

**AUGUSTO PEREZ DE ANDRADE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE  
DADOS UTILIZANDO UMA PLACA ARDUINO UNO  
ATMEGA328P PARA APLICAÇÃO EM POTENCIOSTATOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2021**

**AUGUSTO PEREZ DE ANDRADE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE  
DADOS UTILIZANDO UMA PLACA ARDUINO UNO  
ATMEGA328P PARA APLICAÇÃO EM POTENCIOSTATOS**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de BACHAREL em ENGENHARIA MECATRÔNICA.

Orientadora: Profa. Dr.-Ing. Vera Lúcia Donizeti de Sousa Franco

**UBERLÂNDIA - MG**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à minha mãe Dulcinéa de Lourdes Duarte Perez e ao meu pai Renato Lima de Andrade pelos cuidados, ensinamentos e por permitirem que eu tivesse acesso a todas as oportunidades que tive até hoje, tanto na vida pessoal, quanto na profissional.

À minha família, especialmente irmãos, primos, avós e tios que me apoiam nas realizações dos meus sonhos quando nos encontramos em momentos mais do que especiais.

Aos meus amigos, especialmente aqueles da faculdade que também passaram pelas longas semanas de provas e encontros casuais inesquecíveis.

Aos meus colegas de laboratório, que me ajudaram a desenvolver projetos e aprender conceitos que jamais viria em sala de aula.

Aos meus professores, especialmente aqueles que tiveram atenção em sua didática, o que me inspirou a seguir uma carreira acadêmica de pós-graduação.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) por providenciar um serviço público de qualidade para que eu me tornasse um Engenheiro Mecatrônico.

ANDRADE, A. P. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados utilizando uma placa Arduino UNO ATmega328P para aplicação em potenciostatos.** 2021. XX p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

## RESUMO

Este documento descreve desenvolvimento de um Projeto de Fim de Curso referente a um sistema eletrônico de aquisição de dados para aplicação em potenciostatos, equipamentos responsáveis por controlar reações eletroquímicas em eletrodos. Esta aquisição foi realizada por meio de um Arduino UNO ATmega328P, uma placa contendo um microcontrolador cuja popularidade cresceu nos últimos anos pelo motivo de ser barato e simples de programar. Tornou-se necessário a elaboração de uma placa de circuito impresso que unisse o circuito do controlador eletroquímico e o sistema embarcado descrito. Feita a devida calibração do instrumento de medição, tornou-se possível a análise dos resultados de ensaios que demandam a utilização de potenciostatos para garantir o bom funcionamento do aparelho, que por sua vez apresentou coerência quando comparado com um equipamento de referência.

---

*Palavras-chave: Potenciostato, ATmega328P, eletrodos.*

ANDRADE, A. P. **Development of a data acquisition system using an ATmega328P Arduino UNO board for potentiostats application.** 2021. XX p. Monography (Bachelor of Mechatronics Engineering) – Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## **ABSTRACT**

This document describes the development of an End-of-Course Project regarding an electronic data acquisition system for application in potentiostats, equipment responsible for controlling electrochemical reactions over electrodes. The acquisition was carried out using an ATmega328P microprocessor, a board containing a microcontroller whose popularity has grown in recent years for the reason that it is cheap and simple to program. It became necessary to develop a printed circuit board that would unite the electrochemical controller circuit and the described embedded system. Once the measurement instrument was properly calibrated, it became possible to analyze the test results that require the use of potentiostats to ensure the proper functioning of the device, which in turn showed consistency when compared with a reference equipment.

---

**Keywords:** *Potentiostat, Atmega328P, electrodes.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Símbolo esquemático do amplificador operacional.....	14
Figura 2 – Amplificador operacional funcionando como potenciostato.....	15
Figura 3 – Quantização de um sinal analógico.....	17
Figura 4 – Diagrama de blocos do ATmega328P (ATMEL CORPORATION, <i>datasheet</i> ) .....	18
Figura 5 – Divisor resistivo.....	21
Figura 6 – Filtro passa baixa passivo.....	22
Figura 7 – Circuito de amplificação de corrente transistorizado.....	22
Figura 8 – Amplificador não-inversor com realimentação.....	23
Figura 9 – Amplificador na configuração <i>buffer</i> .....	24
Figura 10 – Amplificador na configuração subtrator.....	24
Figura 11 – Módulo contendo o <i>chip</i> ADS1115.....	26
Figura 12 – Módulo contendo o <i>chip</i> DS3231.....	29
Figura 13 – Display LCD azul 20x4.....	30
Figura 14 – Módulo adaptador I2C para display LCD.....	30
Figura 15 – Módulo cartão SD.....	31
Figura 16 – Fluxograma do código implementado no microcontrolador.....	32
Figura 17 – Circuito esquemático da fonte de alimentação.....	34
Figura 18 – Etapas para obtenção de uma fonte CC a partir da rede elétrica.....	34

Figura 19 – Circuito esquemático do potenciostato.....	35
Figura 20 – Circuito esquemático do sistema embarcado.....	37
Figura 21 – Impressão das trilhas e legendas implementadas na PCI.....	38
Figura 22 – Placa de circuito impresso conectada aos periféricos.....	38
Figura 23 – Pontos coletados para a calibração da leitura de tensão.....	40
Figura 24 – Pontos coletados para a calibração da leitura de corrente.....	42
Figura 25 – Eletrodos e solução utilizados para a célula eletroquímica.....	43
Figura 26 – Desenho esquemático do sistema de controle.....	44
Figura 27 – Primeiro ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 87 horas).....	46
Figura 28 – Segundo ensaio (controle de potencial em -1,2 V por 64 horas).....	47
Figura 29 – Terceiro ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 112 horas levando em consideração a temperatura).....	48
Figura 30 – Quarto ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 5 horas levando comparando os dois equipamentos).....	49
Figura 31 - Quinto ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 5 horas levando comparando os dois equipamentos).....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Legenda de terminais da comunicação SPI.....	20
Tabela 2 - Endereços de comunicação I2C de acordo com a conexão do terminal ADDR (ATMEL CORPORATION, <i>datasheet</i> ).....	27
Tabela 3 – Barramento padrão para comunicação SPI com o módulo cartão SD....	30
Tabela 4 – Dados obtidos da medição de tensão entre os eletrodos para a calibração.....	31
Tabela 5 - Dados obtidos da medição de corrente na carga para a calibração.....	41
Tabela 6 – Resultados gerais e análise estatística dos ensaios.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-Digital
AmpOp	Amplificador Operacional
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CE	Contra-Eletrodo
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
ER	Eletrodo de Referência
ET	Eletrodo de Trabalho
GND	Ground
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
INMET	Instituto Nacional de Metereologia
IDE	<i>Integrated Development Enviroment</i>
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo
PCI	Placa de Circuito Impresso
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Statistic random acess memory</i>
$\Sigma\Delta$	<i>Sigma-Delta</i>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1.	Introdução.....	11
1.2.	Objetivos.....	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1.	Potenciostato.....	13
2.2.	Coleta e conversão de dados a partir de grandezas analógicas.....	16
2.3.	Tecnologia ATmega328P.....	18
2.4.	Circuitos específicos utilizados.....	21
3.	METODOLOGIA.....	25
3.1.	Coleta de dados utilizando ADS1115.....	25
3.2.	Configuração do RTC e display LCD.....	28
3.3.	Armazenamento dos dados em cartão SD.....	30
3.4.	Desenvolvimento do algoritmo de implementação.....	32
3.5.	Elaboração do circuito esquemático.....	33
3.6.	Montagem do equipamento.....	38
3.7.	Calibração.....	39
3.8.	Característica dos ensaios.....	42
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
5.	CONCLUSÃO.....	52
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
	APÊNDICE A .....	58
	APÊNDICE B.....	62

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – Introdução

De acordo com Penido (2013), microcontroladores podem ser definidos como computadores em miniaturas, dentro de um único *chip*, capaz de executar funções específicas de acordo com a forma que é programado. O primeiro microcontrolador foi lançado em 1977 pela Intel e, desde então, o eletrônico vem ganhando importância com o avanço da automação.

Além da aplicação em dispositivos gerais, microcontroladores especializados são desenvolvidos para aplicação nas áreas de iluminação, comunicação, automotiva, dentre outras. Com o avanço da tecnologia, tornou-se possível o desenvolvimento de microcontroladores cada vez menores e com maior capacidade de processamento, como por exemplo, o Atmel Flash criado em 2010 cujas dimensões estão na ordem dos milímetros (PT COMPUTADOR, 2017).

Dentre os microcontroladores utilizados em projetos de baixo custo, destaca-se o ATmega328, presente na linha Arduino. Desenvolvido no Interaction Design Institute Ivrea, em 2005, este componente ganhou uma enorme popularidade pelo fato de poder ser programado com uma linguagem C adaptada, sendo utilizada para projetos simples ou complexos. Além disso, os modelos da linha apresentam baixos preços de mercado quando comparados a outros microcontroladores.

Dentre as inúmeras aplicações em que se utilizam microcontroladores, deve-se destacar os projetos que processam e armazenam dados. Como descreve Emilio (2013), esse tipo de sistema permite a aquisição de valores provenientes de grandezas analógicas para que sejam interpretados e apresentados em uma interface, como um *display*, ou salvos em alguma memória, como um cartão de memória.

## **1.2 – Objetivos**

Neste sentido, a partir da necessidade de avaliar resultados de ensaios de avaliação da fragilização por hidrogênio realizados no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), é dado início a um projeto que tem como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de dados dos parâmetros fornecidos por potenciostatos. Uma vez fabricado o equipamento de baixo custo em relação aos disponíveis no mercado, foi atribuído a tarefa de coletar os valores desses parâmetros e transferi-los do microcontrolador descrito para um cartão SD, utilizado posteriormente para inserir os dados em um computador. Desta forma, torna-se possível a análise de resultados dos ensaios utilizando algum *software* gerador de gráficos.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 – Potenciostato

O potenciostato é um atuador eletrônico responsável por controlar a diferença de potencial elétrico entre eletrodos presentes em uma célula eletroquímica. Este controle é realizado através da passagem de corrente elétrica pelo sistema. Desta forma, é possível catalisar ou inibir reações químicas específicas de acordo com a forma que se aplica a tensão no sistema (AZEVEDO, COSTA, COSTA, 2016).

Equipamentos desse tipo podem ser encontrados no mercado apresentando funções complexas e filtros que garantem um funcionamento excepcional, o que justifica o seu valor elevado. Entretanto, com a necessidade de realizar ensaios mais simples, é possível encontrar diversos projetos artesanais do dispositivo que realize a sua função principal (MATTOS, SILVA, 1983).

O princípio de funcionamento do potenciostato se dá a partir da utilização de um amplificador operacional (AmpOp) na configuração de controlador (METROHM, 2011). Descrito em Malvino (2016), este componente bastante utilizado no ramo da eletrônica analógica é responsável por realizar operações matemáticas a partir dos parâmetros de tensão das suas entradas. As operações realizadas por um AmpOp dependem exclusivamente da forma como o componente é montado no circuito eletrônico. O símbolo esquemático deste componente é apresentado na Fig. 1.

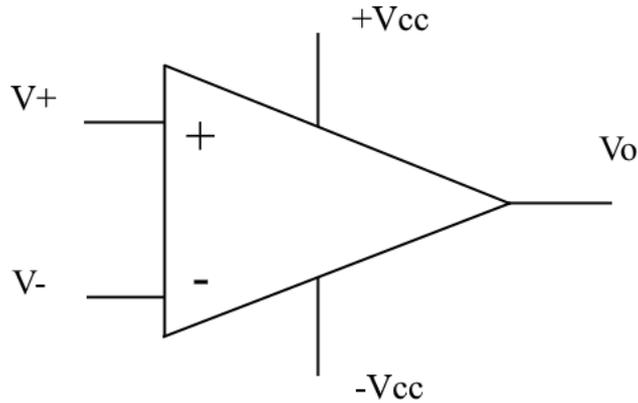


Figura 1 – Símbolo esquemático do amplificador operacional

Embora as características elétricas de componentes eletrônicos dependam principalmente da marca e do modelo, os AmpOp's convencionais necessitam de uma alimentação simétrica de  $\pm V_{cc} = \pm 15\text{ V}$  e tem como saída um valor de tensão proveniente da amplificação diferencial entre as tensões das suas entradas de acordo com a Eq. 1.

$$V_o = A \times (V_+ - V_-) \quad (1)$$

Onde:

- $V_o$ : Tensão de saída do amplificador
- $A$ : Ganho do amplificador ( $\approx 100000$ )
- $V_+$ : Tensão de entrada na porta não inversora
- $V_-$ : Tensão de entrada na porta inversora

O potenciostato depende do amplificador operacional para gerar uma tensão sobre um material condutor denominado contra-eletrodo (CE), que por sua vez fornece uma corrente de carga que passa pela amostra em que se deseja realizar um controle eletroquímico, definida como eletrodo de trabalho (ET). Esta corrente elétrica é responsável por elevar a diferença de potencial entre um terceiro eletrodo, denominado eletrodo de referência (ER), e o eletrodo de trabalho. Desta forma, a tensão entre os eletrodos ( $V_{RE\ ET}$ ) é controlada em torno de uma tensão de entrada qualquer ( $V_{in}$ ). Isto ocorre quando o amplificador é conectado na configuração mostrada na Fig. 2.

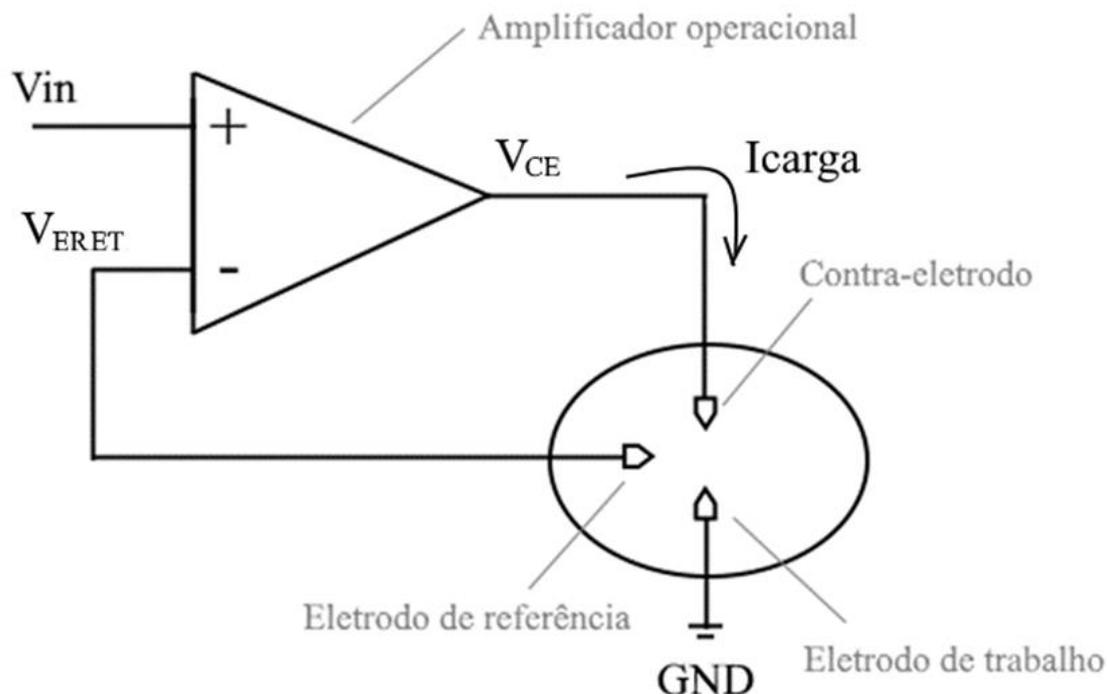


Figura 2 - Amplificador operacional funcionando como potenciostato.

De acordo com o manual de informações sobre potenciostatos da fabricante Metrohm (2011), o contra-eletrodo é utilizado para permitir o fluxo de corrente através do sistema, o AmpOp, trabalha com tensão e não com corrente sendo composto, na maioria das aplicações, por um material inerte (que não sofre reações) como platina, ouro, grafite, dentre outros. Além disso, a área de superfície deste eletrodo deve ser superior à do eletrodo de trabalho para que este não seja um fator limitante cinético do processo eletroquímico.

O eletrodo de referência é composto por um material que possui um potencial elétrico estável e conhecido. Sua função é estabelecer uma referência de potencial para o manuseio do equipamento e controle das reações. É importante destacar que um eletrodo de referência possui uma impedância extremamente alta ( $> G\Omega$ ), o que impede a circulação de corrente pelo mesmo.

O eletrodo de trabalho é o eletrodo em que se deseja controlar a reação química do sistema. A sua composição depende da aplicação, com a necessidade de ser um bom condutor para permitir o fluxo de corrente e, conseqüentemente, a realização das reações eletroquímicas.

As medições da corrente que passa pela carga e da diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência podem ser realizadas através de um sistema de aquisição de dados (SAD). Por definição, esse tipo de sistema tem como finalidade obter dados digitais através de medições de grandezas físicas (analógicas), como temperatura, pressão, pH, posição, etc.

## 2.2 – Coleta e conversão de dados a partir de grandezas analógicas

A obtenção de dados relacionados às grandezas analógicas é realizada através de sensores ou transdutores, que convertem os seus valores dimensionais em sinais elétricos para que sejam condicionados a um *hardware* dedicado para transformá-los em valores digitais, também conhecidos como conversores analógicos-digitais (A/D). A referência Instrumatic (2011) descreve a importância de se destacar que os valores medidos não são iguais aos valores reais, ou seja, um sistema de aquisição de dados possui como entrada os valores reais das grandezas e como saída os valores medidos.

Para a aplicação deste tipo de sistema em um potenciostato, deve-se destacar o fato de não haver necessidade na utilização de um sensor para a medição do valor de tensão, uma vez que os parâmetros de interesse já são sinais elétricos. Desta forma, faz-se necessário um estudo para selecionar um conversor analógico-digital capaz de obter as medidas analógicas da corrente e da tensão e enviar a informação para o Arduino ATmega328P. Vale comentar que o microcontrolador possui 6 canais de conversor A/D, cuja resolução pode variar de acordo com o nº de *bits* presentes em cada modelo.

A conversão do sinal analógico é feita através da quantização. Este processo é responsável por transformar a informação lida pelo sensor em um valor de 0 a  $2^n - 1$ , onde  $n$  é o número de *bits* do conversor. Como mostrado na Fig. 3, este valor será definido proporcionalmente através de uma faixa de tensão de alimentação  $V_a$  do circuito (0 a +5 V ou +3,3 V, por exemplo) e será enviado ao processador como uma sequência binária.

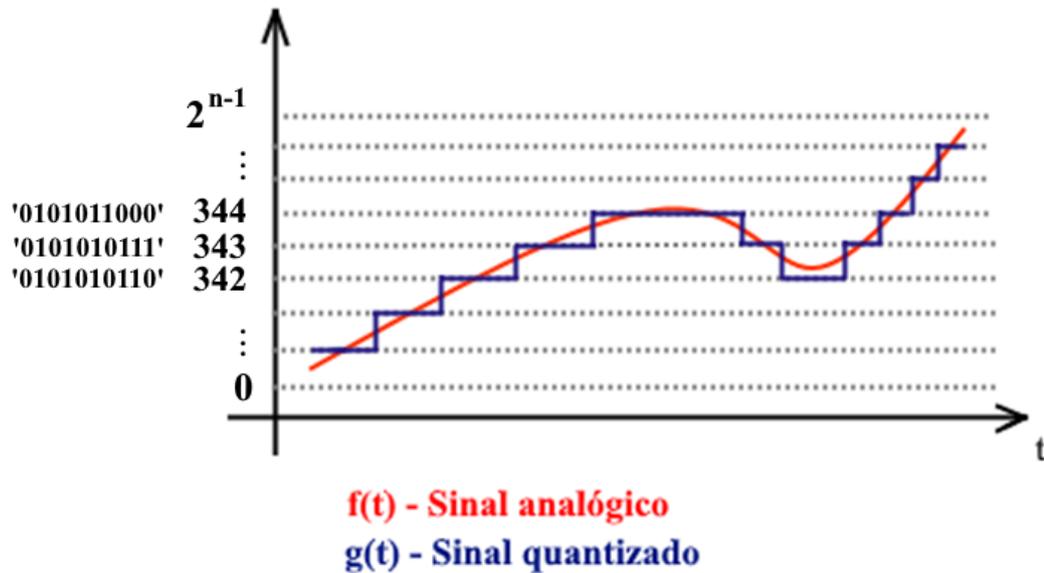


Figura 3 – Quantização de um sinal analógico

Dentre os métodos utilizados nesses conversores, é importante destacar a arquitetura Sigma-Delta ( $\Sigma\Delta$ ) que garante conversões de baixo custo utilizando até 24 *bits* e taxa de amostragem superiores à frequência de *Nyquist* (KARINE, 2017).

De maneira geral, seu princípio de funcionamento se dá a partir da integração e quantização da diferença entre o sinal obtido e a saída analógica do sistema que passa por um conversor digital-analógico (D/A) interno. O método é bastante eficaz dado que a modulação é baseada na variação do sinal entre amostras ao invés de utilizar o seu valor absoluto.

Tendo em vista a necessidade da aquisição do valor de uma corrente elétrica, foi adotado a ideia de obtê-lo através de um *shunt* em série com a carga. Este componente é definido como um simples resistor utilizado para obter o valor da corrente passante indiretamente através da 1ª Lei de Ohm durante a medição da tensão entre os seus terminais. Desta forma, o *shunt* funciona como um sensor resistivo da corrente que passa pela carga através da relação descrita na Eq. 2.

$$I_{carga} = \frac{V_{medida}}{R_{shunt}} \quad (2)$$

### 2.3 – Tecnologia ATmega328P

O ATmega328P é um microcontrolador 8 *bits* produzido pela Atmel de alto desempenho, baixo consumo e otimizado para compiladores C. Este componente se encontra presente como núcleo placas Arduino UNO, cuja plataforma vem ganhando notória popularidade nos últimos anos (NEWTON, 2018).

A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos da arquitetura interna do *chip* ATmega328P.

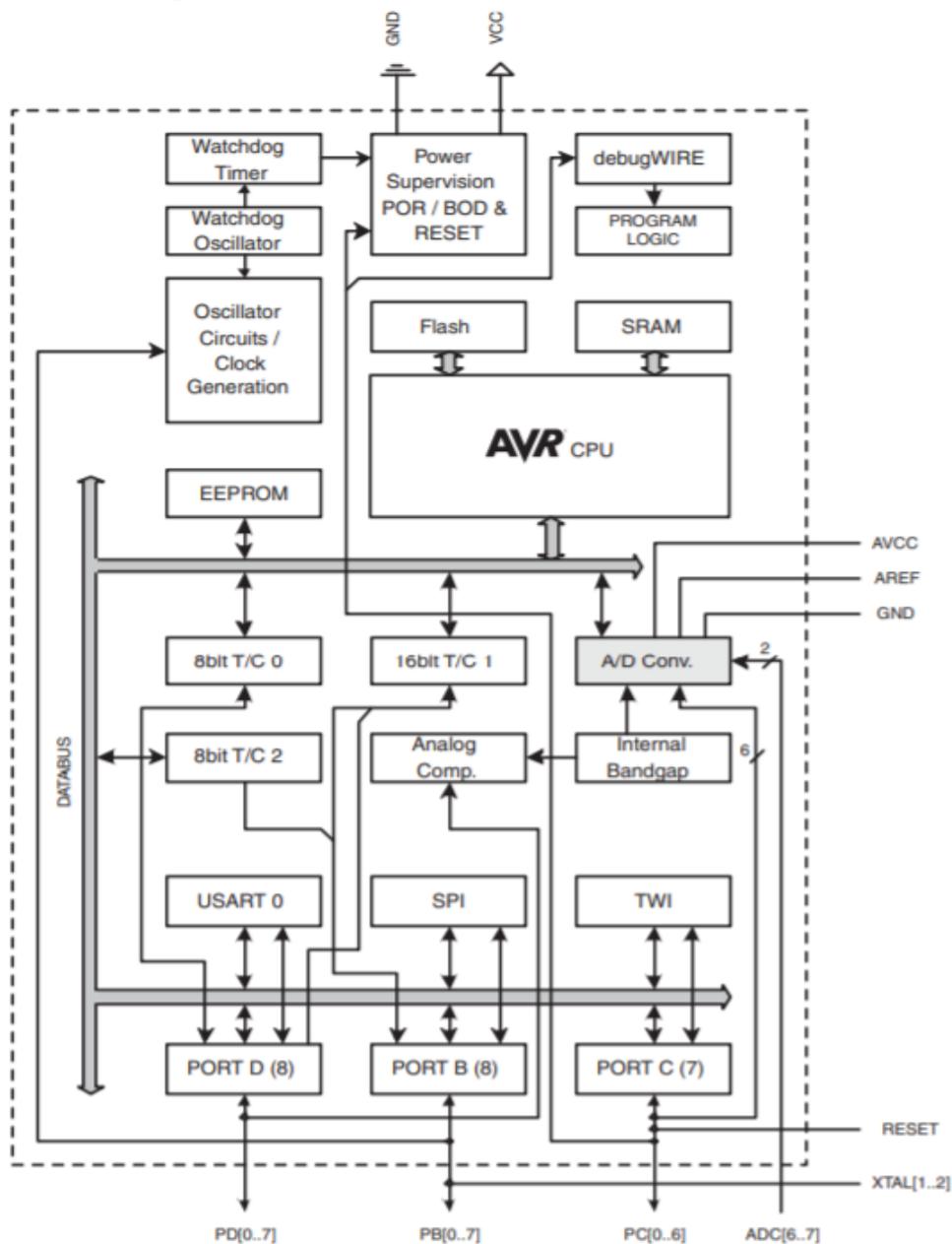


Figura 4 – Diagrama de blocos do ATmega328P (ATMEL CORPORATION, *datasheet*)

Das suas principais características, deve-se destacar parâmetros como: 20 Milhões de instruções por segundo (MIPS) a 20 MHz, 6 canais analógicos de entrada e saída com um conversor A/D de 10-bit, compatibilidade de comunicação *Inter-integrated circuit* (I2C), dentre outros.

A respeito do armazenamento e controle de dados no dispositivo, o microcontrolador dispõe de uma memória *Statistic random access memory* (SRAM) interna de 2 KB, uma memória *Eletrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) de 1 KB, e uma memória flash programável de 32 KB. Esta última é responsável por manter as informações do código programado no *chip* mesmo quando a energia no sistema é interrompida, a definindo, assim, como uma memória não-volátil.

Além disso, o ATmega328P possui uma arquitetura Harvard, uma solução desenvolvida para substituir a arquitetura Von-Neumann no quesito rapidez de trabalho do microprocessador. Diego (2012) define esta arquitetura a partir da divisão da memória dos dados trabalhados e instruções de programa em duas, permitindo que o processador leia uma instrução ao mesmo tempo que acessa a memória de dados. Microcontroladores compostos pela arquitetura Harvard também podem ser chamados de “microcontroladores RISC” (Computador com conjunto reduzido de instruções).

O protocolo de comunicação I2C compatível com o microcontrolador é um conceito de barramento que facilita a comunicação entre circuitos de caráter final de aplicação. Além do Arduino, existem uma variedade de eletrônicos que utilizam o protocolo I2C, como Raspberry, memórias externas, visores, sensores, etc (DANIEL, 2017).

A transmissão de dados é feita através de dois barramentos paralelos à alimentação. A linha Serial Data (SDA) é responsável por transmitir dados entre dispositivos de forma bidirecional (leitura e escrita), enquanto o Serial Clock (SCL) é responsável pela temporização, selecionando quais dispositivos estão se comunicando naquele instante. Além disso, os módulos conectados entre si possuem endereços numéricos de referência e são divididos entre mestres (microcontroladores que controlam o barramento SCL) e escravos. Isso significa que a taxa de transmissão de dados em uma comunicação I2C não é fixa, uma vez que será controlada de acordo com a programação atribuída.

A implementação deste tipo de comunicação pode ser feita de forma prática no Arduino, uma vez que o próprio *Integrated development enviroment* (IDE) contém bibliotecas prontas para uso. O programador se torna unicamente responsável por selecionar endereços hexadecimais referentes aos módulos conectados ao mestre para efetuar determinada transmissão de dados.

Um outro tipo de comunicação possível de ser explorada no microcontrolado ATmega328P é a *serial peripheral interface* (SPI), também amplamente utilizada para troca de informações entre circuitos integrados mestres e escravos. Em relação ao I2C, o protocolo SPI realiza uma transmissão de dados com maior rapidez, além de não requisitar um esquema de endereçamento de dispositivos tão complexo, de acordo com Alan (2014).

A troca de informações é realizada através de 3 terminais principais (SCK, MOSI e MISO) e um terminal exclusivo para cada escravo (CS). A Tabela 1 descreve o significado e função de cada conexão.

Tabela 1 – Legenda de terminais da comunicação SPI

Terminal	Significado	Função
SCK	<i>Serial clock</i>	<i>Clock</i> gerado pelo mestre.
MOSI	<i>Master output, slave input</i>	Pino reservado para enviar dados seja o <i>chip</i> mestre ou escravo.
MISO	<i>Master input, slave output</i>	Pino reservado para receber dados seja o <i>chip</i> mestre ou escravo.
CS	<i>Chip selec</i>	Indica no barramento qual dispositivo escravo tem permissão para receber ou enviar dados.

## 2.4 – Circuitos específicos utilizados

Para a elaboração de um circuito complexo que atenda às necessidades do projeto, é necessário o estudo de circuitos específicos isolados e suas finalidades. Esta seção apresenta os desenhos esquemáticos e equacionamentos obtidos nas literaturas de Malvino (2016) e Alexander (2013) para que se possa ter melhor entendimento sobre o que será projetado.

O divisor de tensão resistivo apresentado na Fig. 5 é um circuito eletrônico simples composto por dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ , cujo principal objetivo é dividir o valor de tensão da entrada do sistema por um valor que pode ser definido pela Eq. 3.

$$V_s = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times V_e \quad (3)$$

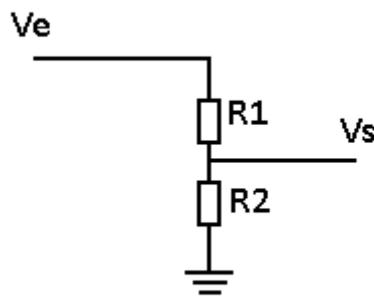


Figura 5 – Divisor resistivo

Este sistema é amplamente utilizado para realizar a correção ou regulação de tensão em circuitos eletrônicos.

Um filtro passa-baixa passivo mostrado na Fig. 6 é um circuito composto por um capacitor  $C$  e um resistor  $R$  que recebe este nome uma vez que não utiliza fonte de alimentação externa, como filtros ativos produzidos a partir de amplificadores operacionais. Esta ferramenta é responsável por promover uma resposta em frequência que atenua sinais comportamentos acima da frequência de corte que pode ser calculada de acordo com a Eq. 4.

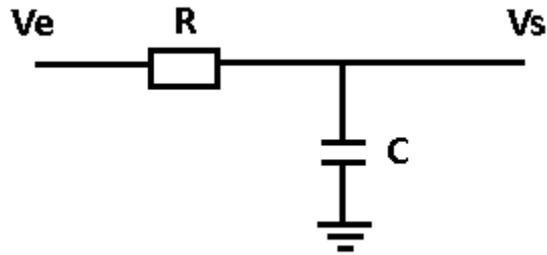


Figura 6 – Filtro passa baixa passivo

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

A frequência de corte de um filtro passivo é definida como sendo o valor em que se obtém uma atenuação de  $-3 \text{ dB}$  no sinal, o que corresponde à 70 % do valor nominal.

O transistor bipolar é um componente de extrema importância na área da eletrônica. Uma das suas aplicações mais comuns em circuitos analógicos é a amplificação de corrente.

Para o circuito esquemático apresentado na Fig. 7, a corrente  $I_c$  do coletor do transistor pode ser calculada através da corrente  $I_b$  gerada a partir de um sinal na base do componente, em que  $h$  corresponde ao ganho do transistor fornecido pelo *datasheet*, parâmetro que pode variar de acordo com as condições de aplicação do componente. A amplificação é feita a partir de uma fonte externa conectada ao terceiro terminal do componente, denominado emissor.

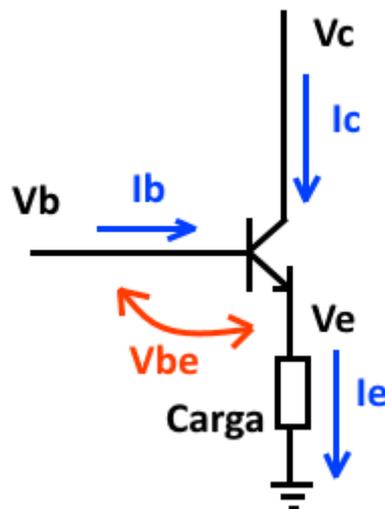


Figura 7 – Circuito de amplificação de corrente transistorizado

Deve-se destacar a diferença de potencial  $V_{be} \cong 0,7 \text{ V}$  necessária para que o semiconductor interno opere em estado de condução, gerando uma ligeira atenuação no valor de tensão que alimenta a carga  $R$  do projeto.

A partir da demanda de corrente da carga, o circuito apresentado efetua a alimentação adequada por meio de uma corrente proveniente de uma fonte externa conectada ao coletor, mas com um comportamento definido pelo sinal da base. Desta forma, o transistor pode ser utilizado como um amplificador de corrente, circuito extremamente útil para aplicações em circuitos integrados que apresentam limitações de carga nos terminais.

Outro circuito que deve ser estudado é o amplificador operacional operando como *buffer*. A Figura 8 apresenta a configuração genérica de um amplificador não-inversor com realimentação, de forma que a saída é dada pela Eq. 5.

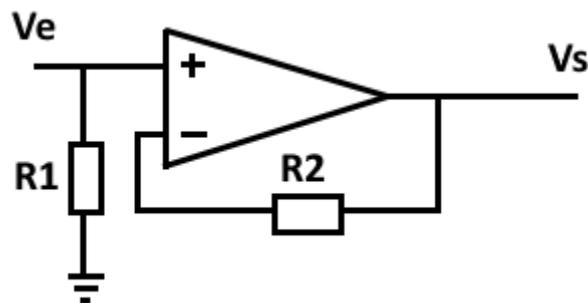


Figura 8 – Amplificador não-inversor com realimentação

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_e \quad (5)$$

O circuito da Fig. 9 é denominado *buffer*, em que  $R_2$  é nulo e  $R_1$  tende ao infinito. A partir do equacionamento, verifica-se que a amplificação é unitária, de forma que a tensão de saída possui o mesmo valor da tensão de entrada.

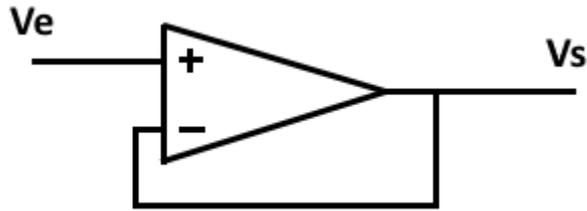


Figura 9 – Amplificador na configuração *buffer*

O amplificador nesta configuração é muito utilizado em aplicações de medição de tensão em que o sistema não possui carga suficiente para gerar um sinal. Este problema é corrigido a partir da fonte de alimentação externa do amplificador que copia a entrada.

Amplificadores operacionais também são configurados como operadores matemáticos de acordo com a montagem do circuito. A Figura 10 mostra um amplificador subtrator genérico, cuja saída pode ser calculada por meio da Eq. 6.

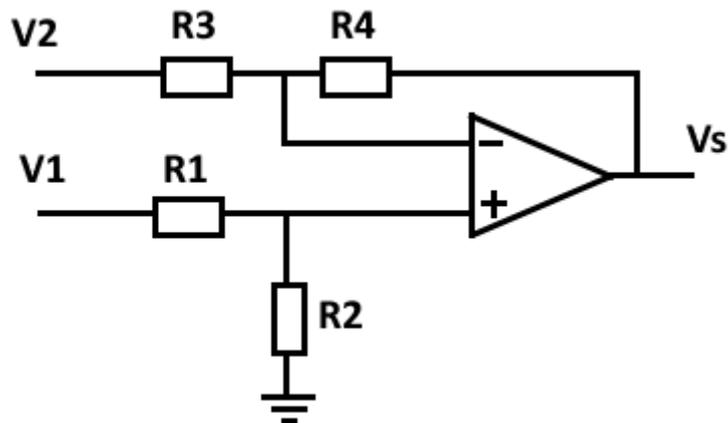


Figura 10 – Amplificador na configuração subtrator

$$V_s = \left( \frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) \times V_1 - \left( \frac{R_4}{R_3} \right) \times V_2 \quad (6)$$

Para valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  semelhantes, a subtração é feita sem ganho, com a saída sendo definida pela diferença entre as tensões  $V_1$  e  $V_2$ .

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

### 3.1 – Coleta de dados utilizando o ADS1115

A partir da necessidade de se realizar uma coleta de sinais elétricos para avaliar a estabilidade da tensão na ordem de microvolts, o conversor A/D de 10 *bits* presente no microcontrolador utilizado ( $V_a = 5 V$ ) se torna insuficiente para realizar medições nessa escala como calculado a partir da Eq. 7. Esta hipótese pode ser comprovada por meio do conceito de *least significant bit (LSB)*, que representa o menor valor de tensão da entrada analógica que promove uma mudança de estado digital como descrito no trabalho de Guilherme (2013).

$$LSB_{Arduino} = \frac{V_a}{2^n} \quad (7)$$

$$LSB_{Arduino} = \frac{5}{2^{10}} \quad (8)$$

$$LSB_{Arduino} \cong 5 \text{ mV} \quad (9)$$

Desta forma, faz-se necessário a utilização de um conversor A/D externo capaz de fornecer uma resolução menor. O módulo ADS1115 mostrado na Fig. 11 foi escolhido pela sua ampla utilização em projetos de conversores A/D utilizando microcontroladores como Arduino e Raspberry Pi.

Este circuito integrado fornece 4 canais analógicos com uma precisão de 16 *bits*, além de permitir uma coleta de dados de até 860 *Samples per second* (SPS).

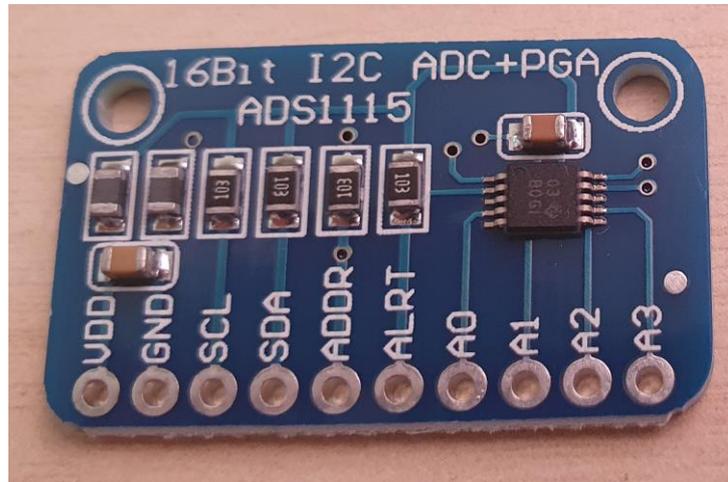


Figura 11 – Módulo contendo o *chip* ADS1115

O cálculo do *bit* menos significativo para este *chip* foi realizado de acordo com a Eq. 10.

$$LSB_{ADS1115} = \frac{V_a}{2^n} \quad (10)$$

$$LSB_{ADS1115} = \frac{5}{2^{16}} \quad (11)$$

$$LSB_{ADS1115} \cong 0,08 \text{ mV} \quad (12)$$

Além disso, o conversor A/D permite uma comunicação I2C com o microcontrolador utilizado. O endereço hexadecimal pode ser selecionado através da conexão do terminal ADDR conforme especificado na Tab. 2 (TEXAS INSTRUMENTS, *datasheet*).

Tabela 2 – Endereços de comunicação I2C de acordo com a conexão do terminal ADDR

Pino conectado ao ADDR	Endereço do escravo (ADS1115)
GND	0x48
VDD	0x49
SDA	0x4a
SCL	0x4b

Para a medição de corrente elétrica de forma indireta, utilizou-se um *shunt* de 195  $\Omega$ , tolerância 5 %, e potência nominal admitida de 1/4W. Desta forma, é possível calcular a partir da Eq. 13 um primeiro limitante no valor da corrente elétrica que passa pela carga para evitar efeitos de alteração da resistividade do *shunt* causado por aquecimento considerando uma aplicação operando na metade da potência nominal.

$$P_{nominal} = i_{max1}^2 \times R_{shunt} \quad (13)$$

$$i_{max1} = \sqrt{\frac{0,5 \times P_{nominal}}{R_{shunt}}} \quad (14)$$

$$i_{max1} = \sqrt{\frac{0,5 \times 0,25}{195}} \quad (15)$$

$$i_{max1} = 25,32 \text{ mA} \quad (16)$$

Outro limitante pode ser obtido através da faixa de medição empregada no conversor ADS1115 que deve ser calculado a partir da Eq. 17, uma vez que o *chip* admite leituras de tensão até o valor da alimentação  $V_a$ .

$$I_{max2} = \frac{V_a}{R_{shunt}} \quad (17)$$

$$I_{max2} = \frac{5}{195} \quad (18)$$

$$I_{max2} = 25,64 \text{ mA} \quad (19)$$

Desta forma, a corrente elétrica máxima teórica admitida em uma aplicação de aquisição de dados utilizando o sistema desenvolvido é dada pela Eq. 20.

$$I_{max} = \min(I_{max1}; I_{max2}) \quad (20)$$

$$I_{max} = \min(25,32; 25,64) \quad (21)$$

$$I_{max} = 25,32 \text{ mA} \quad (22)$$

### 3.2 – Configuração do RTC e display LCD

Outros dois periféricos de menor importância utilizados junto ao Arduino são o módulo *Real Time Clock* (RTC) e o *Liquid Cristal Display* (LCD) 20x4 com adaptador I2C. Enquanto o primeiro é um relógio responsável por fornecer informações horárias em tempo real, o segundo permite uma visualização dos parâmetros coletados pelo ADS1115 por uma interface gráfica.

O relógio em tempo real apresentado na Fig. 12 é um dispositivo conectado ao *chip* DS3231 que pode ser implementado em uma arquitetura I2C. Além de ser amplamente utilizado em projetos de microcontroladores de baixo custo e boa precisão, o módulo contém um cristal oscilador conectado a uma entrada de bateria externa, garantindo a cronometragem de forma contínua mesmo quando o equipamento for desconectado (DALLAS SEMICONDUCTOR, *datasheet*).

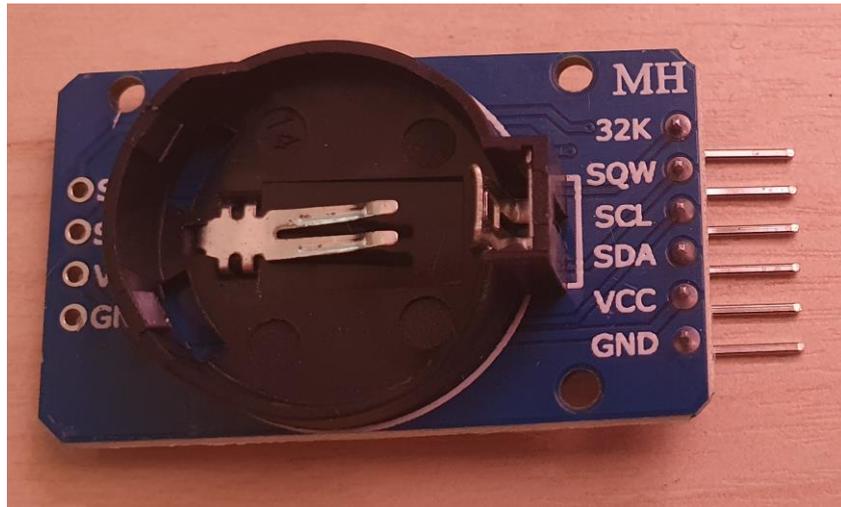


Figura 12 – Módulo contendo o *chip* DS3231

O *chip* fornece informações do segundo, minuto, hora, dia, semana, mês e ano a partir de um ponto de referência inserido durante a programação, sendo também capaz de interpretar meses de 28, 30 ou 31 dias e anos bissextos. Apesar da coletânea parâmetros disponíveis, o projeto em questão foi desenvolvido para coletar apenas o segundo, minuto e hora referente a cada momento do ensaio utilizando o potenciostato.

Desta forma, torna-se possível o armazenamento interno das informações cronológicas para cada par de dados obtidos pelo conversor A/D, permitindo uma possível análise gráfica em que se deseja saber a que momento do dia se observou um certo comportamento.

As conexões do módulo com o microcontrolador se resumem na alimentação (+5V e GND) e a integração das portas SDA e SCL para efetuar a comunicação I2C. O endereço do escravo para este componente é definido através da solda de terminais presentes no próprio módulo, e tem como padrão o valor hexadecimal de 0x68.

O display LCD (*Liquid Cristal Display*) utilizado para o projeto pode ser visto na Fig. 13. A conexão do display com o módulo I2C PCF8574T presente na Fig. 14 permite estabelecer um endereço de comunicação utilizando apenas os canais SDA e SCL.



Figura 13 – Display LCD Azul 20x4

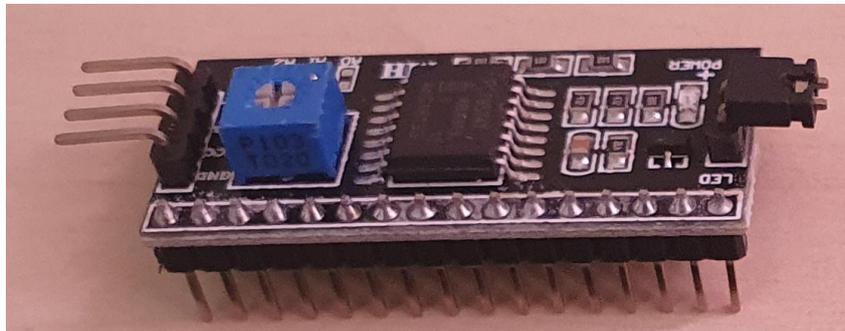


Figura 14 – Módulo adaptador I2C para display LCD

O módulo escolhido possui um fundo de cor azul e permite a escrita de caracteres em uma matriz de 4 linhas e 20 colunas, além de permitir o ajuste do brilho de fundo e da saturação do caractere.

Semelhante ao módulo RTC, o display se conecta ao equipamento através da alimentação (+5 V e GND) e portas de comunicação I2C. O endereço de escravo também é definido através da solda de terminais do próprio módulo, com um valor hexadecimal padrão de 0x27 (TEXAS INSTRUMENTS, *datasheet*).

### 3.3 – Armazenamento dos dados em cartão SD

Para realizar o armazenamento tanto dos parâmetros de ensaio do potenciostato, quanto das informações horárias fornecidas pelo RTC, optou-se pela utilização de mais um módulo de baixo custo que permite a leitura e escrita de dados em um cartão SD. O dispositivo pode ser visualizado na Fig. 15.

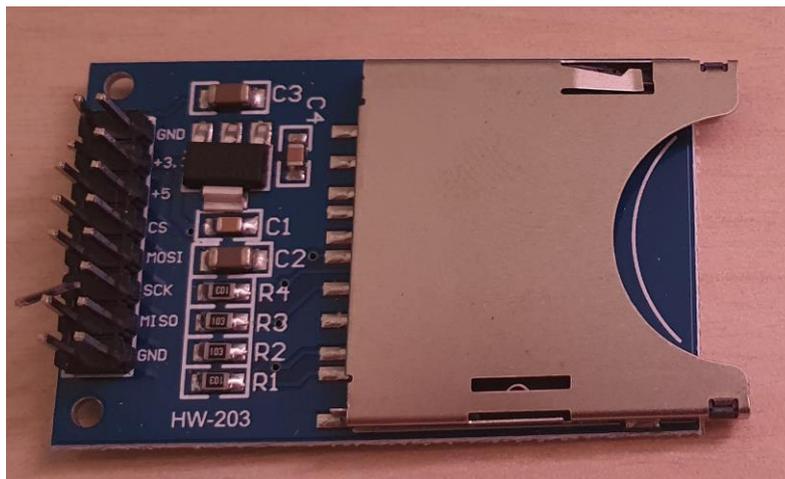


Figura 15 – Módulo cartão SD

A comunicação entre o microcontrolador e o cartão SD é realizada através do protocolo SPI, necessitando um total de 4 barramentos para a transmissão além da alimentação (+5 V e GND). A biblioteca disponibilizada pelo próprio Arduino IDE referente a este tipo de aplicação demanda as conexões apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3 – Barramento padrão para comunicação SPI com o módulo cartão SD

Terminal do módulo cartão SD	Entrada digital do Arduino UNO
SCK	13
MOSI	11
MISO	12
CS	10

A partir da conexão bem estabelecida, foi possível efetuar o armazenamento de dados em formato de texto (.txt) em um cartão SD (marca) de 16 GB. O método utilizado gera um total de 5 arquivos referentes aos parâmetros: Hora, minuto, segundo do potencial elétrico do eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência e a corrente de carga para cada ciclo.

### 3.4 – Desenvolvimento do algoritmo de implementação

O código desenvolvido para definir o comportamento do microcontrolador ATmega328P foi elaborado não só para obter e salvar dados, mas também executar os devidos processamentos e apresentar valores no display LCD. A Fig. 16 apresenta o fluxograma criado que compõe a ideia geral do algoritmo.

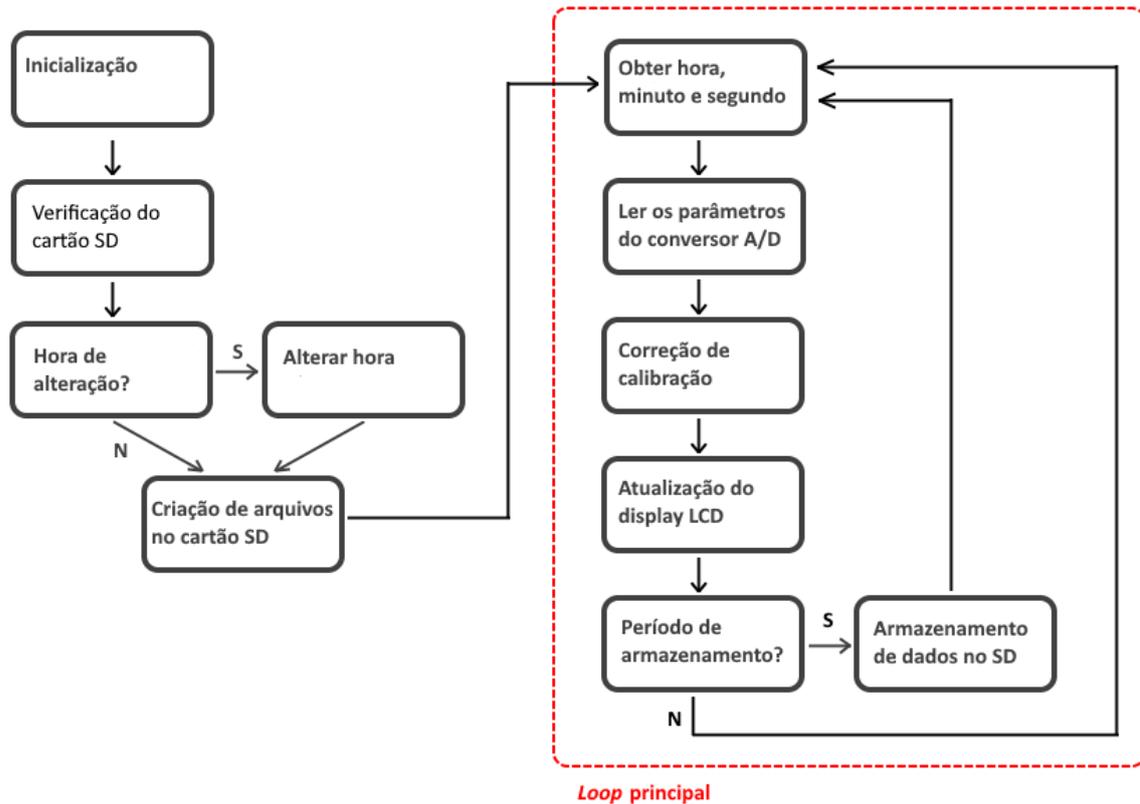


Figura 16 – Fluxograma do código implementado no microcontrolador

Durante a etapa de inicialização e verificação do cartão SD, são definidas as variáveis do programa e criação de objetos referentes a cada módulo conectado ao Arduino. Caso o cartão SD não esteja conectado ao sistema, uma informação é levada para o final do programa para a sinalização no display LCD.

Para manter o horário cronometrado pelo RTC coerente, deve-se utilizar a ferramenta de alteração da hora que atualiza os parâmetros de hora, minuto e segundo quando o sistema é ligado em um intervalo de hora específico. Este procedimento precede a criação dos arquivos de texto no cartão SD, responsáveis por armazenar listas contendo o horário, a tensão entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência e a corrente que passa pela carga.

Assim como na maioria das aplicações de sistemas microcontrolados, o programa contém um *loop* principal para que o programa funcione de forma ininterrupta. Desta forma, cria-se um ciclo de leitura, processamento, armazenamento e apresentação de dados.

Após obter os parâmetros cronológicos do RTC, o algoritmo também executa a função responsável por obter a saída digital do ADS1115. Os valores obtidos do potenciostatos são processados e corrigidos a partir da calibração do instrumento que será comentada nos próximos tópicos.

Finalmente, os dados são apresentados no display LCD junto com a numeração do potenciostato utilizado e horário momentâneo. Também é feita uma verificação de horário para solicitar o armazenamento dos dados nos arquivos de textos que ocorrem a cada 30 segundos.

### **3.5 – Elaboração do circuito esquemático**

Uma vez concluído o processo de seleção dos módulos e componentes necessários, utilizou-se o *software* Autodesk Eagle. A Figura 17 mostra o circuito esquemático da fonte de alimentação do sistema.

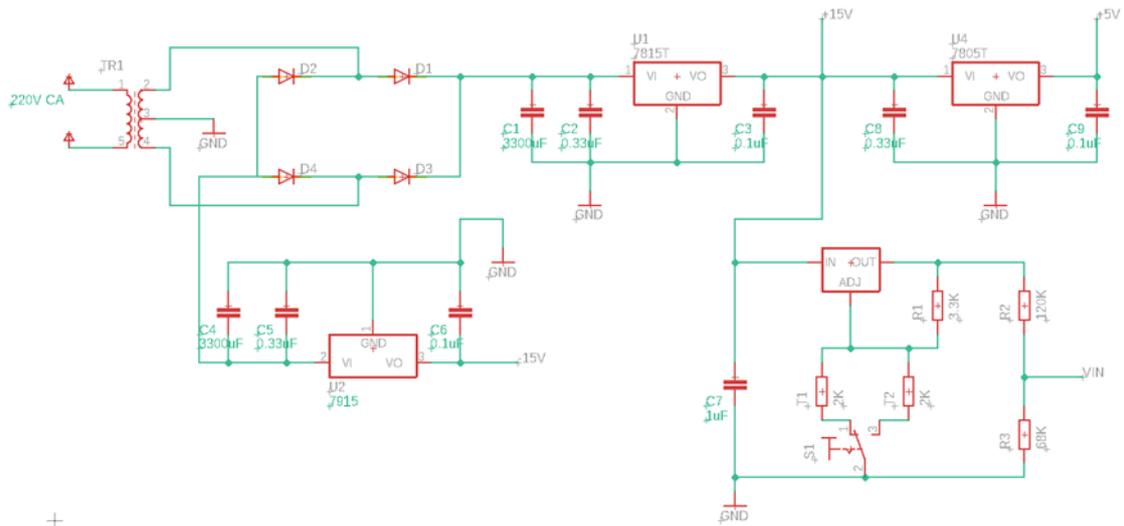


Figura 17 – Circuito esquemático da fonte de alimentação

A fonte necessita de uma alimentação externa 220V AC e trabalha de forma aterrada. Um transformador de *tap* central 15+15 V é responsável por abaixar a tensão e gerar uma fonte simétrica de aproximadamente  $\pm 21V$  quando se utiliza uma ponte retificadora completa de diodos (1N4007) e capacitores de  $3300 \mu F$  como filtro. Este valor pode ser calculado através do valor de pico da senoide de valor eficaz *Root mean square* (RMS) de 15V a partir da Eq. 23. Todas as etapas de obtenção da fonte de corrente contínua (CC) a partir da rede elétrica são apresentadas na Fig. 18.



Figura 18 – Etapas para obtenção de uma fonte CC a partir da rede elétrica

$$V_{pico} = V_{rms} \times \sqrt{2} \quad (23)$$

$$V_{pico} = 15 \times \sqrt{2} \quad (24)$$

$$V_{pico} = 21,21 \text{ V} \quad (25)$$

A regulação de tensão para tensões inferiores é realizada utilizando os circuitos integrados 7815 (U1) para o valor de +15 V, 7805 (U4) para +5 V e 7915 (U2) para -15 V. A configuração da implementação de capacitores foi feita de acordo com o *datasheet* de cada componente.

Além disso, é importante mencionar a utilização do *chip* LM317 (U3) conectado a uma chave de dois estados para selecionar dois valores de tensão (+1,1 V e +1,2 V) que será utilizado como referência no controle do potenciostato. Esta seleção é feita por meio de uma chave de dois estados conectados a *trimpots* T1 e T2, cujo valor da resistência está diretamente relacionado com a tensão de saída desta etapa da fonte. O valor  $V_{in}$  utilizado é obtido após uma correção por meio de um divisor resistivo.

A Figura 19 mostra o circuito esquemático desenvolvido do sistema de controle de malha fechada.

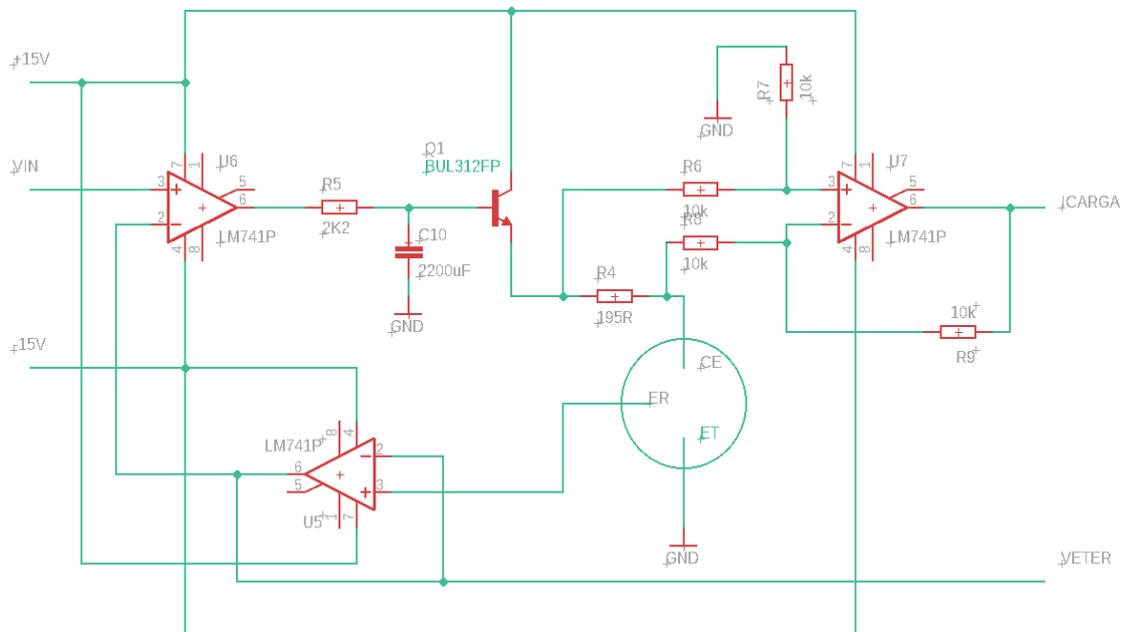


Figura 19 – Circuito esquemático do potenciostato

O AmpOp LM741 do potenciostato (U6) recebe o valor de referência  $V_{in}$  e envia um sinal para a carga responsável por controlar o potencial elétrico do eletrodo de referência. Este sinal é previamente filtrado utilizando um filtro passa-baixa passivo de frequência de corte  $f_c = 0,033$  Hz e amplificado utilizando um transistor NPN BUL312FP (Q1) para garantir um comportamento de corrente de carga contínuo e suficiente, uma vez que o amplificador possui uma limitação de 25 mA de corrente de curto-circuito conforme escrito em seu *datasheet*.

Além disso, foi utilizado um resistor *shunt*  $R4 = 195 \Omega$  para efetuar a leitura do valor absoluto da corrente passante de forma indireta. Os terminais do componente são conectados ao AmpOp LM741 subtrator (U7), cuja saída contém a informação do parâmetro. O *chip* é utilizado para gerar um valor de potencial em relação ao GND, possibilitando a leitura efetuada pelo conversor A/D.

A célula eletroquímica composta pelos eletrodos retorna o potencial do eletrodo de referência de volta ao circuito. Este sinal é enviado à entrada de um *buffer* (U5), AmpOp LM741 de ganho unitário que tem como principal objetivo repetir o valor de tensão de um terminal com alta impedância. A saída do amplificador conectada a uma das entradas fecha a malha do sistema, garantindo que o potenciostato controle a tensão entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho em torno do valor de +1,1 V ou +1,2 V. O mesmo terminal também é utilizado para efetuar a leitura do parâmetro  $V_{ER ET}$ .

A Figura 20 apresenta o circuito esquemático em forma de blocos das conexões efetuadas em torno do microcontrolador ATmega328P.

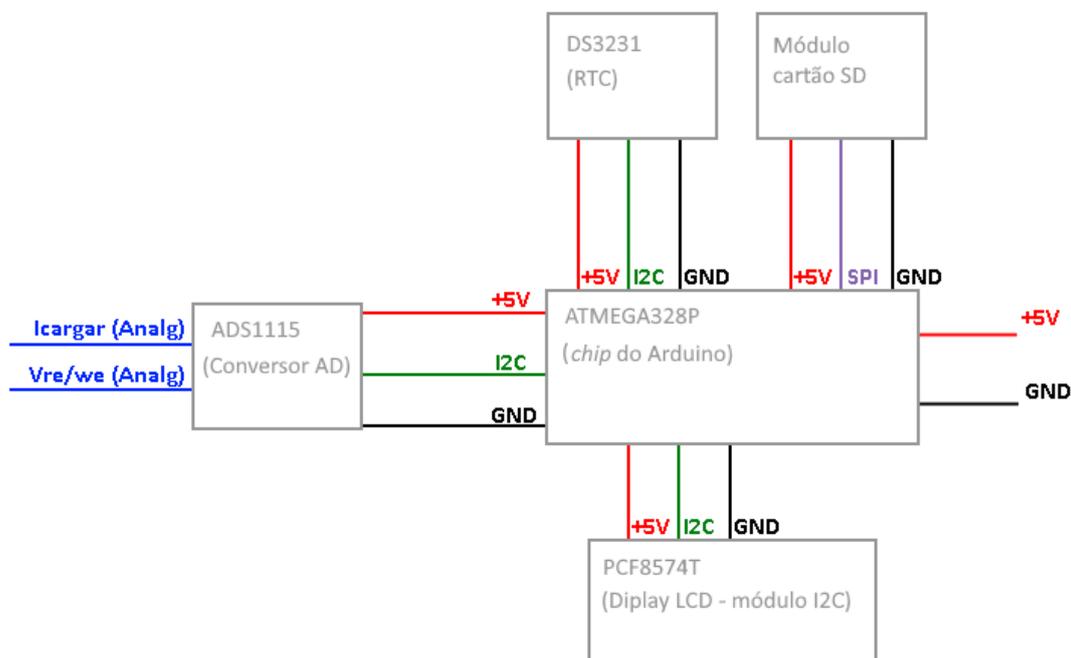


Figura 20 – Circuito esquemático do sistema embarcado

Para esta seção, deve-se destacar o módulo ADS1115 que recebe os valores analógicos da corrente de carga e tensão entre os eletrodos. A conversão AD é efetuada e enviada ao *chip* do Arduino por meio da comunicação I2C para que possa ser processado.

Além disso, a leitura da tensão entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho é feita com o auxílio de um amplificador subtrator sem ganho. A justificativa parte do fato que nenhum dos terminais do *shunt* estão conectados ao GND do circuito, o que torna necessário um processo de obtenção do valor relativo a partir da diferença entre as tensões dos terminais do componente.

Tanto o display LCD, quanto o RTC, também utilizam o mesmo protocolo e são conectados ao microcontrolador para o tráfego de informações, enquanto o módulo cartão SD recebe os parâmetros através da comunicação SPI.

### 3.6 – Montagem do equipamento

Para a confecção da placa de circuito impresso (PCI), o desenho das trilhas foi desenvolvido com auxílio de um *software* de edição de placas. A Figura 21 mostra o resultado frente e verso das impressões das trilhas e legendas, respectivamente, a serem implementadas.

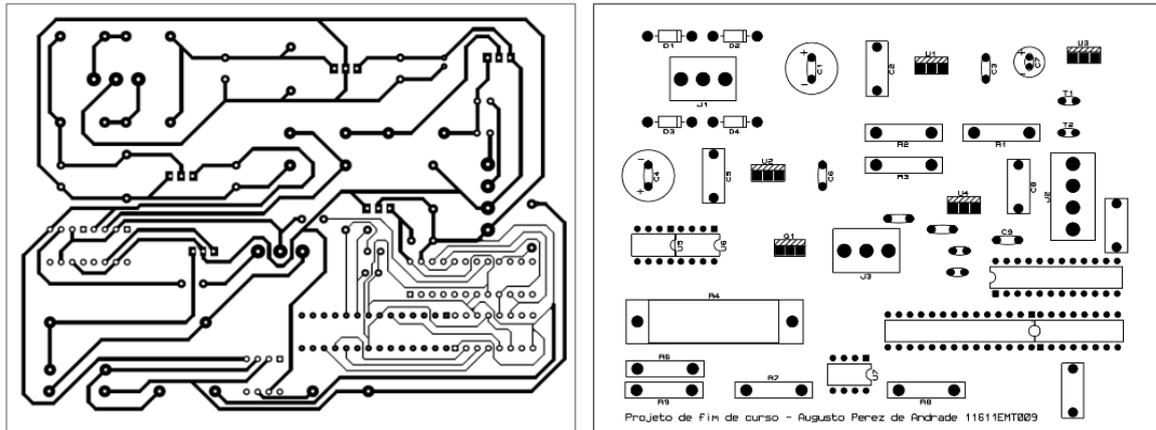


Figura 21 – Impressão das trilhas e legendas implementadas na PCI

Uma vez realizada a transferência dos desenhos e solda dos componentes, a placa foi conectada aos módulos digitais, transformador e cabos de conexão para os eletrodos. O sistema físico funcional sem compartimento é apresentado na Fig. 22.

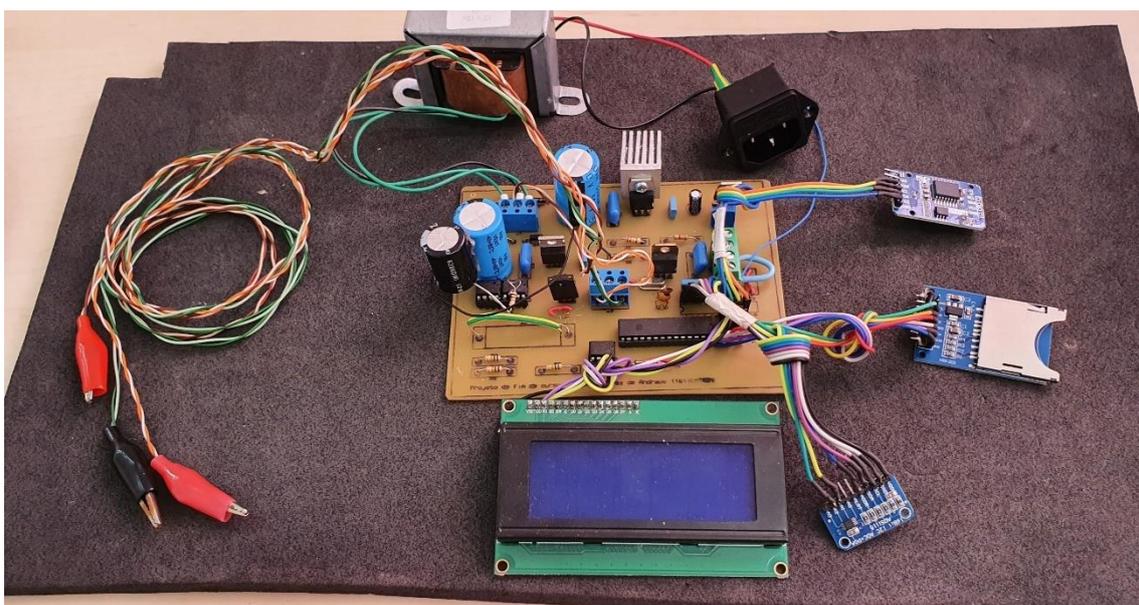


Figura 22 – Placa de circuito impresso conectado aos periféricos

### 3.7 – Calibração

Para realizar a obtenção de dados minimizando ao máximo os erros de medição, foi realizada a modelagem de uma curva calibração com o objetivo de corrigir os parâmetros de tensão e corrente antes de serem armazenados e mostrados no display LCD.

Foi utilizado um multímetro de precisão Keysight 3458A (8½ dígitos) como instrumento de referência. O certificado de calibração do equipamento está presente no Apêndice B deste documento.

A coleta de dados para realizar a calibração foi feita por meio da regulação do valor de tensão na entrada do potenciostato que pode ser ajustada pelo *trimpot*. Desta forma, foi selecionado o maior número de pontos possíveis dentro de um intervalo de aplicação para efetuar uma regressão.

A Tabela 4 apresenta os valores da tensão entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho medidos pelo potenciostato e o multímetro de precisão de forma simultânea. A Figura 23 mostra os pares obtidos no plano cartesiano gerado pelo *software* MatLab.

Tabela 4 – Dados obtidos da medição de tensão entre os eletrodos para a calibração

$V_{pot}$ [V]	$V_{mult}$ [V]
1,3053	1,0638
1,3073	1,0656
1,3100	1,0678
1,3121	1,0695
1,3170	1,0730
1,3212	1,0766
1,3231	1,0780
1,3290	1,0830
1,3337	1,0866
1,3386	1,0910
1,3432	1,0945
1,3466	1,0972
1,3530	1,1025
1,3549	1,1040
1,3588	1,1070
1,3634	1,1105
1,3662	1,1130
1,3699	1,1160
1,3728	1,1183
1,3761	1,1210
1,3799	1,1240
1,3864	1,1292
1,3901	1,1320
1,3933	1,1350
1,3971	1,1380

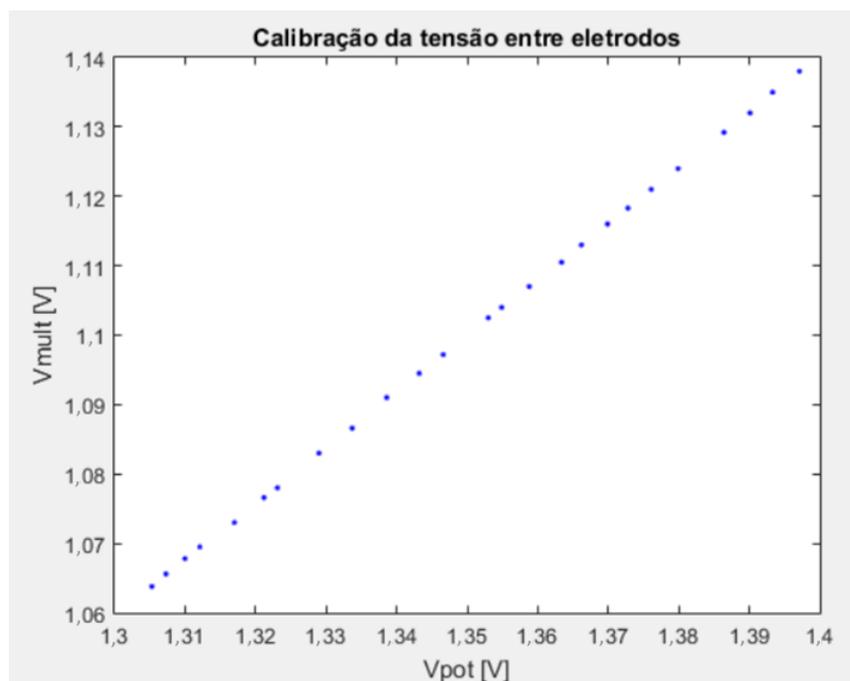


Figura 23 – Pontos coletados para a calibração da leitura de tensão

Efetua-se uma regressão linear utilizando o método de mínimos quadrados disponível no MatLab. A Equação 26 define o valor de tensão corrigido em função do valor de tensão medido pelo potenciostato.

$$V_{corr} = 0,8065 \times V_{medido} + 0,0111 \quad (26)$$

De forma semelhante, a Tabela 5 apresenta os valores da corrente de carga medidos pelo potenciostato e o multímetro de precisão de forma simultânea. A Figura 24 mostra os pares obtidos no plano cartesiano.

Tabela 5 - Dados obtidos da medição de corrente de carga para a calibração

$I_{pot}$ [mA]	$I_{mult}$ [mA]
0,786	0,800
0,900	0,940
0,996	1,040
1,091	1,165
1,151	1,250
1,269	1,390
1,337	1,470
1,506	1,670
1,550	1,730
1,712	1,920
1,936	2,200
2,086	2,380
2,382	2,740
2,564	2,950
2,766	3,200
2,936	3,430
3,200	3,740
3,228	3,770
3,436	4,020
3,687	4,330
3,828	4,490
3,892	4,570
3,980	4,690
4,068	4,790
4,243	5,010
4,506	5,330
4,667	5,520
4,944	5,870
5,432	6,470

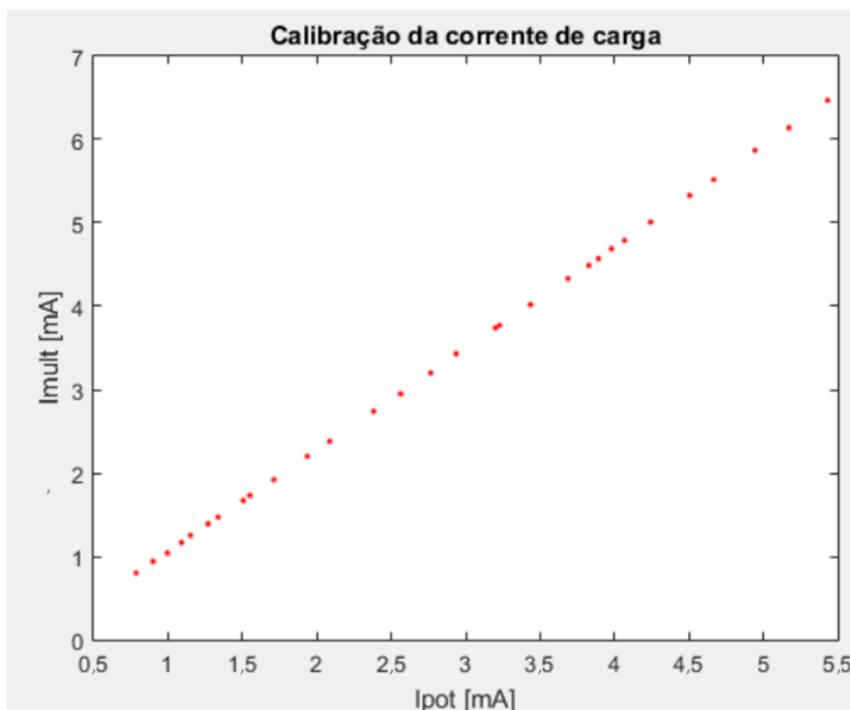


Figura 24 – Pontos coletados para a calibração da leitura de corrente

Novamente, efetuou-se uma regressão linear utilizando o método de mínimos quadrados. A Equação 27 define o valor de corrente corrigido em função do valor de corrente medido pelo potenciostato.

$$I_{corr} = 1,2185 \times I_{medido} - 0,1622 \quad (27)$$

As duas curvas de calibração foram implementadas no algoritmo referente ao microcontrolador para efetuar a correção antes da etapa de armazenamento dos dados mensurados.

### 3.8 – Características dos ensaios

Os ensaios de validação do instrumento foram realizados utilizando uma célula eletroquímica com três eletrodos, como apresentado na Fig. 25. Utilizou-se 600 ml de uma solução de NaCl 3,5 % em massa como eletrólito, uma amostra de aço inoxidável (1 x 1 x 4 cm) como eletrodo de trabalho, uma amostra de grafite como contra-eletrodo e um eletrodo de referência prata/cloreto de prata (Ag/AgCl 3M KCl).

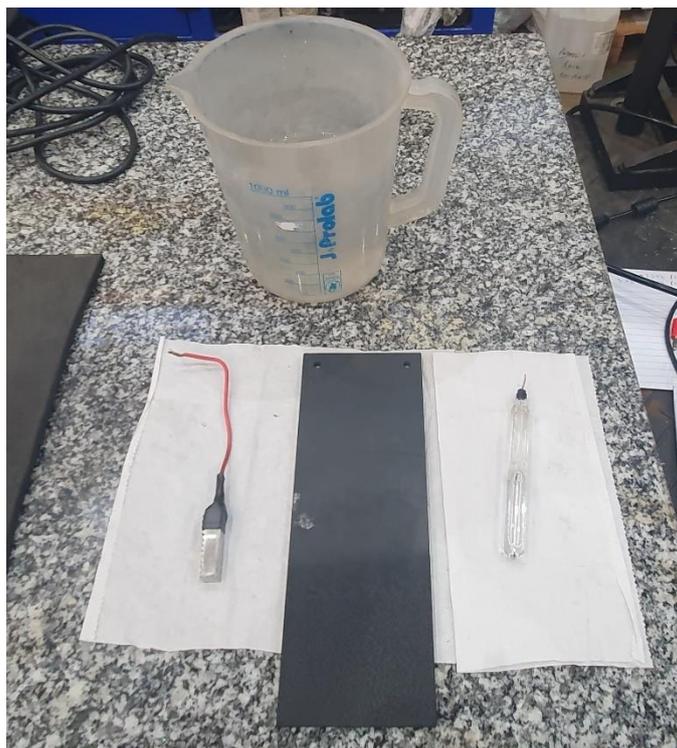


Figura 25 – Eletrodos e solução utilizados para a célula eletroquímica

Foi adotada uma metodologia que leva em consideração o funcionamento do potenciostato em diferentes períodos de tempo, de forma que se possa ter conhecimento do comportamento tanto da tensão entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, quanto da corrente elétrica que passa pela carga.

A Fig. 26 mostra o sistema de controle eletrônico desenvolvido, em que o AmpOp do potenciostato fornece uma corrente que é filtrada a nível CC, amplificada e medida por meio de um *shunt* antes de chegar à célula eletroquímica. A tensão entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência é medida com auxílio de um *buffer* e o sinal é enviado para uma das entradas do amplificador controlador para que se possa realizar a comparação com o valor de referência  $V_{in}$  definido.

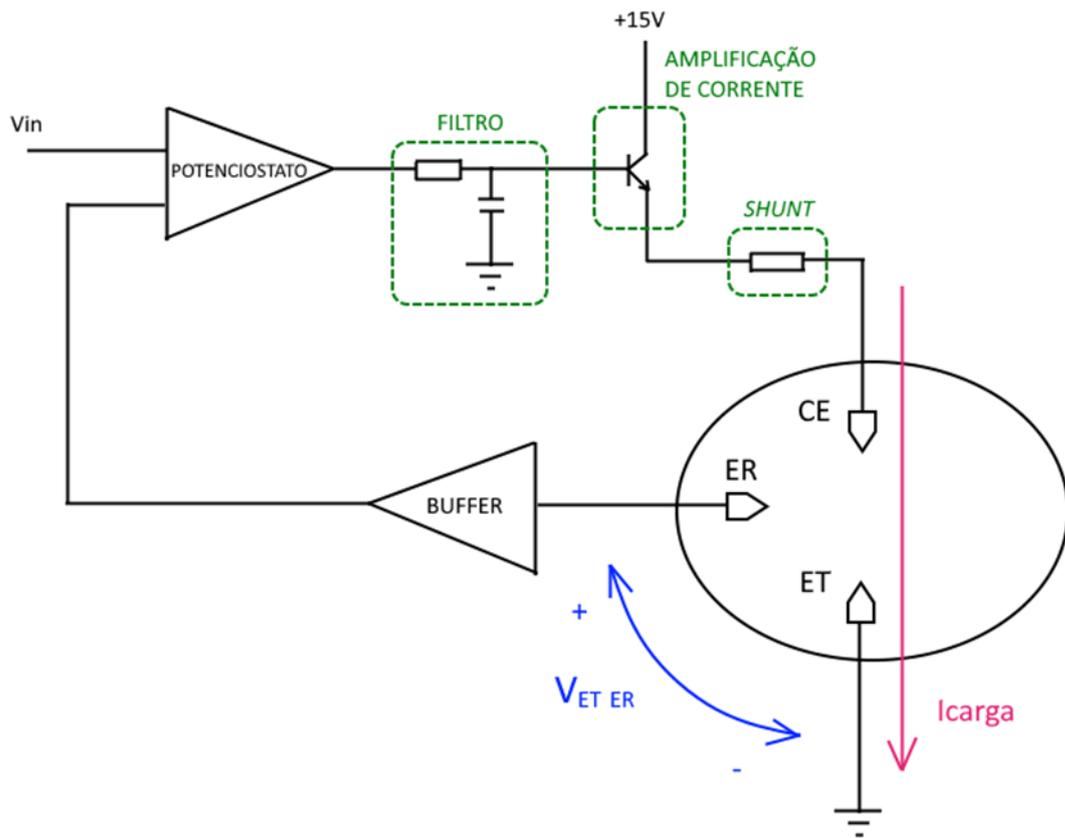


Figura 26 – Desenho esquemático do sistema de controle

Deve-se destacar que, para realizar uma análise sobre a reação eletroquímica da amostra de aço, tem-se interesse em medir o potencial elétrico da amostra de aço em relação ao potencial elétrico do eletrodo de referência de acordo com a Eq. 28. Desta forma, a tensão medida possui um sinal negativo uma vez que o eletrodo de trabalho está conectado ao GND do circuito.

$$V_{ET\ ER} = V_{ET} - V_{ER} \quad (28)$$

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DE RESULTADOS

Deve-se destacar que todas as curvas de ensaio obtidas foram realizadas com auxílio do *software* MatLab a partir dos dados salvos em um cartão SD Kingston de 16 Gb.

Para o primeiro ensaio de permeação de hidrogênio, foi adotado um controle de potencial de -1,1 V entre o eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência. A coleta de dados foi feita em um período de 30 segundos com duração total de 87 horas. A Fig. 27 mostra os valores da tensão entre os eletrodos dentro do intervalo de erro referente a 1 % do valor nominal e a corrente de carga medidos ao longo do tempo.

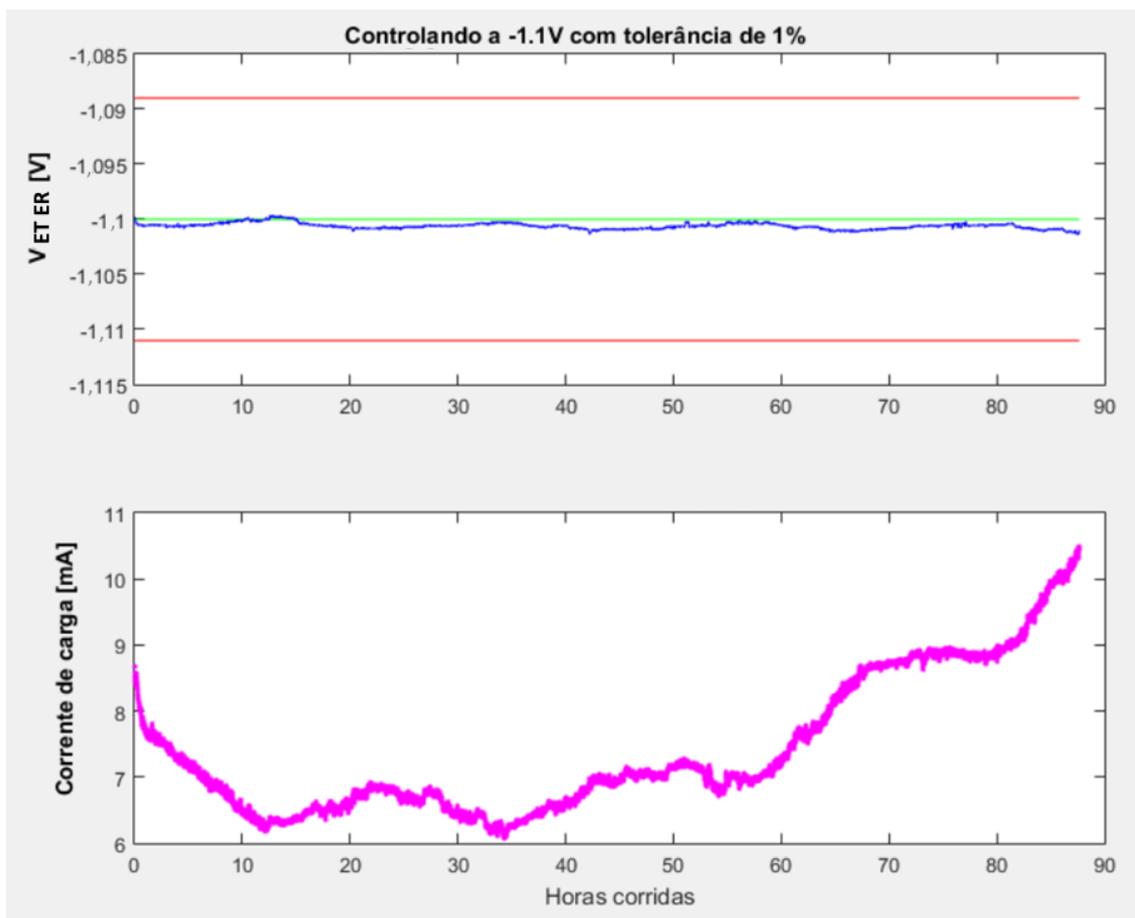


Figura 27 – Primeiro ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 87 horas)

Para o segundo ensaio, foi adotado um controle de potencial de -1,2 V entre o eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência. A coleta de dados foi feita em um período de 30 segundos com duração total de 64 horas. A Figura 28 mostra os valores da tensão entre os eletrodos dentro do intervalo de erro referente a 1 % do valor nominal e a corrente de carga medidos ao longo do tempo.

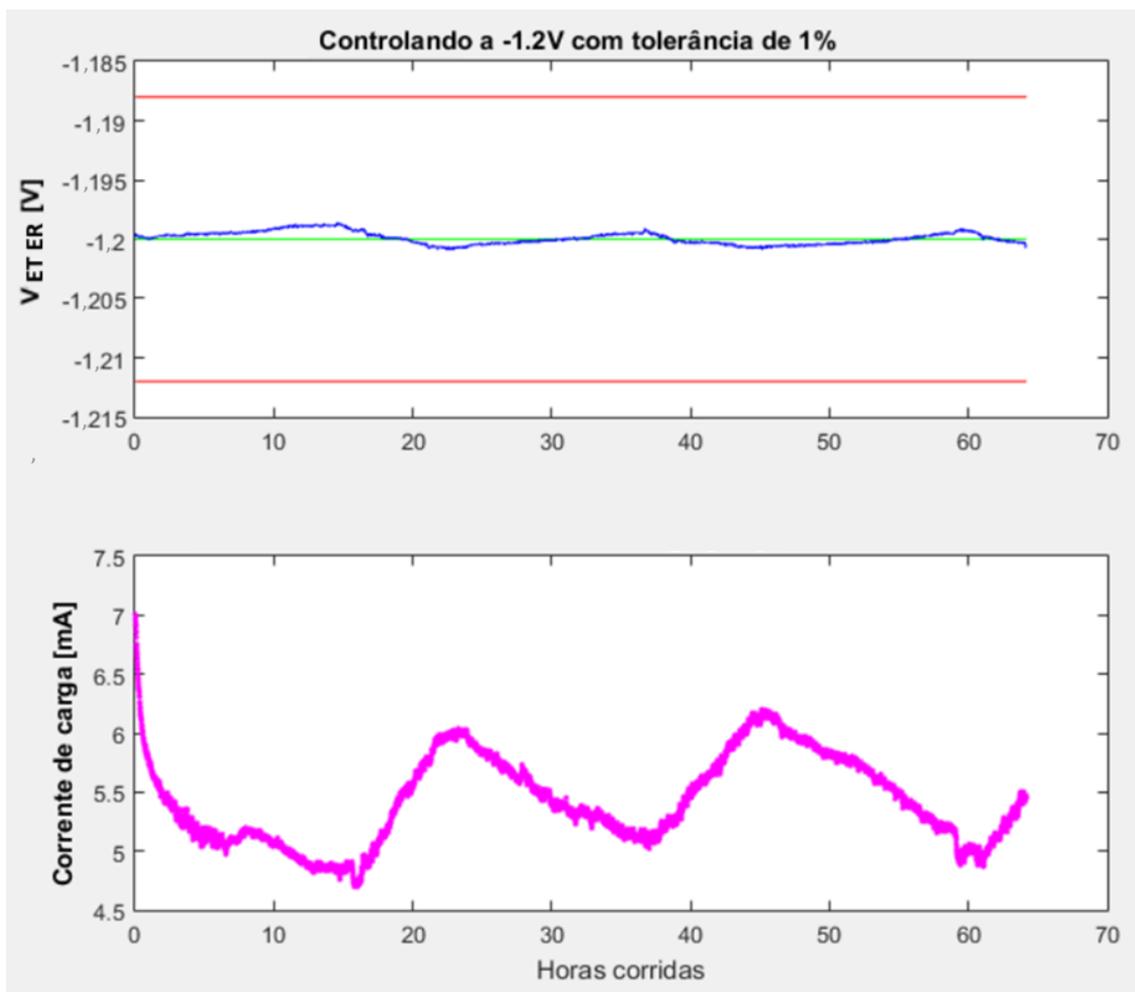


Figura 28 – Segundo ensaio (controle de potencial em -1,2 V por 64 horas)

O terceiro ensaio foi realizado levando em consideração a temperatura ambiente da cidade de Uberlândia (MG) com o objetivo de identificar uma possível relação com o comportamento da tensão controlada. Os dados foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) utilizando uma ferramenta de acesso ao banco de dados meteorológico da região.

De forma semelhante, foi adotado um controle de potencial de -1,1 V entre o eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência. A coleta de dados foi feita em um período de 30 segundos com duração total de 112 horas. A Figura 29 mostra os valores da tensão entre os eletrodos dentro do intervalo de erro referente a 1 % do valor nominal e a corrente de carga medidos ao longo do tempo.

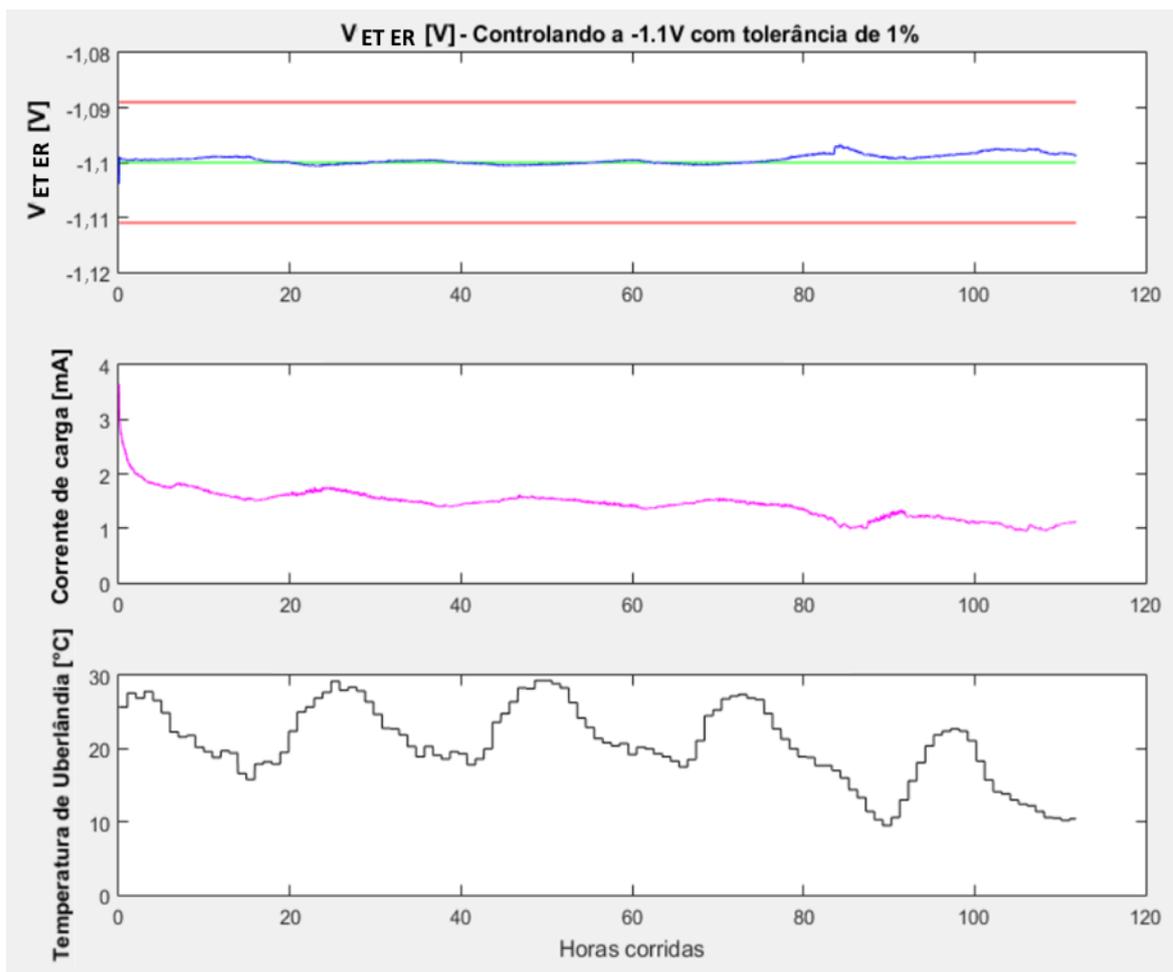


Figura 29 – Terceiro ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 112 horas levando em consideração a temperatura)

É notável a interferência do valor da temperatura ambiente da cidade no ensaio de fragilização dado que o comportamento periódico dos gráficos se sobrepõe. Torna-se possível a visualização de que a elevação da temperatura da região onde se encontra o equipamento provoca um aumento no valor de corrente de carga, que por sua vez controla o potencial entre o ET e ER em um valor abaixo do nominal.

Essa alteração pode ser explicada pela sensibilidade térmica dos valores de tensão gerados pelos reguladores da PCI. Entretanto, é possível observar que esta influência é insuficiente para gerar grandes distúrbios no valor de referência do sistema de controle.

Além disso, foi realizado um ensaio utilizando um equipamento de controle eletroquímico PGSTAT204 da Metrohm Autolab na configuração de potenciostato para verificar a coerência entre um dispositivo presente no mercado com o projeto elaborado. O manuseio do aparelho pode ser feito utilizando o *software* NOVA 2.0.

Para o quarto ensaio, foi adotado um controle de potencial de -1,1 V entre o eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência. A coleta de dados foi feita em um período de 30 segundos com duração total de 2 horas. O processo foi implementado no mesmo dia utilizando os dois dispositivos para verificar se há similaridade entre os parâmetros elétricos utilizando a mesma carga. A Figura 30 mostra os valores da tensão entre os eletrodos dentro do intervalo de erro referente a 1 % do valor nominal e a corrente de carga medidos ao longo do tempo para os dois equipamentos.

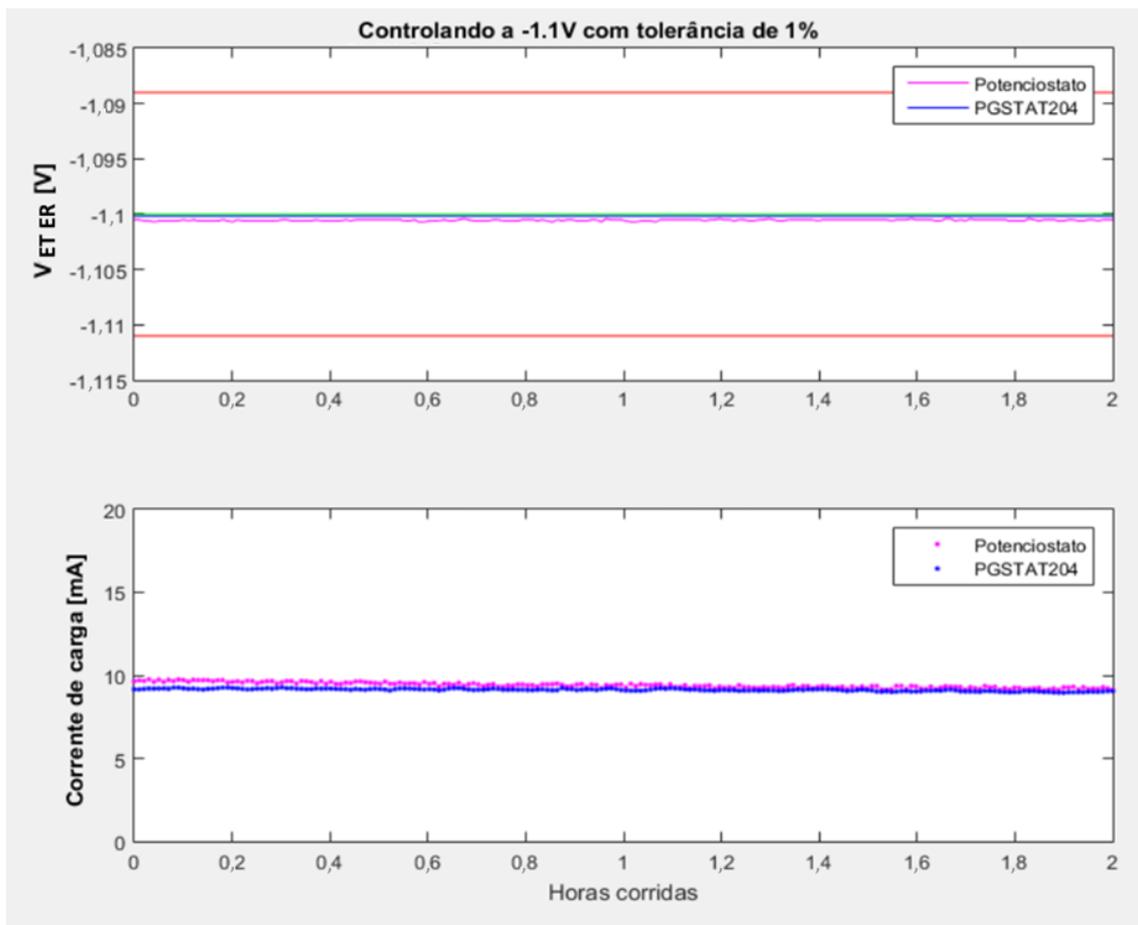


Figura 30 - Quarto ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 2 horas levando comparando os dois equipamentos)

De forma semelhante, o quinto ensaio foi realizado a partir de um controle de potencial de -1,1 V entre o eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência. A coleta de dados foi feita em um período de 30 segundos com duração total de 5 horas. O processo foi implementado no mesmo dia utilizando os dois dispositivos para verificar se há similaridade entre os parâmetros elétricos utilizando a mesma carga. A Fig. 31 mostra os valores da tensão entre os eletrodos dentro do intervalo de erro referente a 1 % do valor nominal e a corrente de carga medidos ao longo do tempo para os dois equipamentos.

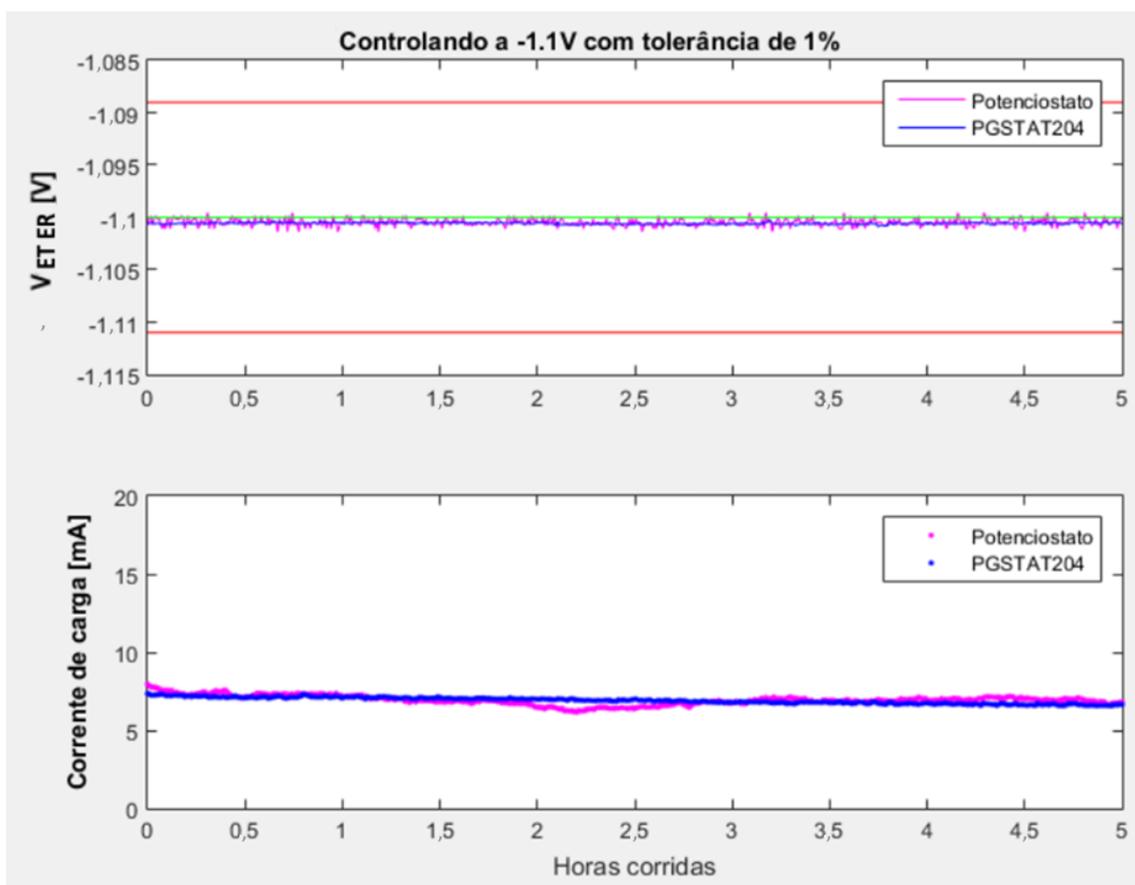


Figura 31 - Quinto ensaio (controle de potencial em -1,1 V por 5 horas levando em consideração a tolerância de 1% comparando os dois equipamentos)

A Tabela 6 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos levando em consideração o controle de potencial entre os eletrodos.

Tabela 6 – Resultados gerais e análise estatística dos ensaios

	Duração (h)	Tensão controlada (V)	Média (V)	Desvio padrão (V)	Valor Máximo (V)	Valor mínimo (V)
Ensaio 1	87	-1,1000	-1,1006	0,0003	-1,0996	-1,1014
Ensaio 2	64	-1,2000	-1,1999	0,0005	-1,1986	-1,2009
Ensaio 3	112	-1,1000	-1,0994	0,0008	-1,0968	-1,1039
Ensaio 4 (PGSTAT204)	2	-1,1000	-1,1005	0,0001	-1,1004	-1,1007
Ensaio 4 (Potenciostato)	2	-1,1000	-1,1002	0,0001	-1,1001	-1,1003
Ensaio 5 (PGSTAT204)	5	-1,1000	-1,1006	0,0001	-1,1003	-1,1009
Ensaio 5 (Potenciostato)	5	-1,1000	-1,1005	0,0003	-1,0995	-1,1014

Durante os ensaios descritos acima, foi possível observar a eletrólise da água por meio da quantidade de bolhas de gás hidrogênio presente na superfície do eletrodo de trabalho. Este efeito pode ser melhor visualizado para ensaios que demandam um valor elevado de corrente para gerar o controle do potencial da amostra.

Não houve problemas relacionados a corrompimento de arquivos durante a leitura e processamento dos dados.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível elaborar um sistema embarcado conectado a um potenciostato para realizar a coleta de dados de parâmetros elétricos de interesse do engenheiro que manuseia o equipamento de controle eletroquímico. A partir do estudo teórico, foi possível desenvolver uma placa de circuito impresso contendo o *chip* do microcontrolador ATmega328P configurado com o auxílio de um ambiente de programação disponibilizado pelo próprio site do Arduino.

Embora o sistema de coleta de dados tenha funcionado com êxito, notou-se grande complexidade na utilização de diversos módulos de comunicação conectados no mesmo barramento, o que demandou um estudo específico sobre a utilização de microcontroladores e protocolos de comunicação digital.

O projeto do potenciostato também teve que ser modificado de forma que fosse possível efetuar a comunicação entre um circuito analógico e outro digital, o que foi possível utilizando um conversor A/D de 16 *bits* que garantisse uma maior confiabilidade dos valores obtidos.

Uma vez realizada a calibração linear adequada utilizando um multímetro de precisão digital Keysight 3458A, foi possível realizar ensaios de fragilização controlando em diferentes valores de tensão de referência. O armazenamento de dados feito em cartão SD mostrou que o equipamento consegue controlar a diferença de potencial entre o ET e o ER durante dias e dentro de uma faixa de erro correspondente a 1% do valor nominal.

Além disso, o projeto final pode ser utilizado para estudar o comportamento variado da corrente elétrica que passa pela carga e o CE, assim como comparar com as curvas do funcionamento de potenciostatos mais robustos disponíveis no mercado. Deve-se também destacar os estudos que evidenciam a temperatura ambiente da cidade em que se realizou os ensaios como principal influente na ação de controle.

Desta forma, a partir do desenvolvimento bem sucedido do equipamento de baixo custo, é aberta a possibilidade da reprodução de dispositivos similares com as devidas melhorias e mudanças de projeto.

# CAPÍTULO 6

## TRABALHOS FUTUROS

Uma vez finalizadas as atividades, os seguintes itens são propostos como futuras tarefas de continuação do projeto:

1º) Integração de um circuito galvanostático.

- De forma análoga ao potenciostato, o circuito do galvanostato é responsável por controlar a corrente elétrica que passa pela carga.
- Possibilita a análise eletroquímica de outras condições de fragilização por hidrogênio.
- Utilização de uma chave seletora para definir o funcionamento do controlador.

2º) Interface de usuário dinâmica

- Elaboração de um painel de comandos para iniciar e interromper armazenamento de dados.
- Possibilidade de salvar mais de um ensaio no mesmo cartão SD.
- Análise estatística de ensaios salvos no cartão SD.

3º) Manutenção e novos equipamentos.

- Acompanhamento de ensaios dos potenciostatos já produzidos.
- Reparação e correção de circuitos conforme a demanda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **Multímetros Digitais de 6 ½ dígitos Agilent 34410A e 34411A**: Guia do Usuário. 2012. Disponível em: <<https://www.keysight.com/br/pt/assets/9018-05586/user-manuals/9018-05586.pdf>>. Acessado em: 10 nov. 2021.

ALAN, P. P. **Comunicação SPI**. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <[http://www.alan.eng.br/grad/microprocessadores/pratica8\\_spi.pdf](http://www.alan.eng.br/grad/microprocessadores/pratica8_spi.pdf)> Acessado em: 10 nov. 2021.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5 ed. Porto Alegre, 2013.

ATMEL CORPORATION. **Datasheet ATmega328P: High Performance, Low-Power, 8-bit Microcontroller**. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html>>. Acessado em: 10 nov. 2021.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **Datasheet DS3231: Extremely Accurate I2C-Integrated RTC**. Disponível em: <<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/112132/DALLAS/DS3231/215/1/DS3231.html>>. Acessado em: 10 nov. 2021.

DANIEL M. **Protocolo I2C – Comunicação entre Arduinos**. 2017. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/i2c-comunicacao-entre-arduinos/>> Acessado em: 10 nov. 2021.

DIEGO M. **Arquitetura Von-Neumann Vs Harvard**. 2012. Disponível em: <<https://www.diegomacedo.com.br/arquitetura-von-neumann-vs-harvard/>> Acessado em: 10 nov. 2021.

EMILIO, M. P. **Data Acquisition Systems: From Fundamentals to Applied Design**. 1 ed, 2013.

GRUPO DE ESTUDOS EM ROBÓTICA. **Introdução ao Arduino**. Disponível em: <<http://www.gerunicamp.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Apostila-GER.pdf>> Acessado em 10 nov. 2021.

GUILHERME, A. M. **Projeto de um conversor analógico-digital de baixo consumo utilizando a transformada Wavelet**, Universidade de Brasília, 2018. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20494/1/2018\\_GuilhermeAraujoMattos\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20494/1/2018_GuilhermeAraujoMattos_tcc.pdf)> Acessado em 10 nov. 2021.

HENRIQUE, F. W. P. **Trazendo o mundo real para dentro do processador – Conversor A/D**, 2015. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>> Acessado em 10 nov. 2021.

INSTRUMATIC, **Sistema de supervisão e aquisição de dados**, 2011. Disponível em: <<https://www.instrumatic.com.br/artigo/sistemas-de-supervisao-e-aquisicao-de-dados>> Acessado em 10 nov. 2021.

KARINE R. S. **Projeto de um modulador A/D do tipo  $\Sigma\Delta$  de baixo consumo de potência aplicado em marca passo**, Universidade de Brasília, 2017. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20239/1/2017\\_KarineRibeirodosSantos.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20239/1/2017_KarineRibeirodosSantos.pdf)> Acessado em: 10 nov. 2021.

MALVINO, A. P. **Eletrônica – Vol 1 e 2**. 8 ed, 2016.

MANUEL, B. **Sistema de aquisição de dados**. Departamento de Informática. Disponível em: <[http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/maeb/im/Teorica\\_Bibliografia/Cap\\_E\\_Sistemas%20de%20Aquisi%C3%A7%C3%A3o%20de%20Dados/1-Introdu%C3%A7%C3%A3o/Texto%20de%20Estudo%20-%20Sistemas%20de%20Instrumenta%C3%A7%C3%A3o-%20Capitulo%204.pdf](http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/maeb/im/Teorica_Bibliografia/Cap_E_Sistemas%20de%20Aquisi%C3%A7%C3%A3o%20de%20Dados/1-Introdu%C3%A7%C3%A3o/Texto%20de%20Estudo%20-%20Sistemas%20de%20Instrumenta%C3%A7%C3%A3o-%20Capitulo%204.pdf)> Acessado em 10 nov. 2021.

METROHM, **Autolab application note EC08: Basic overview of the working principle of a potentiostat/galvanostat (PGSTAT) – Electrochemical cell setup**. 2011. Disponível em: <[https://www.ecochemie.nl/download/Applicationnotes/Autolab\\_Application\\_Note\\_EC08.pdf](https://www.ecochemie.nl/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_EC08.pdf)> Acessado em 10 nov. 2021.

NEWTON C. B. **Como funcionam os conversores A/D**. 2010. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1508-conversores-ad>> Acessado em 10 nov. 2021.

NEWTON C. B. **Conhecendo o cerne do microcontrolador ATmega328P Arduino UNO**. 2018. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontrolador/138-atmel/14863-conhecendo-o-cerne-do-microcontrolador-atmega328p-arduino-uno-mic165>> Acessado em 10 nov. 2021.

OSCAR, R. M.; MARIANO, S. S. **Um potenciostato/galvanostato rápido de projeto nacional**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/Nt00183.2010\\_11\\_04\\_17\\_26\\_38.pdf](http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/Nt00183.2010_11_04_17_26_38.pdf)> Acessado em 10 nov. 2021.

PENIDO, É. C. C.; TRINDADE, R. S. **Microcontroladores**. Ouro Preto, 2013.

PT COMPUTADOR, **A história do microcontrolador**. Disponível em: <[ptcomputador.com/Ferragens/computer-drives-storage/47399.html](http://ptcomputador.com/Ferragens/computer-drives-storage/47399.html)> Acessado em 10 nov. 2021.

ROWE, A. A.; BONHAN, A. J.; WHITE, R. J.; YADGAR, R. J. **CheapStat: An Open-Source, “Do-It-Yourself” Potentiostat for Analytical and Educational Applications**. 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet ADS1115: Ultra-Small, Low-Power, 16-bit, Analog-to-Digital Converter with Internal Reference**. Disponível em: <<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/292735/TI/ADS1115/24/1/ADS1115.html>>. Acessado em: 10 nov. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet PCF8574: Remote 8-bit I/O expander for I2C bus.** Disponível em: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/350292/TI/PCF8574/24/1/PCF8574.html>. Acessado em: 10 nov. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet LM741: Operational Amplifier.** Disponível em: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/350292/TI/PCF8574/24/1/PCF8574.html>. Acessado em: 10 nov. 2021.

V. V. S. AZEVEDO; H. S. COSTA; D. D. COSTA, **Circuito potenciostático para avaliação de alimentos**, 2016. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/sbctars-eventos/xxvcbcta/anais/files/831.pdf> Acessado em 10 nov. 2021.

## APÊNDICE A – Algoritmo implementado no microcontrolador ATmega328P

```
#####  
#####//  
  
//          SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA POTENCIOSTATOS  
//  
//                      //  
  
//          Desenvolvedor: Augusto Perez de Andrade          //  
  
#####  
#####//  
  
#include <Wire.h>  
#include <DS3231.h>  
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  
#include <Adafruit_ADS1X15.h>  
#include<SPI.h>  
#include<SD.h>  
  
File myFile;  
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);  
Adafruit_ADS1115 ads;  
DS3231 clock;  
  
#####          CONFIGURAÇÃO          DO  
POTENCIOSTATO #####//  
  
byte PO = 18;  
  
#####  
#####//  
  
##### CONFIGURAÇÃO DO RELÓGIO (entre 18h e  
19h)#####//  
  
byte Hour = 8, Minute = 31, Second = 3, HoraAlt = 8;  
  
#####  
#####//  
  
int j = 0, C = 100, CSD = 1;  
byte k = 0, i = 0, H = 0, M = 0, S = 0;  
float Vwere = 0.0, I carga = 0.0, leitura = 0.0;  
bool h12Flag;  
bool pmFlag;  
  
void printc(byte x){
```

```

if (x < 10){
  lcd.print("0");
}
lcd.print(x);
}

void setup() {

  Wire.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  ads.begin();

  if (clock.getHour(h12Flag, pmFlag) == HoraAlt){
    clock.setHour(Hour);
    clock.setMinute(Minute);
    clock.setSecond(Second);
  }

  if (!SD.begin(4)) {
    CSD = 0;
  }

  myFile = SD.open("Hora.txt", FILE_WRITE);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Minuto.txt", FILE_WRITE);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Segundo.txt", FILE_WRITE);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Vwere.txt", FILE_WRITE);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Icarga.txt", FILE_WRITE);
  myFile.close();
}

void loop() {

  H = clock.getHour(h12Flag, pmFlag);
  M = clock.getMinute();
  S = clock.getSecond();

  ads.setGain(GAIN_TWO);
  Vwere = 0.0;
  for(j = 0; j <= C; j++){
    leitura = ads.readADC_SingleEnded(1);
    Vwere = Vwere + leitura/C;
  }
  Vwere = 0.5*5*(Vwere/32768);
}

```

```

Vwere = 0.8065*(Vwere)+0.0111;    //Calibração de Vwere
Vwere = (-1)*(Vwere);

ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);
Icarga = 0.0;
for(j = 0; j <= C; j++){
leitura = ads.readADC_SingleEnded(2);
Icarga = Icarga + leitura/C;
}
Icarga = (3/2)*(1000/195.8)*5*(Icarga/32768);
Icarga = 1.2185*(Icarga)-0.1622;    ///Calibração de Icarga

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("    PO ");
printc(PO);
if (CSD == 0){
    lcd.print(" #");
}
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("    ");
printc(H);
lcd.print(":");
printc(M);
lcd.print(":");
printc(S);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Vwe/re: ");
lcd.print(Vwere,4);
lcd.print(" [V] ");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Icarga: ");
lcd.print(Icarga,3);
lcd.print(" [mA] ");

if(S == 28 && k == 0){

    lcd.setCursor(19,0);
    lcd.print("*");
    myFile = SD.open("Hora.txt", FILE_WRITE);
    myFile.println(H);
    myFile.close();
    myFile = SD.open("Minuto.txt", FILE_WRITE);
    myFile.println(M);
    myFile.close();
    myFile = SD.open("Segundo.txt", FILE_WRITE);
    myFile.println(S);
    myFile.close();
    myFile = SD.open("Vwere.txt", FILE_WRITE);
    myFile.println(Vwere, 4);
    myFile.close();
}

```

```

myFile = SD.open("Icarga.txt", FILE_WRITE);
myFile.println(Icarga, 3);
myFile.close();
k = k + 1;

}

if(S == 29 || S == 30){

  lcd.setCursor(19,0);
  lcd.print(" ");
  k = 0;

}

if(S == 58 && k == 0){

  lcd.setCursor(19,0);
  lcd.print("*");
  myFile = SD.open("Hora.txt", FILE_WRITE);
  myFile.println(H);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Minuto.txt", FILE_WRITE);
  myFile.println(M);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Segundo.txt", FILE_WRITE);
  myFile.println(S);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Vwere.txt", FILE_WRITE);
  myFile.println(Vwere, 4);
  myFile.close();
  myFile = SD.open("Icarga.txt", FILE_WRITE);
  myFile.println(Icarga, 3);
  myFile.close();
  k = k + 1;

}

if(S == 59 || S == 0){

  lcd.setCursor(19,0);
  lcd.print(" ");
  k = 0;

}

delay(500);

}

```

## APÊNDICE B – Certificado de calibração do multímetro Keysight 3458A

 <b>KEYSIGHT TECHNOLOGIES</b>	Keysight Technologies Malaysia Sdn Bhd (463532-M) Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang, Malaysia	 3982-0478
--	---	--

### Certificate of Calibration

ANSI/NCSL Z540-1-1994

**Certificate No:** PENANG4448322-5467256-1

**Manufacturer:** Keysight Technologies

**Description:** 8-1/2 Digit Multimeter

**Model No:** 3458A

**Serial No:** MY59351783

**Options Installed With Specifications:** 002

**Date of Calibration:** 19-FEB-2021

**Temperature:** (23 ± 0.5) °C

**Humidity:** (30 to 50)% RH

**Procedure:** 3458A.CAL.N01

This certifies that the equipment has been calibrated using applicable Keysight Technologies procedures and in compliance with ISO/IEC 17025:2017 and ANSI/NCSL Z540-1-1994. The quality management system is registered to ISO 9001:2015.

**As Received Conditions:** Factory tested. No incoming data available.

**Action Taken:**

- No corrective actions were necessary.

**As Shipped Conditions:** At the completion of the calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested.

**Remarks or special requirements:**

This calibration includes the attached measurement report with report number 2303A10494.

**Notes:**

- 1.This calibration report may refer to equipment manufactured by HP, Agilent and Keysight as being manufactured by Keysight Technologies, Inc.
- 2.The test limits stated in the calibration report correspond to the published specifications of the equipment, at the points tested.
- 3.The documented test results relate to the equipment tested only.
- 4.This calibration report shall not be reproduced, except in full

**Traceability Information:** Measurements are traceable to the International System of Units (SI) via national metrology institutes ([www.keysight.com/find/NMI](http://www.keysight.com/find/NMI)) that are signatories to the CIPM Mutual Recognition Arrangement.

**Uncertainty of Measurement**

The uncertainty evaluation has been performed in accordance with ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM). The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k such that the coverage probability corresponds to approximately 95 %. This probability corresponds to a coverage factor of k=2 for a normal distribution.

**Print Date:** 19-FEB-2021

Keysight Technologies					
	DC	MM	YY	BY	
CAL	10	03	21	2A	
DUE					

  
 Tay Eng Su  
 Quality Manager



**KEYSIGHT**  
TECHNOLOGIES

Keysight Technologies Malaysia Sdn Bhd (463532-M)  
Bayan Lepas Free Industrial Zone  
11900 Penang, Malaysia



595-2416

## Certificate of Calibration

ANSI/NCSL Z540-1-1994

**Certificate No:** PENANG4448322-5467256-1

### Calibration Equipment Used

<u>Model Number</u>	<u>Model Description</u>
FLU 5720A	Calibrator
33250A	Func/Arb Waveform Generator
3456A	8-1/2 Digit Multimeter

*Date Used: Date equipment used in this calibration*

<u>Equipment ID</u>	<u>Date Used</u>	<u>Cal Due Date</u>
PN020003	19-FEB-2021	02-DEC-2021
PM01165	19-FEB-2021	17-JAN-2022
PM00463	19-FEB-2021	25-FEB-2021