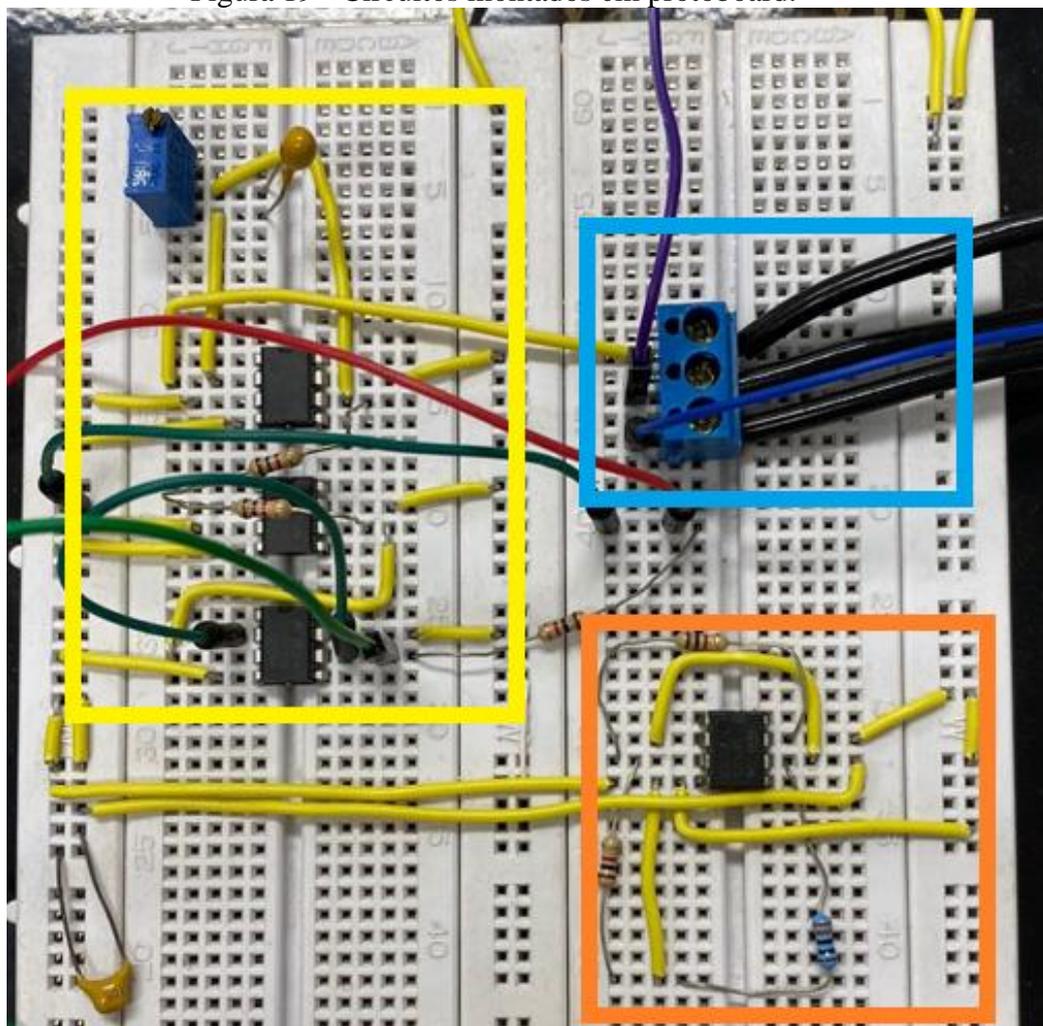
Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado no circuito acima, realizou-se uma simulação do circuito gerador de tensão simétrica utilizando tensão de entrada VE é igual a 5,0 V, o circuito então gera duas tensões de saída, referenciadas no pino 6 do amplificador operacional, que são as tensões $+VE/2$ e $-VE/2$ de valores +2,5 V e -2,5 V respectivamente, após a simulações utilizou-se o circuito acima para alimentar os amp-ops do circuito de amplificação.

4.1.2 Montagem do circuito na *protoboard*

Após finalizadas as simulações, partiu-se para montagem do circuito em *protoboard* a fim de validar o circuito em laboratório. Montou-se primeiramente o circuito de amplificação e posteriormente o circuito gerador de tensão simétrica, foram realizados testes com tensões de entradas conhecidas para analisar a coerência do valor de saída, comparando sempre com os resultados obtidos na simulação, além disso, no local do resistor R_g foi colocado um potenciômetro multi-voltas para que o ganho pudesse ser ajustado a um valor desejado, posteriormente os dois circuitos forma conectados e testados em conjunto, como circuito de tensão simétrica alimentando os CI's LM741 do circuito de amplificação, vide Figura 19.

Figura 19 - Circuitos montados em protoboard.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 19 acima está apresentado o circuito montado em *proto-board*, o destaque do lado inferior direito (cor laranja) é para o circuito gerador de tensão simétrica, composto por apenas um amplificador operacional e alguns resistores, já no lado esquerdo superior (cor amarela) está localizado o circuito de amplificação, composto por três CI's LM741, um capacitor, um potenciômetro multi-voltas de cor azul e alguns resistores, logo ao lado está o conector de entrada (destaque na cor azul) para o eletrodo impresso modificado, ou seja, a entrada de sinal do circuito. Após finalização desta etapa iniciou-se então a integração do circuito com o módulo NodeMCU-32S ESP32.

4.2 Integração circuito elétrico e módulo ESP32

Para realizar a leitura do sinal provindo do circuito elétrico conectou-se a saída do circuito elétrico em uma das portas analógicas do módulo ESP32 (GPIO 36), a programação foi toda desenvolvida na Arduino IDE. Primeiramente instalou-se uma biblioteca de dispositivos da Espressif na IDE a fim de que fosse possível estabelecer a conexão e instalação do programa no módulo através da porta USB reconhecida como serial. O código foi desenvolvido com intuito de ler os valores recebidos na porta 36 e enviar esses dados através de uma comunicação sem fio para serem lidos em outro dispositivo. Como o módulo ESP32 possui o módulo Wi-Fi embutido, escolheu-se a transmissão via Wi-Fi utilizando o protocolo de comunicação TCP/IP.

Figura 20 - Código desenvolvido para transmissão de dados sem fio.

```

1 #include <WiFiServer.h> //inclui biblioteca
2 #include <WiFi.h> //inclui biblioteca
3
4
5 int valor_porta = 36; //Declara porta 36 como variável
6 int dado; //Declara variável dado
7
8 WiFiServer sv(555); //Cria o objeto servidor na porta 555
9 WiFiClient cl; //Cria o objeto cliente.
10 void setup()
11 {
12     pinMode(valor_porta, INPUT); //Configura pino 36 como entrada
13     Serial.begin(115200); //Habilita a comm serial.
14     WiFi.mode(WIFI_AP); //Define o WiFi como Access_Point.
15     WiFi.softAP("ESP32-lucas", ""); //Cria a rede com nome escolhido Access_Point.
16     sv.begin(); //Inicia o servidor TCP na porta declarada no começo.
17 }
18 void loop()
19 {
20     tcp(); //Função leitura e envio de pacotes TCP.
21 }
22 void tcp()
23 {
24     if (cl.connected())//Detecta se há clientes conectados no servidor.
25     {
26
27         dado = analogRead (valor_porta); //Armazena valor da porta 363 na variavel dado
28         cl.print(dado); //Envia dado para cliente
29         delay(125);
30
31     }
32     else//Se nao houver cliente conectado,
33     {
34         cl = sv.available();//Disponibiliza o servidor para o cliente se conectar.
35         delay(1);
36     }
37 }

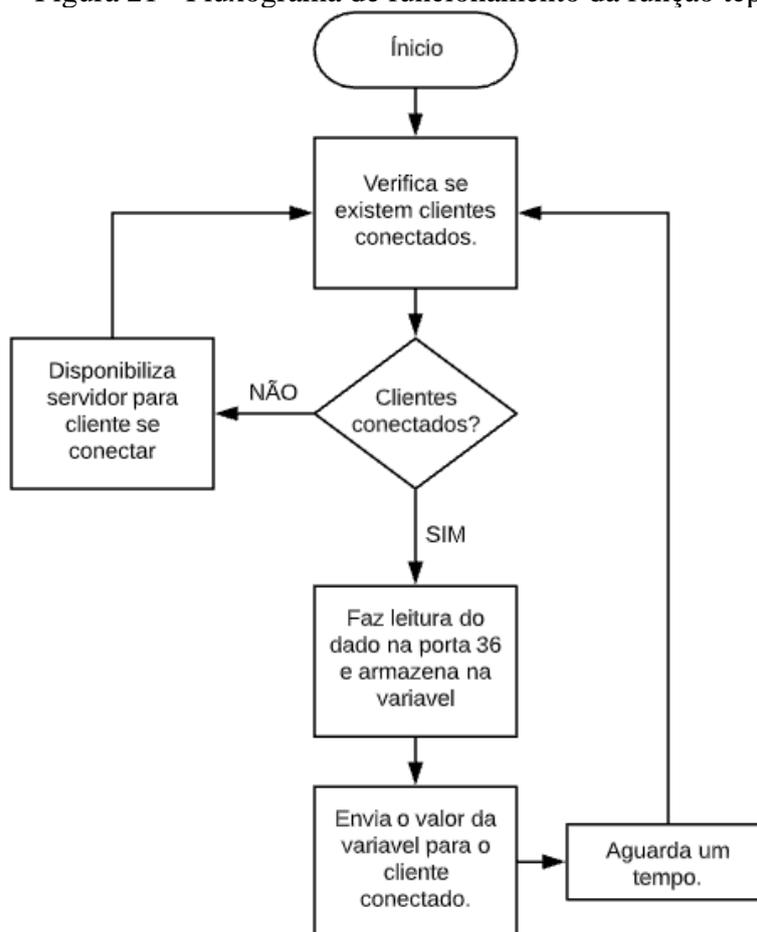
```

Fonte: Autoria própria.

O código inicia-se com a inclusão de bibliotecas e variáveis que foram utilizadas, cria-se também um objeto servidor na porta 555 e o objeto cliente, dentro da função *setup* o pino 36 é configurado como entrada, define-se então que o Wi-Fi no ESP32 funcionará no modo *Access Point* (Ponto de Acesso), ou seja, o cliente vai se conectar à rede Wi-Fi do servidor para receber os dados, cria-se a rede e inicia-se o servidor TCP na porta 555.

Dentro da função *loop* chama-se a função denominada *tcp*, essa função é responsável por ver se existem clientes conectados e em caso afirmativo faz a leitura e armazena o dado do pino 36, logo em seguida envia esse dado para o cliente conectado, após isso conta-se um pequeno tempo com o auxílio da função *delay* e repete-se o mesmo procedimento, enquanto o cliente estiver conectado no servidor o dado armazenado será enviado a cada intervalo de tempo definido no programa, até que o cliente se desconecte. Foi desenvolvido um fluxograma que elucida o funcionamento da função *tcp*, Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma de funcionamento da função tcp.



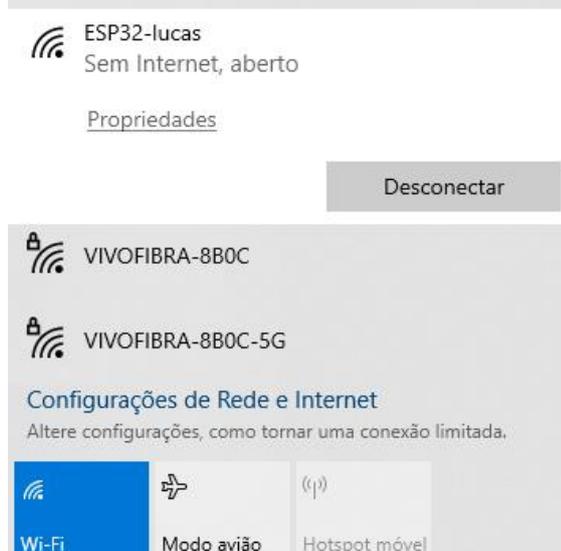
Fonte: Autoria Própria.

Nesse caso o cliente foi um computador conectado à rede criada pelo servidor (ESP32), neste computador os dados eram recebidos dentro do *software* LabVIEW.

4.3 Conexão do módulo ESP32 com LabVIEW

A criação do cliente da comunicação se deu dentro do *software* LabVIEW em um computador, primeiramente foi necessário verificar se o ESP32 estava funcionando como *Access_point* e se a rede criada estava disponível, testou-se então com o código rodando abriu-se o gerenciador de rede Wi-Fi do computador e conectou-se rede ESP32-lucas, Figura 22.

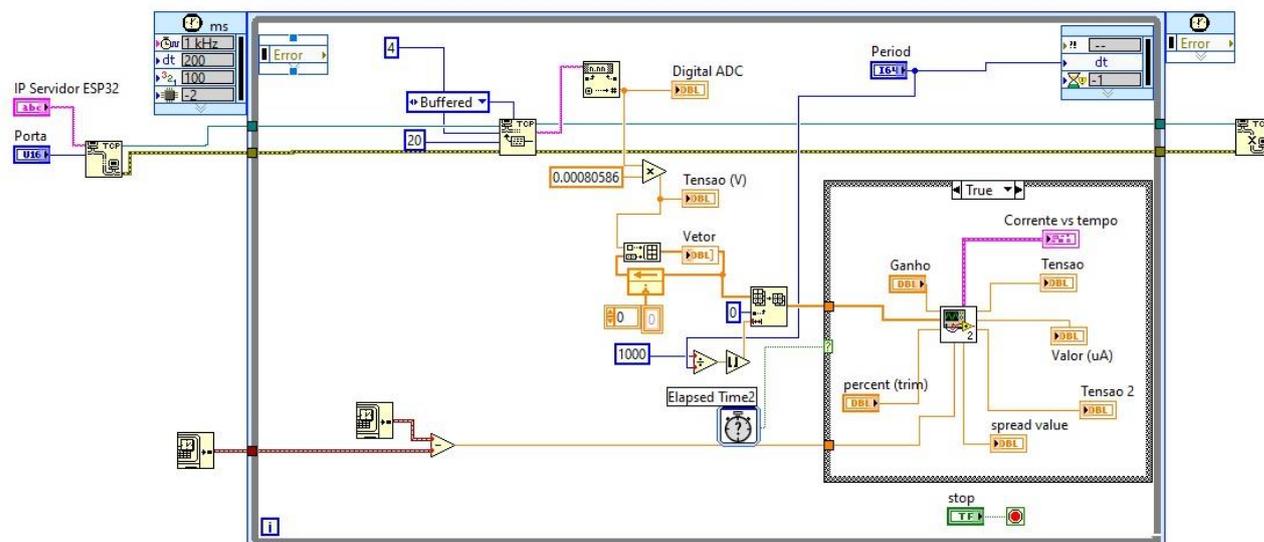
Figura 22 - Conexão com a rede Wi-Fi criada.



Fonte: Autoria própria.

Como a rede criada é um local, não possui acesso à internet, finalizando o teste de conexão partiu-se para o desenvolvimento da programação dentro do LabVIEW para configurar o recebimento de dados e posteriormente apresentação gráfica na interface. O código desenvolvido em diagrama de blocos está apresentado na Figura 23, escolheu-se utilizar o LabVIEW devido a diversidade de funções em sua biblioteca, inclusive referente a TCP/IP e a possibilidade de desenvolvimento de interface gráfica para o usuário, primeiramente será explicado o código e posteriormente a interface de visualização.

Figura 23 - Código desenvolvido em diagrama de blocos.

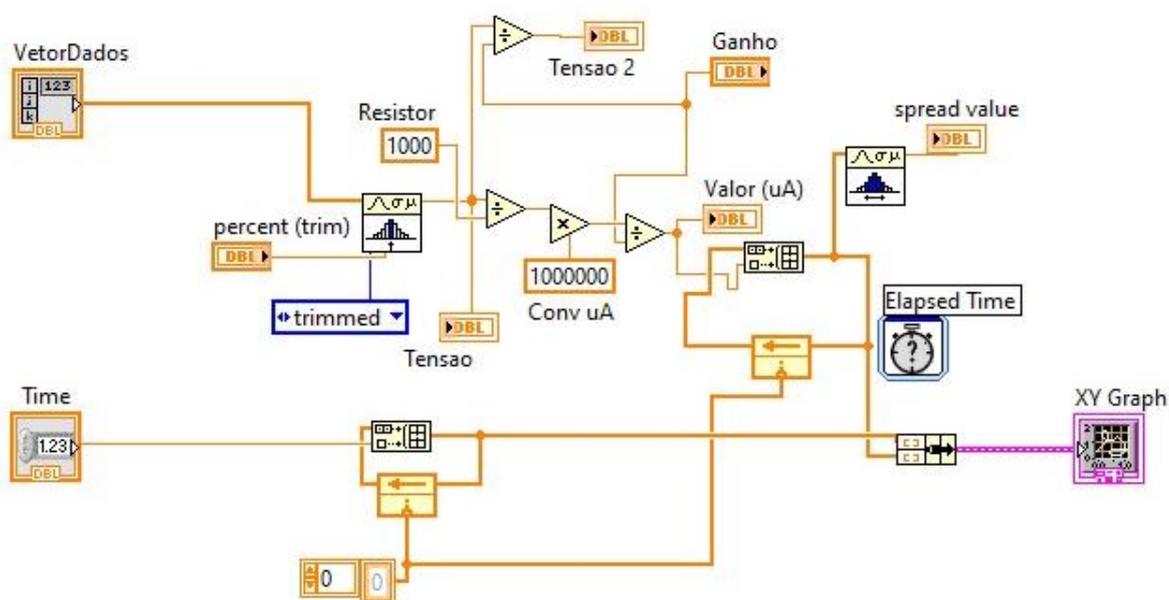


Fonte: Autoria própria.

O diagrama de blocos acima inicia-se à esquerda, onde está localizado o bloco *tcp open connection*, como o próprio nome sugere esse bloco é o que dá início a uma conexão TCP, suas entradas são o IP do servidor (ESP32) e a porta onde foi criado o objeto servidor (porta 555) conforme mostrado no tópico anterior, então utiliza-se o bloco *tcp read*, o qual cria o cliente para receber os dados provindos do servidor, configurando a quantidade de bytes a serem lidos e o tempo de leitura, os dados lidos formam uma *string* que é convertida em um valor numérico. Como o valor enviado pelo ESP32 tem formato digital foi necessário utilizar o fator de conversão para saber o valor do dado recebido em volts, o ESP32 tem resolução 12 bits, possuindo uma faixa de leitura digital de 0 à 4095 e faixa de tensão de 0 à 3,3 volts, então cada incremento digital equivale à 805,86 uV (microvolts).

Após realizar conversão dos dados em valor de tensão, esses são armazenados em um vetor que é utilizado como entrada em um subVI, Figura 24, tal vetor é resetado a cada intervalo de tempo para receber novos dados.

Figura 24 - SubVI desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

O subVi foi gerado para facilitar a organização do diagrama de blocos, o vetor de dados recebido passa por um bloco que faz a média dos valores, esse bloco tem como entrada

um valor percentual de trim, que tem como objetivo cortar os valores que sejam muito fora do valor médio. O valor de tensão médio é convertido em um valor de corrente em microampere, os valores de corrente são armazenados em um outro vetor por um determinado tempo e posteriormente enviados para um gráfico juntamente com um vetor de tempo, plotando um gráfico de corrente (uA) *versus* tempo. A interface gráfica desenvolvida está apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Interface gráfica desenvolvida no LabVIEW.

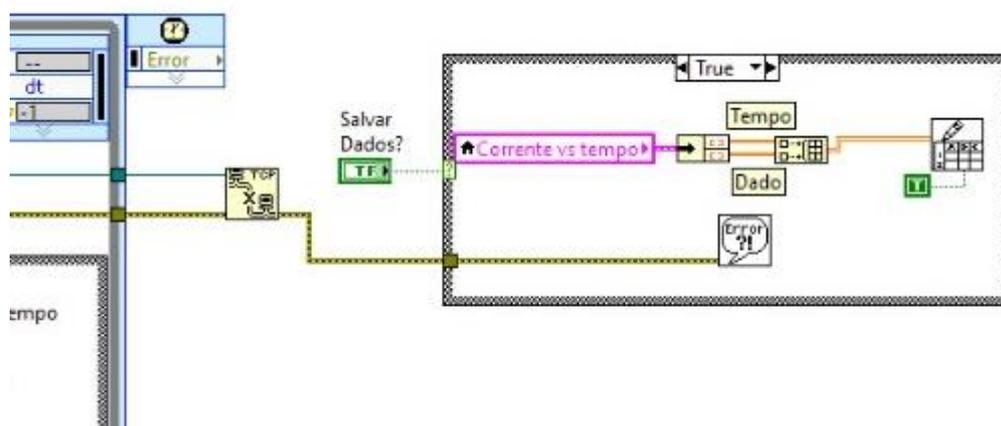


Fonte: Autoria própria.

A interface foi desenvolvida para facilitar a visualização dos dados em tempo real, tanto de forma numérica quanto gráfica, no canto superior esquerdo as entradas de número de IP e a porta para configurar a comunicação, logo abaixo foram colocadas as entradas de ganho e o valor percentual de trim, mais ao centro a entrada para definição de períodos e os mostrados do valor digital proveniente do ADC e abaixo o valor já convertido em tensão, mais a direita estão alguns mostradores para apenas para acompanhamento do funcionamento do subVI, implementou-se também dois botões, primeiramente o botão de STOP que tem a função de fazer a parada do programa, e o botão para salvar os dados que será explicado abaixo. Um mostrador dos elementos do vetor de dados também foi implementado por motivo de conferência de dados e funcionamento do programa, e mais

abaixo o gráfico de corrente (uA) *versus* tempo (s). A vantagem dessa interface é a facilidade de mudança na posição de cada elemento presente, as posições de todos os itens podem ser alteradas clicando e arrastando. A Figura 26 apresenta a rotina para salvamento de dados implementada.

Figura 26 - Parte do diagrama de blocos para salvar dados.



Fonte: Autoria própria.

Por último fora implementado mais uma parte do diagrama de blocos para salvamento de dados. Quando o usuário clica no botão salvar dados, o programa armazena os dados de corrente e tempo que estão plotados no gráfico e converte esses em um arquivo para posterior utilização.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente montou-se um circuito que não apresentava os resultados esperados, revisou-se o circuito diversas vezes e não obteve-se êxito, partiu-se então para um novo circuito que também apresentou diversos erros, após diversos testes, mudanças e um estudo mais aprofundado sobre amplificadores operacionais, chegou-se ao funcionamento desejado para o circuito.

Um fator importante que deve ser levado em conta no desenvolvimento de circuitos de amplificação é a tensão de erro presente nos amplificadores operacionais, também chamada de tensão de erro. Para grandes sinais muitas vezes esse erro pode ser desconsiderado, porém quando se trabalha com pequenos sinais, que é o caso deste trabalho, deve-se prestar atenção na influência que tal erro pode causar no sinal de saída, pode-se corrigir essa tensão de duas formas, via *hardware* colocando um potenciômetro de balanceamento ou via *software* implementando-se uma função matemática no código desenvolvido.

Outra dificuldade enfrentada foi no entendimento da resposta elétrica do eletrodo impresso, uma vez que há uma grande variabilidade no sinal de saída. Entendeu-se então que o modo em que a solução, contendo o analito de interesse, é gotejada na superfície do eletrodo tem grande influência no sinal de corrente. Nos primeiros testes o eletrodo era reutilizado após uma lavagem com água destilada, porém notava-se que não havia mais um padrão de saída após a lavagem, passou-se então a utilizar um eletrodo para um único teste, mesmo assim alguns testes tiveram que ser desconsiderados por resultarem em valores dispersos. A posição do gotejamento, bem como movimentos bruscos no eletrodo durante os testes são fatores que podem influenciar nos resultados.

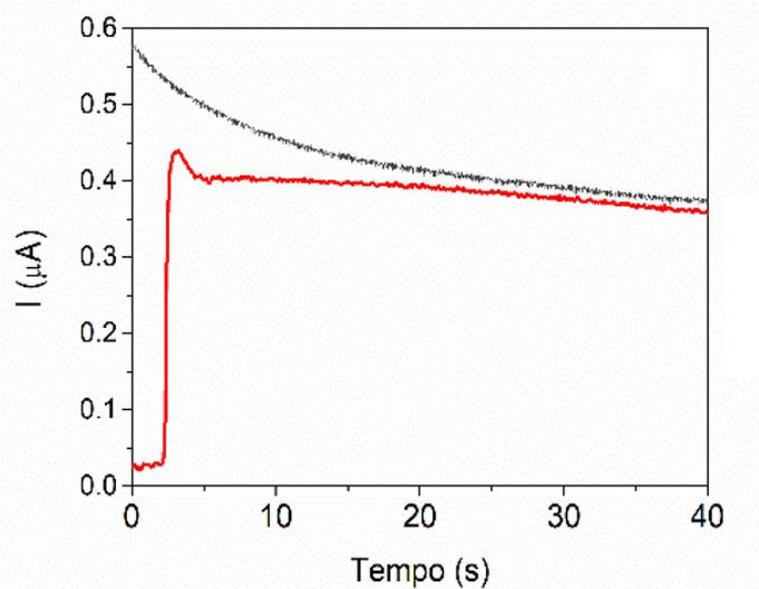
Em conjunto com a UNESP de Araraquara montou-se um protocolo a seguir para validação do potenciostato desenvolvido, comparando os resultados com os dados de um dispositivo comercial, os resultados serão apresentados na próxima seção.

5.1 Validação do dispositivo

Tendo finalizado todas as integrações necessárias e as validações em todas as partes separadamente, montou-se a arquitetura do dispositivo e iniciaram-se os testes de validação do mesmo, para realizar os testes utilizou-se a corrente gerada por 50 μL da solução de diferentes concentrações da sonda redox ferricianeto/ferrocianeto (1,0 – 5,0 mM) gotejada na superfície do eletrodo impresso. Os mesmos testes também foram realizados em um

potenciostato comercial Autolab PGSTAT30 juntamente com a equipe da UNESP de Araraquara. Repetiu-se o experimento ao menos 4 vezes para cada concentração, a fim de comparar e validar os dados do dispositivo comercial com o dispositivo desenvolvido propôs-se que fossem utilizadas cinco diferentes concentrações, 1,0 mM; 2,0 mM; 3,0 mM; 4,0 mM e 5,0 mM; a fim de testar se a resposta do dispositivo apresentava proporcionalidade entre a concentração do analito e a corrente drenada pelo eletrodo. As curvas dos dois dispositivos foram traçadas no mesmo gráfico para efeito de comparação. O gráfico para concentração de 1,0 mM está apresentando na Figura 27.

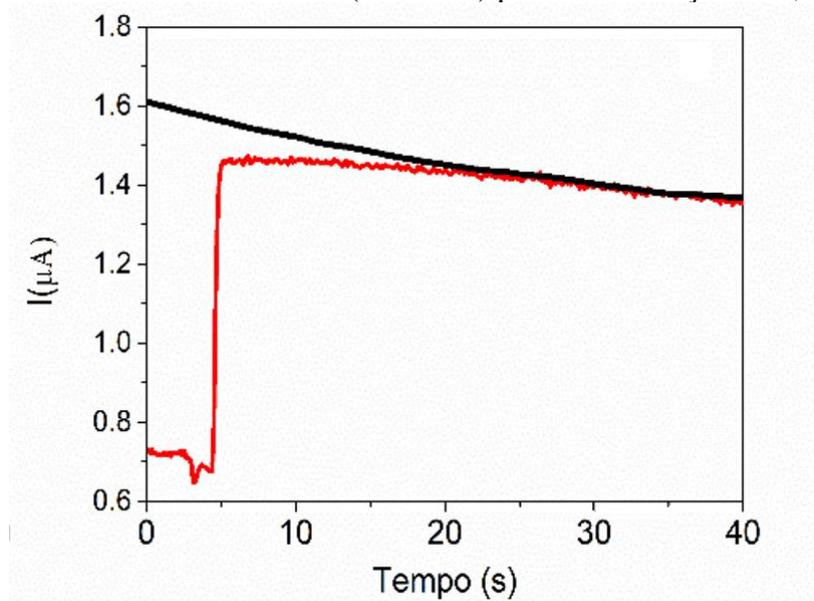
Figura 27 - Curvas de corrente (μA) *versus* tempo (s) obtidas pelo potenciostato comercial (preta) e potenciostato desenvolvido (vermelha) para concentração de 1,0 mM.



Fonte: Autoria própria.

Analisando as curvas acima nota-se um comportamento diferente no intervalo de tempo entre 0 e 20 segundos, a diferença também está no modo de aplicação da tensão nos eletrodos pelo dispositivo, o potenciostato comercial aplica a tensão nos eletrodos de forma gradual até a chegada ao valor desejado e coleta os dados desde o início da aplicação, já o potenciostato desenvolvido aplica a tensão como um degrau, por esse motivo é possível notar um pico de corrente, porém tem-se interesse nos dados após a estabilização. Plotou-se também o gráfico de comparação para a concentração de 5,0 mM mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Curvas de corrente (μA) versus tempo (s) obtidas pelo potenciostato comercial (preta) e potenciostato desenvolvido (vermelha) para concentração de 5,0 mM.



Fonte: Autoria própria.

No caso das curvas acima nota-se que após 20 segundos os valores tendem a ficar muito próximos e estáveis. Como citado anteriormente os valores de interesse para a análise são obtidos após a estabilização, dessa forma considerou-se apenas os dados a partir de 20 segundos, coletou-se os dados para as 5 diferentes concentrações e montou-se uma tabela considerando o valor de corrente no tempo de 20 segundos ($t = 20$ s), os valores médios obtidos de ambos os dispositivos, bem como os valores de desvio padrão para cada concentração estão mostrados de forma detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre os valores médio de corrente obtidos no dispositivo desenvolvido e comercial.

	Corrente de pico (μA)	Concentração				
		1,0 mM	2,0 mM	3,0 mM	4,0 mM	5,0 mM
Potenciostato comercial	Valor médio da corrente	0,39366	0,58560	0,9390	1,06386	1,43523
Potenciostato desenvolvido	Valor médio da corrente	0,40997	0,59147	0,9640	1,07529	1,45320
Desvio padrão		0,01153	0,00415	0,01698	0,00808	0,01271
Distinção (%)		3,9780	0,9924	2,555	1,0740	1,2520

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 1 acima pode-se notar que as correntes de ambos dispositivos, 20 segundos após o gotejamento, possuem um valor próximo, comparando de forma percentual relativo tem-se como maior distinção um valor menor do que 4% para a concentração de 1,0 mM, o que revela precisão nas medidas do dispositivo desenvolvido, o valor de interesse das medidas se dá após a estabilidade, ou seja, os valores iniciais são muito variáveis e para tal estudo não são interessantes, por esse motivo desconsidera-se os valores anteriores à estabilidade.

Tendo em vista as curvas acima apresentadas juntamente com a tabela de comparações, comprova-se a funcionalidade do dispositivo desenvolvido, que consegue ser uma solução de baixo custo, além de possuir comunicação sem fio. A curva para menor concentração apresenta a maior diferença de valores entre as demais, tal erro pode ser explicado devido ao valor mais baixo de corrente, onde os ruídos podem ter uma maior parcela de interferência nos dados.

Outro fator que contribui para a divergência de dados é o comportamento do eletrodo impresso, uma vez que durante o gotejamento da solução em sua superfície podem ocorrer diferenças na leitura devido a sensibilidade do mesmo, notou-se que a posição do gotejamento, o não preenchimento de toda superfície com a solução, movimentos no eletrodo durante o gotejamento ou durante a medição também pode interferir no valor da corrente drenada. Outro ponto de atenção é que todo ruído que acontece antes do circuito de amplificação será amplificado ao passar por ele.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os protocolos de validação e o resultados obtidos, nota-se que o potenciostato desenvolvido é uma solução eficaz para o problema proposto, mostrando-se uma solução de baixo custo quando comparado ao custo dos dispositivos comerciais de *hardware e software* utilizados para mesma aplicação, além de possuir a capacidade de transmissão de dados sem fio, que abre um leque de possibilidades de aplicações, tais como envio de dados pela internet, integrar um interface *web* para visualização de dados, armazenamento em banco de dados, configurações e análises remotas, entre outras.

A interface de visualização desenvolvida supre a necessidade do acompanhamento de dos dados em tempo real para análises em campo e pode ter seu *layout* facilmente modificado, além da possibilidade do salvamento de dados para análises e relatórios posteriores. Como a maioria dos componentes de *hardware e software* utilizados são bastante conhecidos e já utilizados por desenvolvedores, pode-se facilmente adaptar o dispositivo para outras aplicações semelhantes, dessa forma o trabalho também contribui para o avanço nas pesquisas relacionadas à eletroanalítica, uma vez que descreve a montagem do circuito de forma detalhada, informações importantes que não foram encontradas na literatura. Também demonstra a possibilidade de solução para o problema da fonte de tensão simétrica.

Considerando os equipamentos utilizados, componentes do circuito elétrico, módulo ESP32 e a possibilidade de gerar um arquivo executável a partir da programação desenvolvida no LabVIEW, a solução atende ao objetivo inicial de ser uma alternativa de baixo custo de desenvolvimento.

Como oportunidade para trabalhos futuros, pode-se avançar no circuito elétrico desenvolvendo uma placa de circuito impresso e um invólucro onde o eletrodo impresso pudesse ser facilmente conectado, facilitando as análises em campo e diminuindo os erros na coleta de dados.

Na possibilidade de conexão com a internet pode-se desenvolver a conexão com um *dashboard* de visualização *web*, não necessitando do LabVIEW e permitindo acesso de qualquer lugar e por mais de um dispositivo, conexão com banco de dados, armazenamento em nuvem, configuração das análises remotamente, avançando na característica de independência e portabilidade do dispositivo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CANTASINI, A. B. **Desenvolvimento de um minipotenciostato para análises voltamétricas e amperométricas**. 2019. 56 f. Tese (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde – GO, 2019. Disponível em: <https://sistemas.ifgoiano.edu.br/sgcursos/uploads/anexos_14/2021-08-19-03-19-50Disserta%C3%A7%C3%A3o_Allan%20Barros%20Cantasini_reposit%C3%B3rio.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

[2] FARIA, G. B.; SALLES, M. O.; MICHEL, R. C. Construção de um potenciostato portátil de baixo custo. **Journal of Chemical Education**. v. 95, n. 9., p. 1658 – 1661, jul. 2018. Disponível em: <<https://sbqrj.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Resumo-SBQ-1.pdf>>. Acesso em 22 jun. 2021.

[3] SANTOS, V. B. **Desenvolvimento de um potenciostato/galvanostato portátil e eletrodos impressos para determinações in situ em análises em fluxo com transmissão de dados em tempo real**. 2013. 216 f. Tese (Doutorado em Ciências: Química Analítica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/6273/5296.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 26 jun. 2021.

[4] LOWINSOHN, D.; BERTOTTI, M. SENSORES ELETROQUÍMICOS: CONSIDERAÇÕES SOBRE MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES NO MONITORAMENTO DE ESPÉCIES QUÍMICAS EM AMBIENTES MICROSCÓPICOS. **Química Nova**. v. 29, n. 6, p. 1318 – 1325, ago. 2006. Disponível em: <scielo.br/j/qn/a/svKFgdMsc9LsHqXjn3BrfZn/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em 26 jun. 2021.

[5] SQUISSATO, A. L. **Eletrodos impressos descartáveis: aplicações em amostras ambientais alimentícias e combustíveis**. 2019. 183 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26291/1/EletrodosImpressosDescart%C3%A1veis.pdf>>. Acesso em 02 jul. 2021.

[6] WENDLING, M. **Amplificadores Operacionais**. 2010. V. 2. Colégio técnico industrial de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>. Acesso em 15 jul. 2021.

[7] MATTEDE, H. **O que são amplificadores operacionais?**. Mundo da Elétrica. 2021. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-amplificadores-operacionais/>>. Acesso em 15 jul. 2021.

[8] ZUCATO, F. L. **Rede ZigBee Gerenciada por Sistema de Monitoramento Remoto Utilizando TCP/IP e GPRS**. 2009. 138 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18155/tde-03022010-095135/publico/Fabio.pdf>>. Acesso em 2 ago. 2021.

[9] SOARES, I. A. **Sistema de Monitoramento Remoto de Grandezas Elétricas Baseado em Microcontrolador Utilizando Protocolo TCP/IP**. 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <[http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/19040/1/INAI% c3% 8a% 20ALV ES% 20SOARES% 20-% 20TCC% 20ENG.% 20EL% c3% 89TRICA% 202019.pdf](http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/19040/1/INAI%c3%8a%20ALVES%20SOARES%20-%20TCC%20ENG.%20EL%c3%89TRICA%202019.pdf)>. Acesso em 2 . 2021.

[10] TORRES, G. **Como o protocolo TCP/IP funciona**. Clube do Hardware. 2007. Disponível em: < <https://www.clubedohardware.com.br/artigos/redes/como-o-protocolo-tcp-ip-funciona-parte-1-r34823/?nbcpage=4>>. Acesso em 10 ago. 2021.

[11] Escola superior de redes. **Arquitetura TCP/IP: conceitos básicos**. Escola superior de redes. 2020. Disponível em: <<https://esr.rnp.br/administracao-e-projeto-de-redes/arquitetura-tcp/ip-conceitos-basicos/>>. Acesso em 10 ago. 2021.

[12] RASMUSSEN, B. **O que é o protocolo TCP/IP?**. Canal Tech. 2020. Disponível em: < <https://canaltech.com.br/produtos/o-que-e-o-protocolo-tcpip/>>. Acesso em 10 ago. 2021.

[13] FISHER, S. **O que é um TCP/IP e como ele funciona?**. Avast Academy. 2021. Disponível em: <<https://www.avast.com/pt-br/c-what-is-tcp-ip#gref>>. Acesso em 12 ago. 2021.

[14] BELUOMINI, M. A.; STRADIOTTO, N. R.; BOLDRINI, M. V. Synthesis of three-dimensional nanoporous nickel based on dynamic hydrogen bubble template used for electrochemical detection of narirutin in citrus wastewater. **Food Chemistry**, v. 353, n. 129427, ago. 2021.

[15] REIS, F. **O amplificador operacional LM741 – Características e aplicações**. Boson Treinamentos. 2019. Disponível em: <www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/o-amplificador-operacional-lm741-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em 12 ago. 2021.

[16] NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é Multisim?**. NI. 2021. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>>. Acesso em 21 ago. 2021.

[17] MIRANDA, L. A. V. **Monitoramento de parâmetros ambientes de um leito hospitalar utilizando um ESP32**. 2019. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus – AM, 2019. Disponível em: <<http://repositorioinstitucional.uea.edu.br/bitstream/riuea/3468/1/Monitoramento%20de%20par%20c3%a2metros%20ambientais%20de%20um%20leito%20hospitalar%20utilizando%20ESP32.pdf>>. Acesso em 02 set. 2021.

[18] KOYANAGI, F. **Introdução ao ESP32**. Fernando K Tecnologia. 2017. Disponível em: <<https://www.fernandok.com/2017/11/introducao-ao-esp32.html>>. Acesso em 8 set. 2021.

[19] FONTES, A. **Veja como o LabVIEW atua no processamento de dados captados por sensores**. Voitto. 2018. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/labview>>. Acesso em 10 out. 2021.

[20] VASCONCELLOS, B. S.; JÚNIOR, A. G. C. Projeto de um gerador de sinais, utilizando o conceito de instrumentação virtual, baseado em LabVIEW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 43., 2015, São Bernardo do Campo. **Artigo**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ademar-Goncalves-Costa-Junior/publication/307593676_Projeto_de_um_Gerador_de_Sinais_Utilizando_o_Conceito_de_Instrumentacao_Virtual_Baseado_em_LabVIEW/links/57cb180e08ae598251835851/Projeto-de-um-Gerador-de-Sinais-Utilizando-o-Conceito-de-Instrumentacao-Virtual-Baseado-em-LabVIEW.pdf>. Acesso em 20 out. 2021.

[21] METROHM. **Módulos Metrohm Autolab: Crie sua própria estação de trabalho personalizada**. Metrohm. 2021. Disponível em: <<https://www.metrohm.com/pt-br/produtos-geral/eletroquimica/autolab-m%C3%B3dulos/>>. Acesso em 20 out. 2021.

[22] PAULA, L. F. **Desenvolvimento de tintas condutivas e sua aplicação em eletrodos impressos**. 2013. 178 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2013. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/72503126-Universidade-federal-de-uberlandia-instituto-de->

quimica-programa-de-pos-graduacao-em-quimica-desenvolvimento-de-tintas-condutivas-e-sua-aplicacao.html>. Acesso em 06 set. 2021.

[23] NETSONIC. **LM741 Operational Amplifier op-Amp Datasheet and Pinout.** Netsonic. Disponível em: < <https://netsonic.fi/en/lm741-op-amp-datasheet-and-pinout/>>. Acesso em 26 ago. 2021.