

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS TIMÓTEO**

Marlon Bueno Félix

**AUTOMAÇÃO DE UM POTENCIOSTATO DIGITAL PARA ESTUDOS  
DE ENSAIO DE CORROSÃO**

**Timóteo**

**2018**

**Marlon Bueno Félix**

**AUTOMAÇÃO DE UM POTENCIOSTATO DIGITAL PARA ESTUDOS  
DE ENSAIO DE CORROSÃO**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

2018

**Marlon Bueno Felix**

**AUTOMAÇÃO DE UM POTENCIOSTATO DIGITAL PARA ESTUDOS  
DE ENSAIO DE CORROSÃO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Campus Timóteo, como requisito parcial de obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

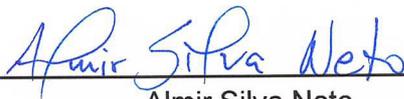
Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Trabalho aprovado. Timóteo, 17 de dezembro de 2018.



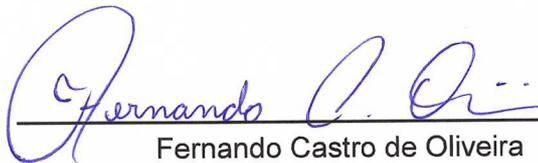
---

Rodrigo Gaiba de Oliveira  
Orientador



---

Almir Silva Neto  
Co-orientador



---

Fernando Castro de Oliveira  
Professor convidado

Timóteo  
2018

Dedico este trabalho à  
minha família.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado essa vitória, após uma longa jornada, carregando me nos braços nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, por todas as orações, apoio e ensinamentos, que são fundamentais para o meu crescimento.

À minha querida esposa Brenda, pela compreensão, amor, dedicação. Por seu encorajamento constante em minha caminhada. Pelo ombro amigo, que muitas vezes me serviu como aconchego. À minha irmã, por todo carinho, incentivo e por entender minha ausência. Mesmo estando longe sempre esteve comigo, acreditando em meu potencial.

Aos meus familiares e amigos, que direta ou indiretamente, contribuíram para essa conquista.

Aos meus orientadores, pela arte de ensinar. Por nos desafiar e acreditar em nossa capacidade de aprender sempre mais. Obrigado pela confiança, sabedoria e conhecimento dedicados para a conclusão deste trabalho.

*“A vida é um grande espetáculo.  
Só não consegue homenageá-la quem nunca penetrou dentro do seu próprio ser e percebeu  
como é fantástica a construção da sua inteligência”.*  
*Augusto Cury*

# Resumo

O propósito deste trabalho é estruturar um sistema para automatizar o processo de coleta de dados, com informações da diferença de potencial, fornecida por um potenciostato ou galvanostato. A técnica utilizada será a voltametria cíclica, método eletroquímico que analisa o comportamento de um metal ou liga, através da relação entre a corrente e tensão durante a eletrólise. As reações químicas ocorrem na medida em que fornecem a energia elétrica, sendo assim, é um processo não espontâneo e transforma energia elétrica em reação química. O CEFET-MG Campus Timóteo possui um equipamentos que realiza esses ensaios de corrosão, porém, não dispõe da tecnologia apropriada para facilitar a coleta dos resultados. Diante desse cenário, foi inserido um microcontrolador Arduino através de uma comunicação serial com computador para realizar a digitalização dos dados e coletar em um arquivo. A fim de aperfeiçoar o experimento que era feito manualmente com incessantes anotações.

**Palavras-chave:** técnica eletroquímica, Arduino, microcontrolador, potenciostato, automatização, voltametria.

# Abstract

The purpose of the work is to structure an automated data collection system with information on the potential difference provided by a potentiostat or galvanostat. The techniques used will be cyclic voltammetry, electrochemical method that analyzes the behavior of a metal or alloy, through the relationship between current and voltage during electrolysis. Chemical reactions occur to the extent that they provide the electricity, so it is a non-spontaneous process and transforms electric energy into a chemical reaction. However, at the CEFET-MG Timóteo Campus, there is equipment that performs these corrosion test but does not have the appropriate technology to facilitate the collection of results. In view of this scenario, an Arduino microcontroller was inserted through a serial communication with computer to carry out a scan of the data. The system will be perfected without human interaction for annotations.

**Key words:** electrochemical technique, Arduino, microcontroller, potentiostat, automation, voltammetry.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Protótipo montado para teste dos circuitos atuadores . . . . .	15
Figura 2 – Instrumentação utilizada nas medidas voltamétricas com o potenciostato opto-acoplado . . . . .	16
Figura 3 – Sistema integrado com controle centralizado . . . . .	16
Figura 4 – Configuração de um sistema envolvendo três eletrodos . . . . .	19
Figura 5 – Esquema mostrando a célula conectada a um sistema potenciostático . . . . .	20
Figura 6 – Voltametria cíclica . . . . .	21
Figura 7 – Varrimento catódico após um tempo de polarização ( $t_f$ ) ao anódico ( $E_f$ ) . . . . .	21
Figura 8 – Apresenta um voltamograma cíclico (VC) típico de um processo redox reversível, envolvendo espécies solúveis e um eletrodo de trabalho inerte . . . . .	22
Figura 9 – Representação esquemática de um experimento de voltametria cíclica . . . . .	22
Figura 10 – Representação de um sinal analógico para digital com ondas triangulares . . . . .	23
Figura 11 – Arranjo esquemático do potenciostato conectado aos eletrodos na célula eletrolítica . . . . .	25
Figura 12 – Arranjo esquemático do potenciostato conectado aos eletrodos na célula eletrolítica . . . . .	26
Figura 13 – Potenciostato/Galvanostato (FAC - 200A) . . . . .	27
Figura 14 – Arduino UNO . . . . .	28
Figura 15 – Especificações do Arduino . . . . .	28
Figura 16 – Amplificador somador inversor . . . . .	29
Figura 17 – Representação do circuito integrado TL 074 . . . . .	30
Figura 18 – Célula eletrolítica composta pelos eletrodos . . . . .	31
Figura 19 – Sistema montado para o experimento . . . . .	32
Figura 20 – Osciloscópio . . . . .	32
Figura 21 – Gráfico prática 1 . . . . .	33
Figura 22 – Gráfico prática 2 . . . . .	34
Figura 23 – Esquema do sistema após a implantação do Arduino . . . . .	35
Figura 24 – Amplificador - tensão . . . . .	36
Figura 25 – Amplificador - corrente . . . . .	36
Figura 26 – Esquema do sistema montado no protoboard . . . . .	37
Figura 27 – Monitor serial . . . . .	38

# Lista de símbolos

<i>V</i>	Tensão
<i>m</i>	Mili
<i>k</i>	Quilo
<i>s</i>	Segundos
<i>min</i>	Minutos
<i>h</i>	Horas
<i>A</i>	Amperes
<i>AC</i>	Corrente alternada
<i>PCI</i>	Placa de circuito impresso
<i>E/S</i>	Entrada e saída
<i>GPU</i>	Graphics Processing Unit (unidade de processamento grafico)
<i>ET</i>	Eletrodo de trabalho
<i>ER</i>	Eletrodo de referência
<i>CE</i>	Contra-eletrodo
<i>USB</i>	Universal Serial Bus
<i>ICSP</i>	In Circuit Serial Programming
<i>IDE</i>	Integrated Development Environment (ambiente de desenvolvimento integrado)
<i>VCC</i>	Voo circular coordenado
<i>GNDT</i>	Graduado de densidade neutra
<i>M</i>	Mega
<i>Hz</i>	Hertz
<i>PCB</i>	Printed circuit board
<i>UF</i>	Micro Farad
$\Omega$	Ohm
<i>l</i>	Litros

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Motivação	12
1.2	Problema	13
1.3	Objetivo	13
1.4	Apresentação da monografia	13
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
3.1	Corrosão	18
3.2	Voltametria	18
3.3	Voltametria cíclica	20
3.4	Célula eletrolítica	24
3.5	Potencial de corrosão	24
3.6	Galvanização	25
<b>4</b>	<b>APARELHAGEM</b>	<b>27</b>
4.1	Medições eletroquímicas	27
4.2	Arduino	27
4.2.1	Arduino Uno	28
4.2.2	IDE e linguagem de programação	29
4.3	Amplificador operacional	29
4.4	Circuito integrado TL074	30
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>31</b>
5.1	Funcionamento do processo	31
5.2	Primeira prática	32
5.3	Segunda prática	33
5.4	Implantação do microcontrolador	34
5.5	Amplificador	34
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>39</b>
7.1	Contribuições	39
7.2	Trabalhos futuros	39
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>
<b>A</b>	<b>CÓDIGO DE INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>42</b>

# 1 Introdução

Desde os antepassados, o homem vem descobrindo diferentes maneiras de transformar e trabalhar com os metais, que vêm sendo utilizados fortemente em vários segmentos. Contudo, constitui-se uma grande barreira para a evolução de suas descobertas a corrosão do metal, que causa prejuízos econômicos e insegurança, sobretudo nas áreas industriais. Segundo (GENTIL, 1996) a “corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Em nosso cotidiano nos deparamos com várias situações em que a corrosão está presente, quer seja em ambientes domésticos ou industriais. Em nossa residência, ela é responsável pela deterioração de eletrodomésticos e utensílios. Nas indústrias está em vários âmbitos, tais como, equipamentos, tubulações e maquinários. Em outros meios, a corrosão afeta a sociedade de várias maneiras: manutenção preventiva, ferroviário, transportes aéreos, marítimo, meios de comunicação, na medicina, contaminação de produtos, em obras, etc.

Para evitar perdas contra a corrosão são realizados experimentos com o objetivo de criar técnicas e metodologias para proteção anticorrosiva. Como é o caso da eletroanalítica, fortemente utilizada em experimentos para estudos fundamentais de corrosão e outros. Dentro da eletroanalítica existem técnicas para melhorar a resistência e proteções dos materiais, sendo uma delas, a voltametria. Essa técnica lida com processos não espontâneos, ou seja, provoca uma influência externa para acelerar os resultados, uma vez que, a corrosão é um processo espontâneo e não ocorre rapidamente, pois apresenta uma maneira natural de acontecer. Então, sem a faísca responsável pela energia de ativação, a reação não ocorrerá. Sendo assim, os meios responsáveis por criar produtos anticorrosivos utilizam processos não espontâneos para acelerar os experimentos e obter resultados mais rápidos, demonstrando ao cliente o quanto o material é resistente a corrosão. O que, por sua vez, poderia demorar dias, anos ou até mesmo séculos.

A voltametria é uma técnica da eletroquímica onde se aplica uma corrente potencial nos eletrodos para produzir uma reação química, variando em velocidade constante em função do tempo. Se baseia na medida da corrente em função do potencial aplicado no eletrodo. Dentro da voltametria, temos a voltametria cíclica que de acordo com (FONSECA; PROENÇA; CAPELO, 2015) “é reconhecida, desde a década de 80 do século passado, como um dos métodos eletroquímicos mais populares que pode dar uma visão global dos processos que resultam de reações redox, que possam ocorrer num eletrodo reativo (metal ou liga), por efeito da polarização eletroquímica”. A reação redox é um tipo de reação química conhecida também como reação de oxidação-redução. Essa reação envolve transferência de elétrons, onde, na redução tende a ceder elétrons e na oxidação tende a receber elétrons. A voltametria é utilizada com intuito de avaliar a resistividade de um objeto metálico, através de ensaios submetido a correntes e tensões aplicadas sobre ele.

A corrosão eletrolítica se caracteriza por ser um processo eletroquímico, que se dá com a aplicação de corrente elétrica externa, ou seja, trata-se de uma corrosão não espontânea, (MERCON; GUIMARÃES; MAINIER, 2004). Esta técnica é empregada para apoiar o meio produtivo na obtenção rápida de taxas de corrosão de metais em meios específicos e para avaliar informações para aplicar técnicas de proteções contra a corrosão. De acordo com (GENTIL, 1996), o processo espontâneo está constantemente transformando os materiais metálicos, de modo que sua durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. No seu todo, esse fenômeno assume uma importância transcendental na vida moderna, que não pode prescindir dos metais e suas ligas.

Dessa forma, desde as primeiras configurações experimentais até os dias atuais, os sistemas eletroquímicos vêm recebendo substanciais contribuições dos avanços, não só da química, mas, em especial, da eletrônica. Componentes miniaturizados, robustos e versáteis, com baixo custo, transformam sistemas inicialmente complexos em equipamentos portáteis, leves, de fácil uso em qualquer situação, (PACHECO et al., 2013)".

Os ensaios são realizados utilizando equipamentos específicos, as vezes antigos, e que caíram em desuso devido o avanço da tecnologia. A automação é uma realidade para melhorar o desempenho e utilização desses equipamentos. No entanto, foi proposto automatizar o sistema de ensaio eletroquímico realizado no laboratório do CEFET-MG campus Timóteo, uma vez que são realizados com dificuldades por terem limitações, sendo uma delas, informações gravadas em um banco de dados. Os usuários estão cada vez mais acostumados com a tecnologia, processos com respostas mais rápidas e dados mais fáceis de serem interpretados. Foi estudada uma forma de automatizar o processo para efetuar a coleta dos dados, incluindo uma tecnologia de maior integração, o que otimiza diretamente o rendimento, com maior agilidade na comunicação e na tomada de decisão. Em vista disso, foi desenvolvido um sistema utilizando um microcontrolador conectado a um computador, permitindo experimentos mais confiáveis e com maior controle do processo.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado capaz de realizar leitura dos dados do processo por meio de um microcontrolador, eliminando a interação humana em parte do experimento. Para tanto, é utilizado como base do projeto, o Arduino, que é uma plataforma embarcada de código fonte livre. "Em resumo, é uma placa simples com entradas e saídas (BANZI, 2011)", e que oferece uma tecnologia de custo muito baixo, podendo ser usada na concepção de projetos baseados em microcontrolador (MONK, 2017).

## 1.1 Motivação

Grande parte das organizações, têm suas dificuldades nas atividades por não adequarem o processo de forma automática. Portanto, a motivação deste trabalho é poder contribuir para melhoria da qualidade e eficiência no experimento de ensaio de corrosão que será realizado no CEFET-MG Campus Timóteo.

## 1.2 Problema

Durante o experimento eletrolítico as informações são essenciais para o resultado final, sendo necessário recolher os dados do potencial aplicado nos eletrodos (tensão e corrente) pelo potenciostato ou galvanostato, variando em uma velocidade em função do tempo. A leitura dos dados é realizada de forma contínua, lida e anotada pelo executante. O que leva aos principais contratempos a serem solucionados, isto é, realizar a leitura e manusear os equipamentos paralelamente.

O potenciostato/galvanostato e o gerador de frequência são conectados durante o experimento. As informações geradas durante o ensaio não são mostradas e tão pouco guardadas em um arquivo digital. Elas são colhidas utilizando o multímetro e arquivadas conforme as anotações do executante, dificultando a realização do experimento por uma única pessoa. Para criar esse sistema em hardware e software é necessário conhecimento, por meio de técnicas apropriadas, tais como: eletrônica, programação, química e outras.

## 1.3 Objetivo

Objetivo principal deste trabalho consiste em estruturar um sistema automático utilizando um microcontrolador Arduino. A fim de fornecer informações para orientar o usuário com dados de tensão e corrente produzidos pelo processo eletroquímico, digitalizando e enviando as informações para o computador, proporcionando um aumento significativo de amostragem durante o processo.

## 1.4 Apresentação da monografia

Esta monografia está estruturada conforme a seguir:

O capítulo 1 trata-se da introdução do trabalho, apresentando o tema abordado, a motivação, o problema e objetivo do projeto.

No capítulo 2 descreve o estado da arte. Neste capítulo são mencionadas as ferramentas de apoio a técnicas do experimento, também pesquisas referentes a automatização de processos utilizando um microcontrolador.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica do projeto. Neste capítulo são explicadas as técnicas do experimento, sobre a corrosão, voltametria, voltametria cíclica, célula eletrolítica, potencial de corrosão e galvanização.

No capítulo 4 são apresentados os conjuntos de aparelhos ou instrumentos necessários para realizar os ensaios eletroquímicos. Sendo eles: potenciostato/galvanostato, microprocessador Arduino e o amplificador utilizado.

No capítulo 5 é apresentado o funcionamento do processo. Onde demonstra a informação da coleta dos dados das práticas anterior e após a implementação do projeto. Cada prática é descrita como foi realizada.

No capítulo 6 são apresentados os resultados após a implantação do projeto, demonstrando a eficácia dos dados da amostragem realizada.

No capítulo 7 é apresentada a conclusão após a automação do sistema. Tornando os processos, ao longo do tempo, mais ágeis e produtivos. São apresentados também as contribuições e trabalhos futuros para complementação do projeto.

No capítulo 8 são apresentadas às referências.

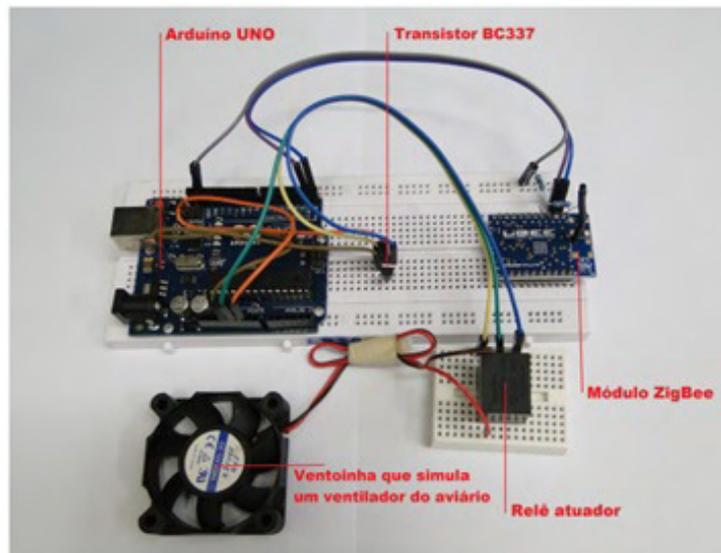
No apêndice A é apresentado o código de inicialização do sistema.

## 2 Estado da Arte

Em se tratando de automatização e experimentos para encontrar a resistência de corrosão, neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relacionados ao contexto do tema, os quais serviram de base para o avanço das pesquisas e execução do levantamento de dados proposto neste trabalho de conclusão de curso.

(OLIVEIRA, 2015) desenvolveu um trabalho de um sistema automatizado para monitoramento e controle ambiental de galpões de produção animal. O projeto utiliza 12 sensores sem fios, e pode ser empregado para gerenciar, controlar e monitorar os diferentes ambientes que atuam sobre o desenvolvimento animal (ambientes térmico, aéreo, biológico, físico, acústico e social). Através da coleta de dados feita pela rede de sensores sem fio, o sistema gestor tomará decisões iniciando ou finalizando o funcionamento de atuadores para criar condições ideais para a produção animal. O sistema gestor, a partir de sua base de dados, envia os resultados coletados através da web e telefones celulares, permitindo aos gestores a tomada de decisão, em tempo real e de qualquer localização. Oliveira utilizou Arduino em seu projeto como um microcontrolador para controlar seu trabalho. (CARDOSO, 2007) desenvolveu um

Figura 1 – Protótipo montado para teste dos circuitos atuadores

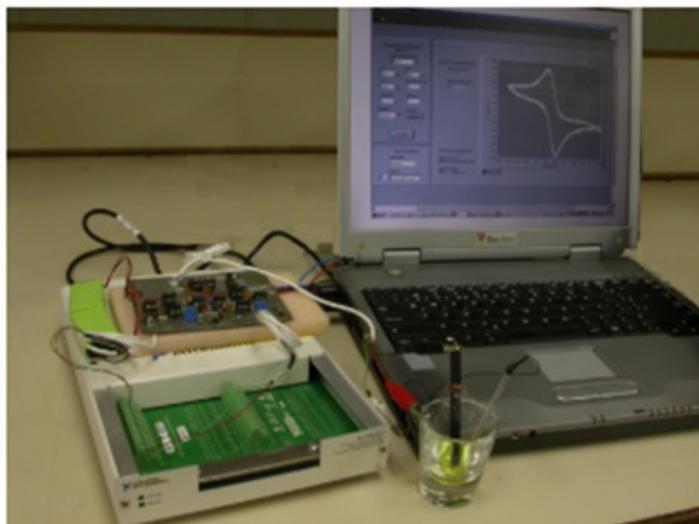


Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

sistema portátil de detecção eletroquímica que apresenta boa sensibilidade, aplicabilidade, seletividade e baixo custo de manutenção. No trabalho foram aplicadas técnicas de voltametria cíclica e voltametria por pulso diferencial. Portanto, foi desenvolvido um multipotenciostato, agregando quatro circuitos de potenciostato. O equipamento é limitado em correntes até unidades de microampères. "Visando atingir correntes ainda menores, desenvolveu-se um sistema que fosse menos influenciado por ruídos de diversas naturezas, isolando o circuito do potenciostato. Assim, utilizando um potenciostato opto-acoplado, foi possível detectar correntes da

ordem de nano-ampères", (CARDOSO, 2007). Para utilização dos potenciostatos foram empregados dois tipos de interface, a de comunicação e a de controle do multipotenciostato. Tornando o sistema de aquisição de dados portátil, foi desenvolvido um sistema de aquisição microcontrolado também interfaceado por instrumentos virtuais. Os sistemas desenvolvidos visam aplicações ambientais e biomédicas.

Figura 2 – Instrumentação utilizada nas medidas voltamétricas com o potenciostato opto-acoplado



Fonte: (CARDOSO, 2007)

(CAMPOS, 2014) desenvolveu um sistema de automatização residencial utilizando um Arduino, que interpreta dados controlados na residência com o intuito de estabelecer uma comunicação entre o sistema. Através de um Arduino, realizou o projeto de controle de iluminação por acionamento e controle de acionamento de um portão automático. Estabeleceu a interatividade do sistema através de um servidor WEB, podendo o usuário realizar requisições via smartphone.

Figura 3 – Sistema integrado com controle centralizado



Fonte: (CAMPOS, 2014)

Campos desenvolveu um interruptor digital para realizar a função de um display LCD TFT de 3.2" que detecta o toque. Na ativação de uma lâmpada, foi utilizado dispositivos móveis, feito por uma conexão Wi-Fi, entre o dispositivo e um roteador. Para o acionamento do portão automático foram utilizadas duas centrais microprocessadas.

## 3 Fundamentação Teórica

### 3.1 Corrosão

Segundo Helene 1986 “a corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica”. De acordo com Pannoni 2007, “a corrosão pode ser definida, de modo simples, como sendo a tendência espontânea do metal produzido e conformado de reverter ao seu estado original, de mais baixa energia livre. Uma outra definição, amplamente aceita, é a que afirma que corrosão é a deterioração de propriedades que ocorre quando um material reage com o ambiente”.

A corrosão de metais manifesta-se em diferentes tipos de meios, que podem ser divididos em quatro grupos: corrosão em meios aquosos, oxidação e corrosão quente, em meios orgânicos e corrosão por metais líquidos. Porém, ela ocorre com maior frequência no meio aquoso, nesse meio o mecanismo da corrosão é essencialmente eletroquímico (WOLYNEC, 2003). Assim, pode se utilizar técnicas eletroquímicas para avaliação, no controle e na busca de proteção de diferentes tipos de ataque corrosivo. Na corrosão eletroquímica, ocorre o processo redox, os elétrons são recebidos em determinada região e cedidos em outra. Esse processo pode ser composto em três etapas:

“[...] - processo anódico – passagem dos íons para a solução; - deslocamento dos elétrons e íons – observa-se a transferência dos elétrons das regiões anódicas para a catódicas pelo circuito metálico e uma difusão de anions e cátions na solução. - processo catódico – recepção de elétrons, na área catódica, pelos íons ou moléculas existentes na solução” (GENTIL, 1996, p. 46).

Os processos anódicos e catódicos são equivalentes. Conforme a lei de faraday, (GENTIL, 1996) cita que, “a intensidade do processo de corrosão pode ser avaliada tanto pelo número de cargas dos íons que passam à solução no anodo como pelo número de cargas dos íons que se descarregam no catodo”.

“De uma forma simplificada, pode-se dizer que para ocorrer a corrosão eletroquímica, tem-se a necessidade de três componentes: o metal, o eletrólito e o oxigênio, e para evitar a ocorrência da mesma, basta eliminar um dos três componentes (MENEGUZZI, 2000, p. 5)”.

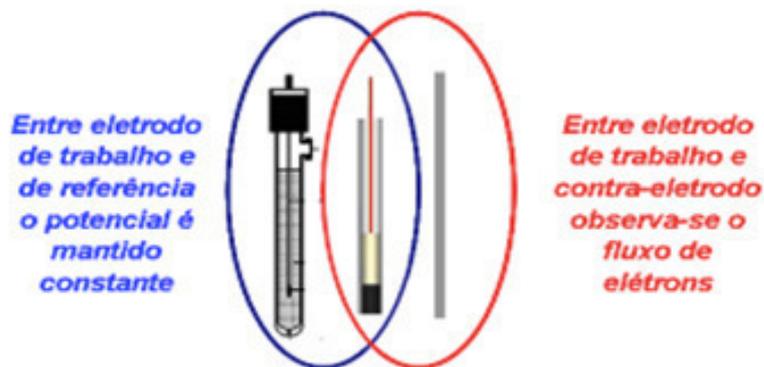
### 3.2 Voltametria

Segundo Woly nec 2003, “uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada a uma passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica”. A voltametria é uma técnica eletroquímica com características para

fornecer informações sobre as reações químicas, heterogêneas e transferência de elétrons. Essas são obtidas através de registros de curvas corrente potencial, feitas durante o experimento, utilizando uma célula eletrolítica de 2 a 3 eletrodos, sendo um deles um eletrodo auxiliar (contra eletrodo), o outro um microeletrodo (o eletrodo de trabalho) e um eletrodo de referência. Focaremos neste trabalho, três eletrodos, onde são frequentemente mais utilizados. Os eletrodos são conectados em um potenciostato que atuará no momento que for aplicada uma diferença de potencial entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho, fazendo com que a aumente a resistência do eletrodo de referência e diminua a resistência do eletrodo auxiliar. Assim, a corrente passará entre o eletrodo de trabalho e o auxiliar. O eletrodo de referência irá manter o potencial constante durante o experimento.

A técnica voltametria é classificada como dinâmica, pois é operada na presença de corrente elétrica ( $i > 0$ ) na cela eletroquímica, com medições em função da aplicação de um potencial. As variáveis de ajuste são o potencial ( $E$ ) e a corrente resultante ( $i$ ), o registro é da corrente em função do potencial, denominado voltamograma.

Figura 4 – Configuração de um sistema envolvendo três eletrodos



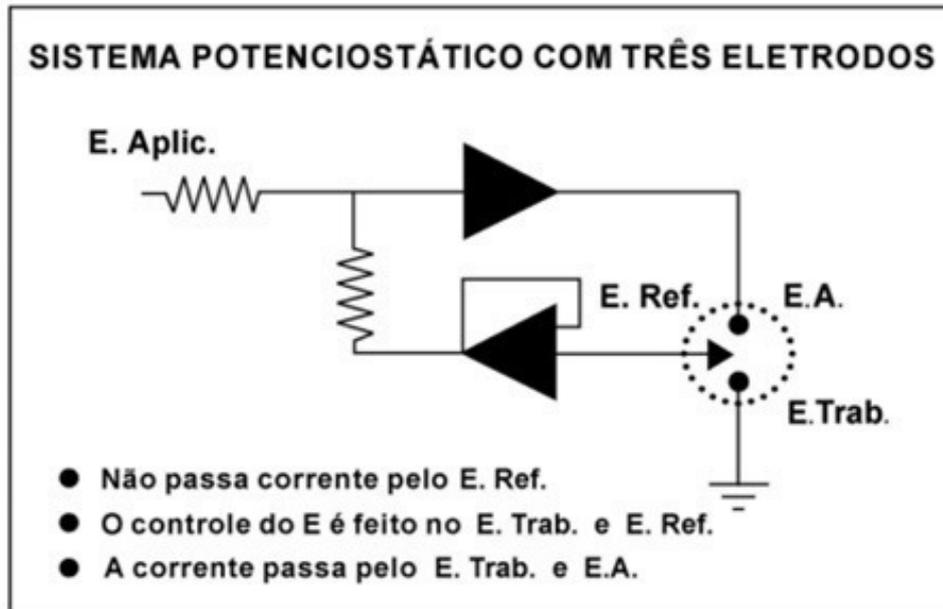
Fonte: (PACHECO et al., 2013)

A corrente resultante de uma reação de oxirredução é faradaica (a reação de  $n$  mols de substância envolve a transferência de  $n \times 96.487$  coulombs), e esta reação não é homogênea em toda a solução, pois todo este processo acontece na interface entre a solução e o eletrodo de trabalho. A corrente irá então depender de dois fatores:

- A velocidade na qual as espécies se movem do seio da solução para a superfície do eletrodo (transporte de massa).
- A velocidade na qual os elétrons são transferidos do eletrodo para a espécie em solução e vice-versa (transferência de carga).

O transporte de massa em um meio líquido realiza-se pelo processo de migração de uma ou mais espécies. Podem ocorrer de duas formas, a difusão e a convecção. Segundo CARAM JR 2000 “a difusão atômica pode ser definida como um mecanismo pelo qual a matéria é transportada através da matéria”. Segundo PAULA (2010)2010, convecção é o “movimento

Figura 5 – Esquema mostrando a célula conectada a um sistema potenciostático



Fonte: (ALEIXO, 2003)

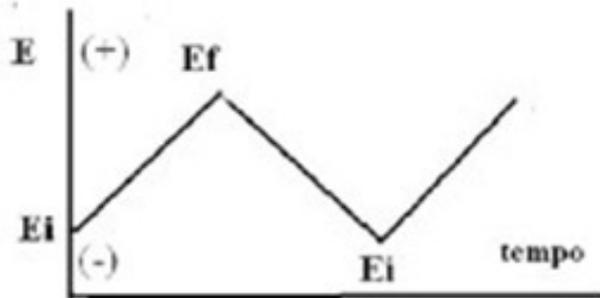
de espécies devido a forças mecânicas, isto é, escoamento que lhes imprimem a velocidade. É o transporte dos reagentes juntamente com o fluxo do líquido em movimento”.

### 3.3 Voltametria cíclica

Segundo Esteves e Amorim a voltametria cíclica constitui uma técnica eficaz e versátil no estudo de mecanismos de sistemas mediadores, permitindo a sua caracterização a partir dos potenciais dos picos de intensidade. Segundo Fonseca, P. e C. 2015 é visto como um dos métodos eletroquímicos mais populares, que pode dar uma visão global dos processos que resultam de reações redox, que possam ocorrer num eletrodo reativo (metal ou liga), por efeito da polarização eletroquímica, entre dois valores de potenciais.

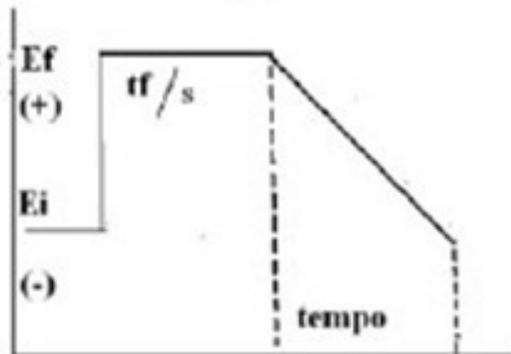
“A resposta do sistema é uma curva de intensidade de corrente ( $I$ ) versus potencial aplicado ( $E$ ). Quando o varrimento do potencial é efetuado de um potencial inicial ( $E_i$ ) até um potencial final ( $E_f$ ), regressando ao potencial inicial obtém-se uma curva  $I$  vs.  $E$  designada por voltamograma cíclico (VC). Se o varrimento for efetuado apenas no sentido anódico, isto é, para potenciais mais positivos ( $E = E_i + vt$ ), obtém-se uma curva de polarização anódica, (FONSECA; PROENÇA; CAPELO, 2015)”.

Figura 6 – Voltametria cíclica



Fonte: (FONSECA; PROENÇA; CAPELO, 2015)

Figura 7 – Varrimento catódico após um tempo de polarização (tf) ao anódico (Ef)



Fonte: (FONSECA; PROENÇA; CAPELO, 2015)

A figura 8, apresenta um voltamograma cíclico que demonstra valores de potencial, sendo valores positivos e negativos. Quando se desloca no sentido positivo, herda-se o ramo anódico da curva, devido a processos de oxidação. Por outro lado, quando se desloca no sentido mais negativo (ou menos positivos) herda-se o ramo catódico, associado a processos de redução. Portanto, “a densidades de corrente associadas aos picos anódico e catódico.

$$\left( J \frac{A}{B} \right) \tag{3.1}$$

$$\left( J \frac{C}{P} \right) \tag{3.2}$$

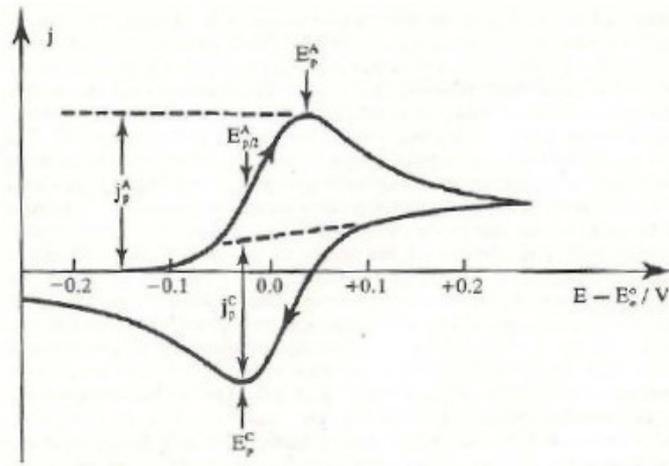
Bem como os potenciais de pico

$$\left( E \frac{A}{P} \right) e \left( E \frac{C}{P} \right) \tag{3.3}$$

e ainda, o potencial correspondente à metade do valor da densidade de corrente do pico anódico.

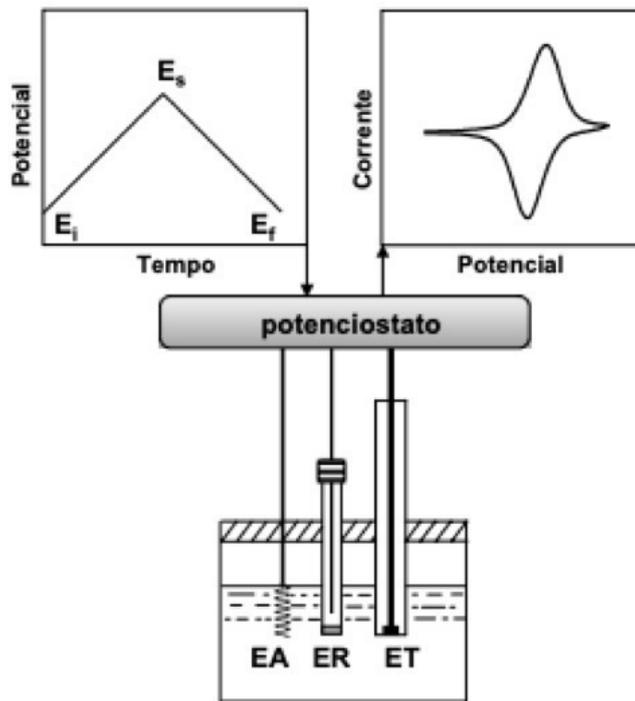
$$\left( E \frac{A}{\frac{P}{2}} \right) \tag{3.4}$$

Figura 8 – Apresenta um voltamograma cíclico (VC) típico de um processo redox reversível, envolvendo espécies solúveis e um elétrodo de trabalho inerte



Fonte: (FONSECA; PROENÇA; CAPELO, 2015)

Figura 9 – Representação esquemática de um experimento de voltametria cíclica



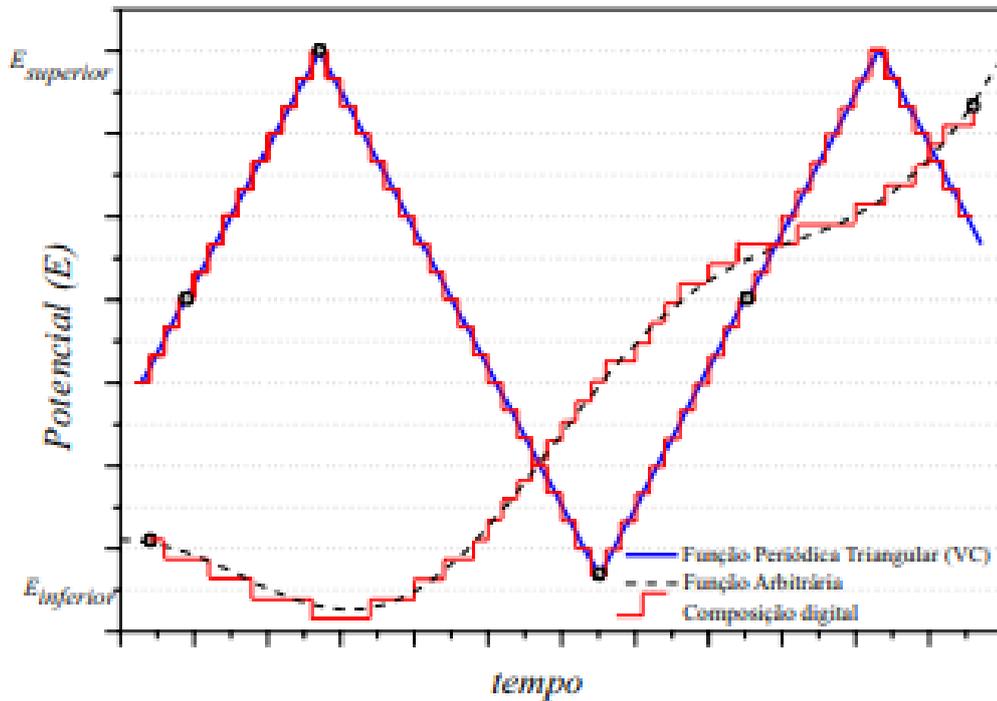
.png

Fonte: (QUINTINO, 2003)

O processo estudado é representado por formatos de ondas com sinal analógico e, após a conversão para sinal digital, com ondas triangulares periódicas, representada na figura 10.

A voltametria cíclica compreende na aplicação de uma onda periódica triangular entre um intervalo de potencial.

Figura 10 – Representação de um sinal analógico para digital com ondas triangulares



Fonte: (FERNANDES et al., 2015)

“Não é possível aplicar um sinal verdadeiramente linear a partir do uso de equipamentos digitais, mas sim, uma sequência de pulsos, de modo a constituir um formato mais próximo possível de uma rampa contínua. Para diferenciar esses dois tipos de sinais na voltametria cíclica dá-se o nome de: voltametria de varredura linear (LSV) e voltametria de varredura escalonada (SCV), gerados a partir de sinais analógico e digital, respectivamente. Enquanto que na LSV a velocidade de varredura ( $v$ ) e os limites de potencial são os parâmetros utilizados para definir o protocolo experimental, na SCV outros parâmetros adicionais devem ser definidos pelo usuário, (FERNANDES et al., 2015)”.

Na digitalização, para cada passo, altura ( $\Delta E$ ) e largura do degrau ( $\tau$ ) devem ser definidas. Para encontrar a velocidade de varredura ( $v$ ), segue a equação 3.5:

$$U = \frac{\Delta E}{\tau} \quad (3.5)$$

Como resposta do sistema a corrente é coletada para cada degrau durante um intervalo, formando o voltamograma, definido como parâmetro de amostragem  $\alpha$ .

$$\alpha = 1 - \frac{\tau'}{\tau}; 0 < \alpha < 1 \quad (3.6)$$

“Sendo  $\tau'$  o tempo entre a aplicação do pulso e o início da aquisição da corrente e  $\tau$  o tempo total do degrau. O parâmetro de amostragem ( $\alpha$ ) pode ser interpretado como a fração da largura do degrau em que a corrente será registrada. O parâmetro  $\alpha$  pode assumir valores de 0 a 1, ou seja, para valores próximos à unidade, o conjunto de dados começa a ser registrado logo após o início do degrau, ao passo que um valor de próximo de 0 indica que os dados são amostrados ao fim de cada degrau. Os efeitos de  $\alpha$ ,  $\Delta E$  e  $\tau$  na resposta eletroquímica são extremamente importantes e devem ser levados em consideração antes de usar o método para estudos fundamentais de processos eletródicos, (FERNANDES et al., 2015)”.

### 3.4 Célula eletrolítica

Célula eletrolítica é um dispositivo onde ocorre a eletrólise, isto é, onde ocorre a transformação da energia elétrica em energia química, figura 15. O dispositivo é composto o eletrólito (solução), o que pode ser ácido, base ou sais. É composto também por três eletrodos (eletrodo de trabalho, de referencia e o contra eletrodo), sendo um ânodo e um cátodo, potencial positivo e negativo. Após o metal ser mergulhado na solução com os eletrodos imersos e recebendo fonte externa através de um potenciostato, inicia se imediatamente a reação, com os íons dentro da solução e com a permanência dos elétrons dentro do metal. Fazendo com que os elétrons percorram o circuito, carregando eletricamente o metal e criando um campo elétrico dentro da solução. "Para manter a neutralidade elétrica, os íons positivos (cátions) movem-se através do eletrólito na direção do cátodo, e os íons negativos (ânions), na direção do ânodo. Esse processo constitui uma reação de oxidação-redução e a soma das duas semi reações nos eletrodos e a reação global na célula eletrolítica, (SARTORI et al., 2013)". Como a área dos dois eletrodos é diferente, o eletrodo de trabalho se polarizará, isto é, assumirá o potencial aplicado a ele. O eletrodo de referência, por possuir uma área grande, não se polarizará, mantendo o seu potencial constante (ALEIXO, 2003).

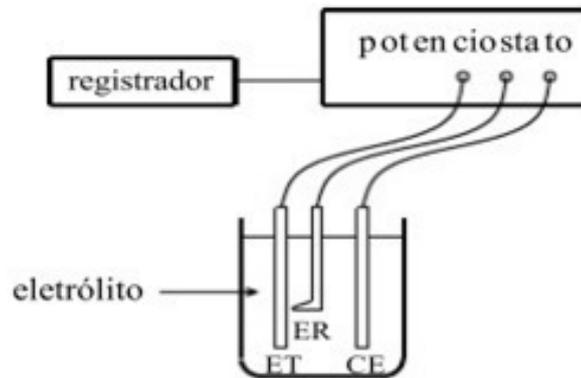
### 3.5 Potencial de corrosão

Quando um metal reage tem propensão de perder elétrons, então sofre oxidação, ocorrendo a corrosão. O metal imerso sob uma lâmina na solução eletrolítica estabelece uma diferença de potencial entre as fase líquida e sólida. "Está diferença de potencial é, simultaneamente, de natureza elétrica e de natureza química, e por isso se denomina diferença de potencial eletroquímico", (GENTIL, 1996). Para se obter um controle adequado de um potencial do eletrodo é utilizado um potenciostato, que impõe ao eletrodo o potencial estimado em relação ao eletrodo de referência, medindo também a corrente de polarização, registrando em função do potencial.

ET = eletrodo de trabalho ER = eletrodo de referência CE = contra-eletrodo

A função do eletrodo de referência é prover um potencial fixo que não varie durante um experimento. Isto é importante, pois como durante o levantamento das curvas de polarização se tem um fluxo de corrente entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo, estabelece se um

Figura 11 – Arranjo esquemático do potenciostato conectado aos eletrodos na célula eletrolítica



Fonte: (WOLYNEC, 2003)

gradiente de potencial entre ambos. Nos experimentos o potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência é controlado por um potenciostato.

### 3.6 Galvanização

Em 1741, o químico francês Melouin descobriu que o recobrimento de zinco poderia proteger o aço da corrosão. Em 1837, o engenheiro Sorel patenteou a galvanização a fogo utilizando o termo galvanização porque é a corrente galvânica que protege o aço (em homenagem a Luigi Galvani, 1737-1798, um dos primeiros cientistas a pesquisar a eletricidade e seus benefícios), (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007).

A galvanização é um processo que tem objetivo de aumentar a vida útil do aço, protegendo-o da corrosão. É uma técnica que permite uma interação metalúrgica entre o aço e o zinco, no qual é revestido uma peça de ferro ou de aço por uma camada especial de zinco, impedindo o contato do aço com o ambiente.

Os processos de galvanização em uma superfície são:

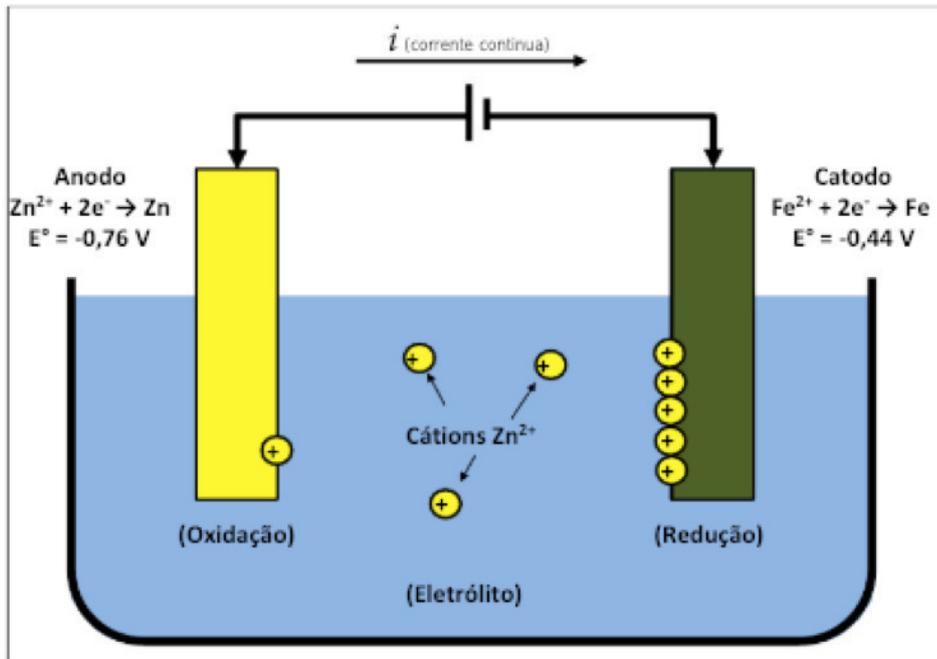
- zincagem ou galvanização por imersão a quente;
- zincagem por aspensão térmica;
- zincagem ou galvanização eletrolítica;

Neste trabalho vamos especificar o processo de galvanização eletrolítica, pois poderá ser utilizado no sistema de automatizado para ensaios de corrosão de um potenciostato digital.

"Na galvanização eletrolítica o anodo é o zinco, o catodo é o aço e o eletrólito é o sulfato de zinco ou o cloreto de zinco. A energia elétrica é fornecida pela fonte de corrente contínua. No anodo, o zinco é oxidado e libera dois elétrons e se dissolve

como cátion no eletrólito e no catodo de aço, cátions de zinco se combinam com dois elétrons (redução) e formam o zinco elementar, que se deposita sobre a superfície do aço. A solução de galvanização (eletrólito) carrega a corrente contínua entre o catodo e o anodo"(CARDOSO; PORCINO, ).

Figura 12 – Arranjo esquemático do potenciostato conectado aos eletrodos na célula eletrolítica



Fonte: (CARDOSO; PORCINO, )

Neste processo, o zinco é eletroliticamente depositado no metal base formando uma camada homogênea, fina e muito aderente, que não influi nas propriedades mecânicas do material, a partir de uma solução na qual estão dissolvidos sais do metal que se deseja depositar, (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007).

Neste trabalho não foi realizado experimentos de galvanização, focaremos apenas na voltametria.

## 4 Aparelhagem

### 4.1 Medições eletroquímicas

Para medições eletroquímicas, foi empregado o sistema de potenciostato/galvanostato, sendo um equipamento eletrônico, que possui entradas e saídas, estabelece o valor desejado para aplicar na célula eletroquímica. Utilizado para manter constante o potencial do eletrodo, sendo que, a corrente passa pelo eletrodo de trabalho e o eletrodo auxiliar. O potencial é medido do eletrodo de trabalho e o eletrodo referência. O potenciostato/galvanostato é normalmente responsável em medir a passagem de corrente pelo metal ao longo de uma faixa de potencial. Em paralelo, monitora a corrente, figura 13.

Figura 13 – Potenciostato/Galvanostato (FAC - 200A)



Fonte: Produzida pelo autor

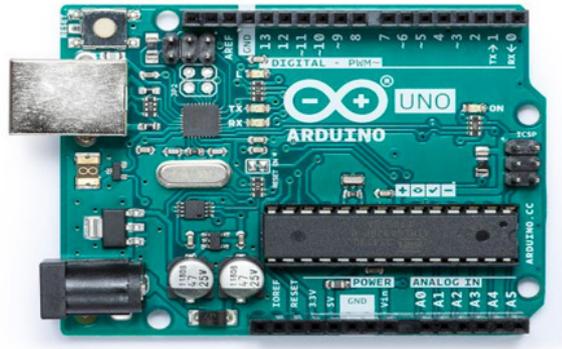
### 4.2 Arduino

Neste projeto foi utilizado o Arduino que é uma plataforma eletrônica usada em protótipos baseados em hardware e software de código aberto. Criado em 2005 pelo italiano Massimo Banzi e outros colaboradores para auxiliar no ensino de eletrônica. "O objetivo principal foi o de criar uma plataforma de baixo custo, para que os estudantes pudessem desenvolver seus protótipos com o menor custo possível", (WALKER, 2016). A linguagem de programação utilizada para desenvolvimento do software é baseada na linguagem Wiring, o código é aberto.

### 4.2.1 Arduino Uno

A placa microcontroladora utilizada neste trabalho é a do Arduino Uno, baseada no ATmega328P. Composta por 14 pinos de entrada / saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal de quartzo de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de energia, um conector ICSP e um botão de reset.

Figura 14 – Arduino UNO



Fonte: (FOUNDATION, 2018)

Figura 15 – Especificações do Arduino

Microcontrolador	ATmega328P
Tensão operacional	5V
Tensão de entrada (recomendado)	7-12V
Tensão de entrada (limite)	6-20 V
Pinos Digital I / O	14 (dos quais 6 fornecem saída PWM)
PWM Digital I / O Pins	6
Pinos de entrada analógica	6
Corrente DC por pino de E / S	20 mA
Corrente DC para Pin 3.3V	50 mA
Memória flash	32 KB (ATmega328P) dos quais 0,5 KB usados pelo bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade do relógio	16 megahertz
LED_BUILTIN	13
comprimento	68,6 mm
Largura	53,4 mm
Peso	25 g

Fonte: (FOUNDATION, 2018)

A placa Arduino UNO possui conectores de entrada e saída que servem para interface com o mundo externo. Segue como estão organizados os pinos na placa:

- 14 pinos de entrada e saída digital (pinos 0-13);
- 6 pinos de entradas analógicas (pinos A0 - A5);
- 6 pinos de saídas analógicas (pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11);

A alimentação da placa pode ser feita a partir da porta USB do computador ou através de um adaptador AC. Para o adaptador AC recomenda-se uma tensão de 9 a 12 volts (WALKER, 2016).

#### 4.2.2 IDE e linguagem de programação

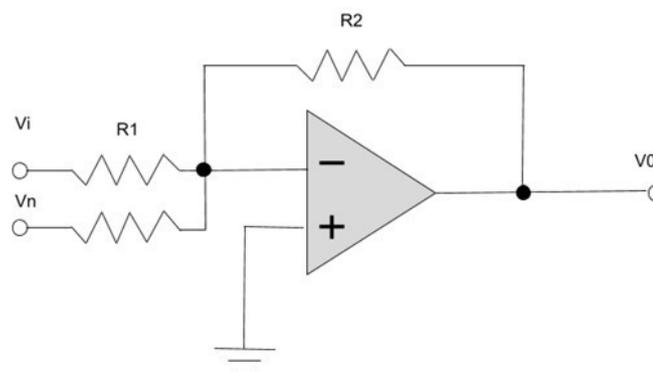
Para iniciar a criação de sketches para o Arduino é preciso instalar a IDE (Integrated Development Environment) do Arduino. Através do software que é realizado o desenvolvimento do programa e posteriormente compilado e enviado os comandos para o Arduino. A conexão do Arduino é feita através do cabo USB no computador.

### 4.3 Amplificador operacional

O amplificador é um componente muito utilizado com diversas aplicabilidade. Foi desenvolvido na década de 40, com passar dos anos melhorou a tecnologia, sendo mais eficaz. O amplificador operacional possui estágios diferenciados em suas entradas e apresenta uma saída. A realimentação negativa segundo (WENDLING, 2010) é o modo de operação mais importante em circuitos em AOP, também é um modo de operação em malha fechada, porém com resposta linear e ganho controlado.

Circuito amplificador somador apresenta  $n$  entradas, proporcionando uma somatória algébrica de  $n$  tensões, cada multiplicada por um fator.

Figura 16 – Amplificador somador inversor

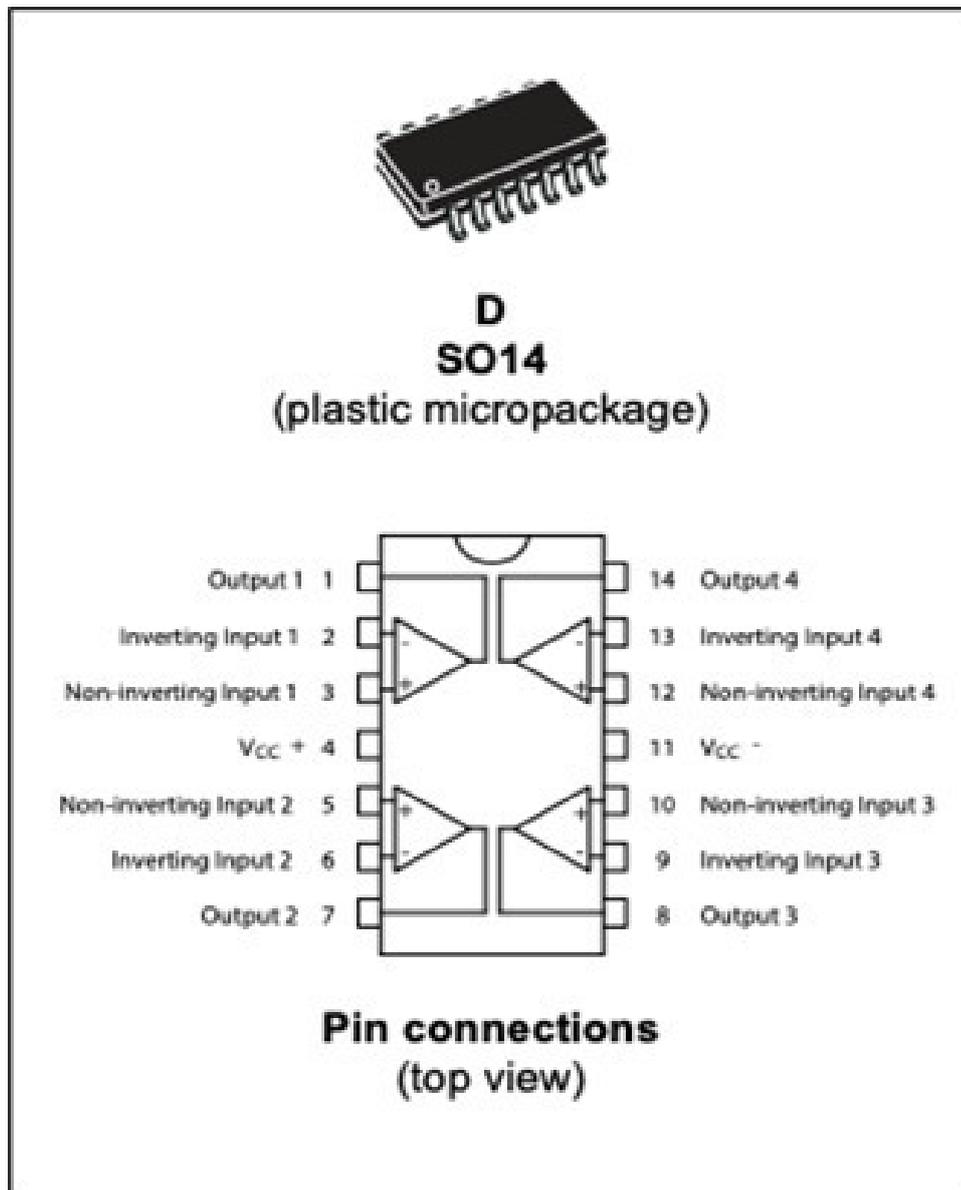


Fonte: Produzido pelo autor

### 4.4 Circuito integrado TL074

Para realizar a construção do amplificador somador, utilizamos o circuito integrado TL 074.

Figura 17 – Representação do circuito integrado TL 074



Fonte: (STMICROELECTRONICS, 2001)

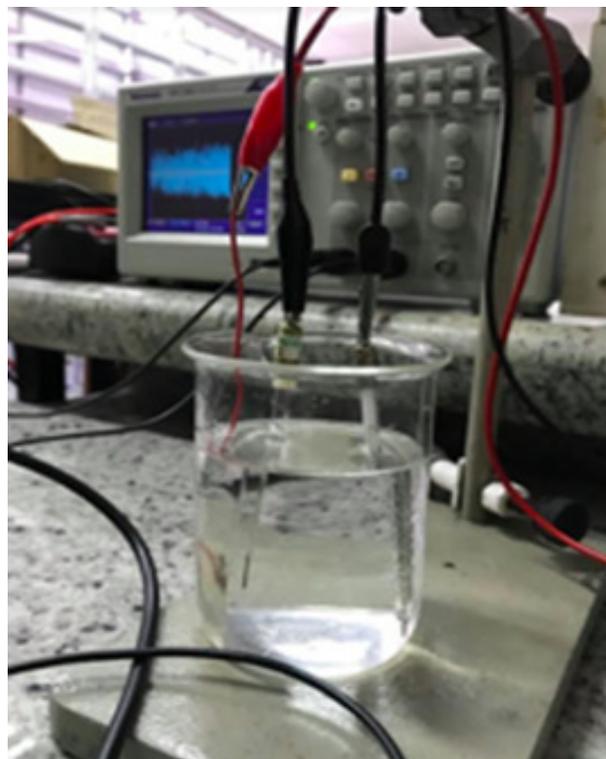
## 5 Desenvolvimento

Neste capítulo mostra como era realizado o experimento e detalhes do projeto para a implementação do sistema. Deste modo, o capítulo explica todos os detalhes técnicos e materiais utilizados. Contudo, também salienta o processo do uso do gerador de função, sendo um importante instrumento para o experimento.

### 5.1 Funcionamento do processo

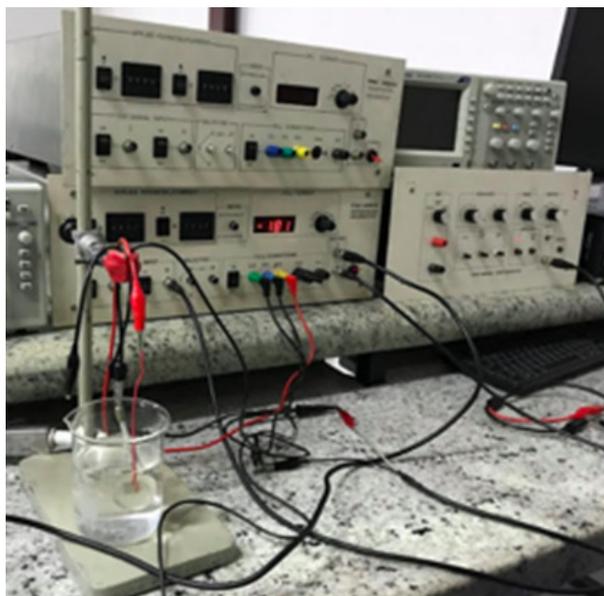
O processo é composto por um gerador de funções, que emite uma frequência diretamente para o potenciostato ou galvanostato. Assim, é enviada uma tensão e corrente para o eletrodo de trabalho na célula eletrolítica, conforme a velocidade estabelecida. O potencial é aplicado, forçando uma reação química, a qual possibilita a solução ser oxidada ou reduzida. Realizando a montagem da célula eletrolítica utilizando cabos com garra de jacaré e conectado no potenciostato, onde cada eletrodo é introduzido em seu ponto especificado na conexão da célula. O eletrodo de trabalho conectado no ponto W.E, eletrodo de referência no R.E e o contra-eletrodo (eletrodo auxiliar) no C.E do potenciostato. A célula eletrolítica é representada pelo bquer de 250ml e com eletrodo de referência de platina.

Figura 18 – Célula eletrolítica composta pelos eletrodos



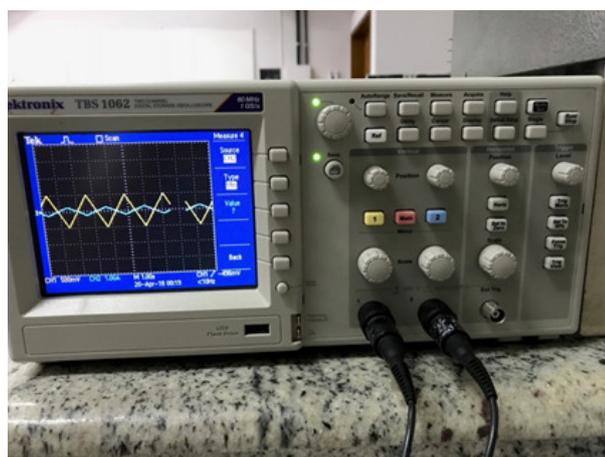
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 19 – Sistema montado para o experimento



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 20 – Osciloscópio

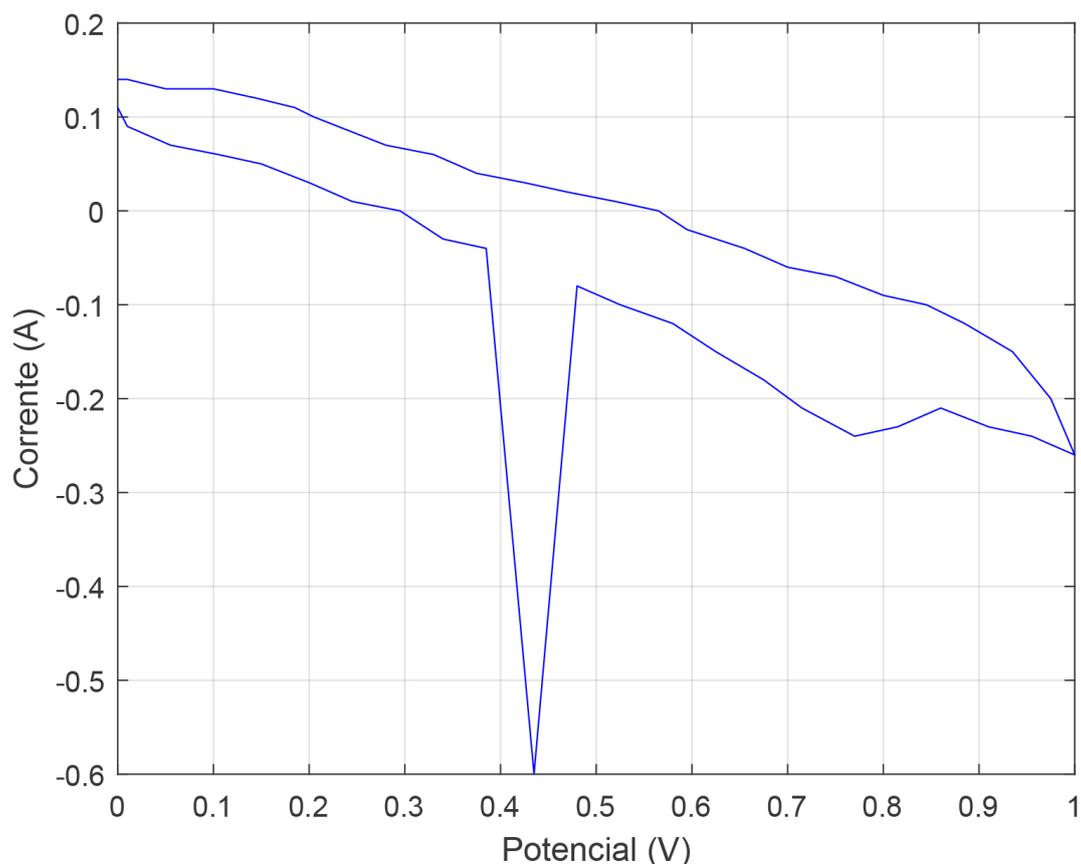


Fonte: Produzido pelo autor

## 5.2 Primeira prática

Na primeira prática, foi utilizada a solução de KCl 0,1 mol/L, cloreto de potássio como eletrólito. O experimento de voltametria cíclica foi realizado a uma velocidade de varredura de potenciais de  $5 \text{ mV s}^{-1}$  e utiliza-se a janela de potenciais de 0V à 2V. Os dados de potencial e corrente foram coletadas a cada 10 segundos, totalizando 7 minutos e 30 segundos de experimento. Na tabela abaixo apresenta os resultados do experimento. Como pode ser observado, houve um pequeno pico anódico.

Figura 21 – Gráfico prática 1

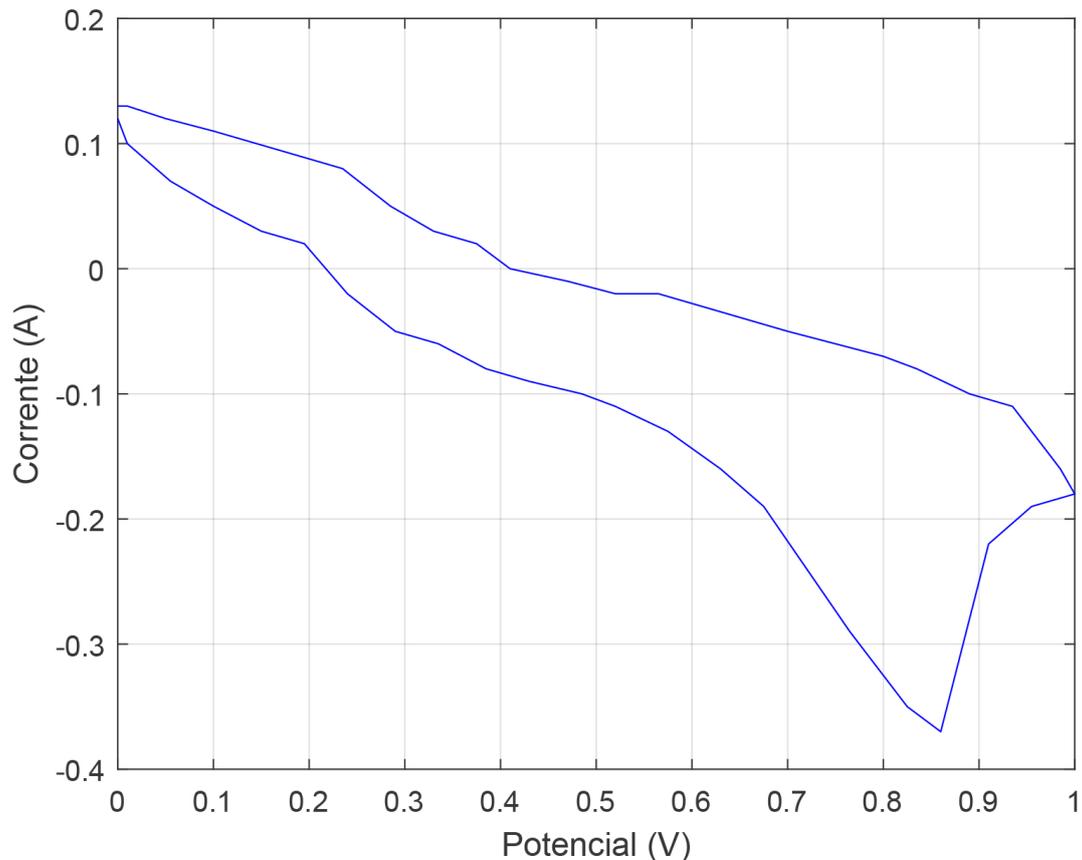


Fonte: Produzido pelo autor

### 5.3 Segunda prática

Na segunda prática, foi utilizada a solução de KCl 0,1 mol/L como eletrólito suporte contendo  $1 \times 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$  de  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  (Hexacianoferrato (III) de potássio). O experimento de voltametria cíclica foi realizado a uma velocidade de varredura de potenciais de  $5 \text{ mV s}^{-1}$  e utilizando-se a janela de potenciais de 0V a 1V (versus Ag/AgCl (KCl 3 mol/L)). Os dados de potencial e corrente foram coletados a cada 10 segundos, totalizando 7 minutos e 30 segundos de experimento. Na tabela 2 são apresentados os resultados do obtidos. A partir dos dados da tabela 2, construiu-se o voltamograma cíclico mostrado no gráfico 2. Como pode ser observado, durante a varredura de potenciais no sentido anódico (ou seja, de 0V a 1V) houve o surgimento de um pico anódico, correspondente à oxidação da sonda redox.

Figura 22 – Gráfico prática 2



Fonte: Produzido pelo autor

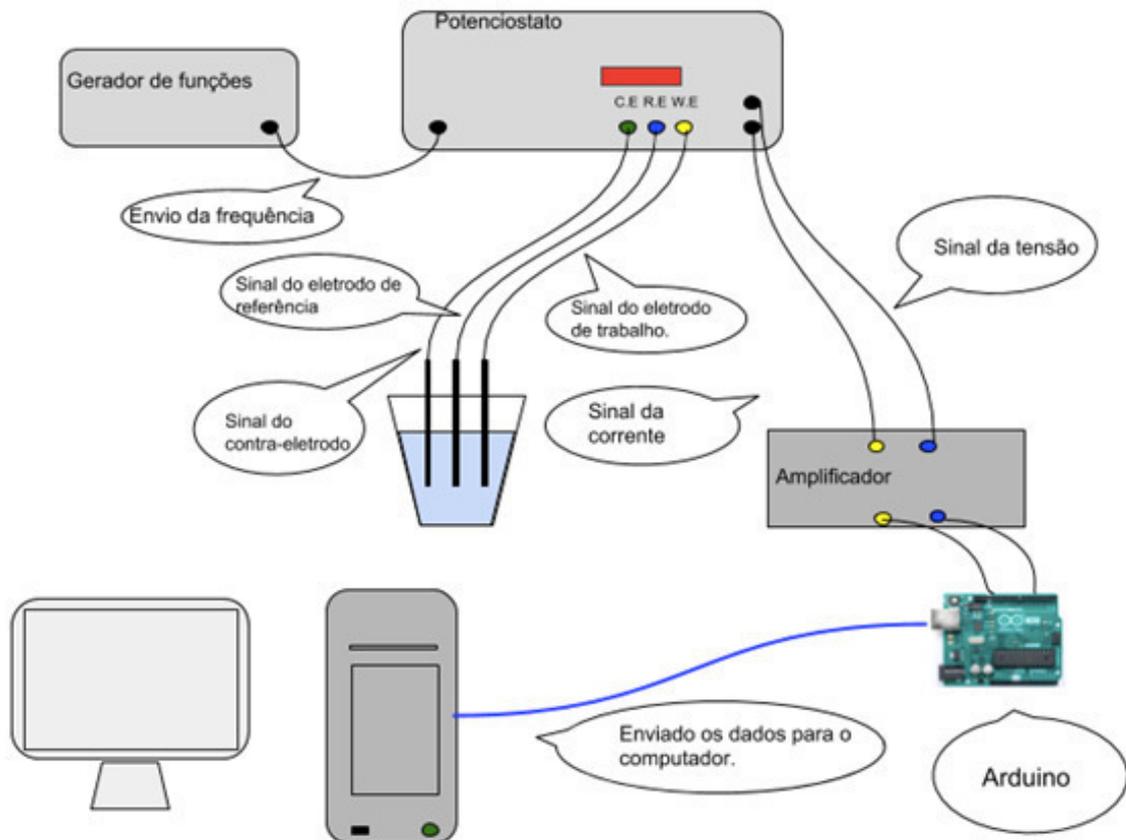
#### 5.4 Implantação do microcontrolador

O microcontrolador pode ser programado para realizar leituras conforme a programação realizada. Desta forma, incluímos um Arduino no processo para buscar as informações de tensão e corrente enviadas para o eletrodo de trabalho, obtendo um relatório do momento do experimento. O sinal da potencial e corrente é informado pelo potenciostato. O sinal de potencial e corrente emitido para o eletrodo são alternados em negativo e positivo. O microcontrolador não realiza leituras de sinais negativos, portanto, para resolver esse problema, foi implantado um amplificador somador para amplificar os sinais negativos para positivos. Sendo assim, os dados são lidos pelo Arduino, e através da programação são realizados cálculos algébricos para subtrair o sinal que foi amplificado e retornar os dados de entrada no amplificador, ou seja, dados reais utilizados no experimento. Após a coleta de dados é enviado do Arduino para o computador, esquematizado na figura 23.

#### 5.5 Amplificador

Foram construídos dois amplificadores no sistema, um para representar a corrente e outro para leitura da tensão, ambos representados como amplificador somador, figura 24 e figura 25.

Figura 23 – Esquema do sistema após a implantação do Arduino



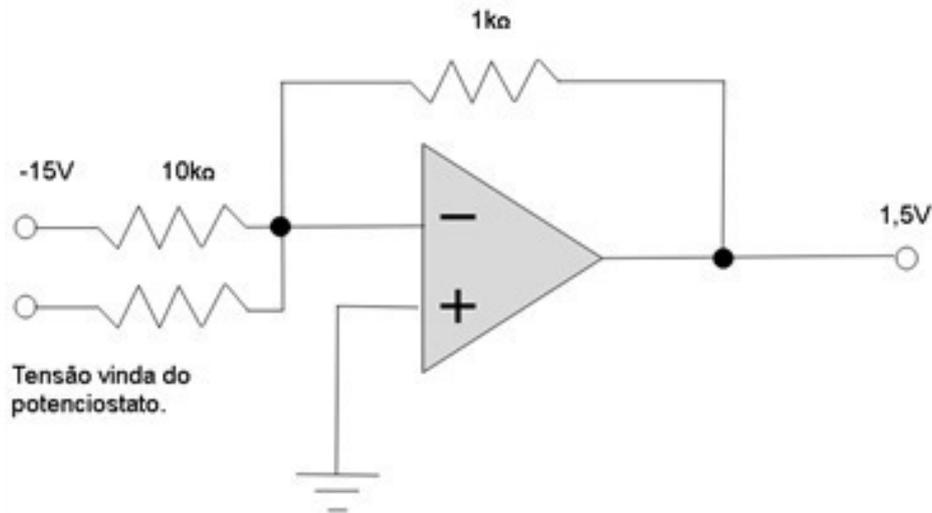
Fonte: Produzido pelo autor

Na figura 24 a tensão de saída deste circuito é a soma algébrica das tensões aplicadas às entradas, multiplicada pelo ganho que é dado pela relação entre  $R_2$  e  $R_1$ , ou seja, pelos valores de  $1\text{ k}\Omega$  e  $10\text{ k}\Omega$ . Portanto, foi alimentado o entrada ( $V_i$ ) por uma tensão de  $-15\text{ V}$ , chegando a um resultado de saída de  $1.5\text{ V}$  ( $V_o$ ). Vale destacar que o somador irá somar mais de uma entrada, ou seja, a tensão enviada do potenciostato para célula eletrolítica será aplicada diretamente nos sinais em mais uma entrada, sendo que o sinal de saída da conexão é a soma dos sinais de entrada amplificado. O valor da tensão adicional na entrada vinda pelo potenciostado é de  $1\text{ mV}$ .

$$V_0 = -\sum_{i=1}^n \left( \frac{R_f}{R_i} V_i \right) = -\left( \frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \right) \quad (5.1)$$

$$V_0 = -\left( \frac{R_2}{R_1} V_1 \right) = -\left( \frac{1}{10} \times -15 \right) = 1.5V \quad (5.2)$$

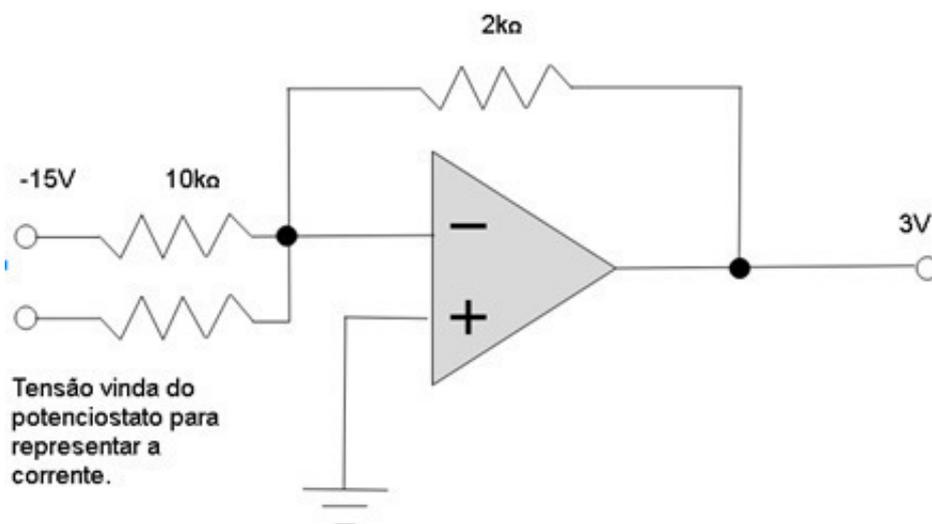
Figura 24 – Amplificador - tensão



Fonte: Produzido pelo autor

Na figura 25 a tensão de saída deste circuito será aplicada pelos valores de 2 kΩ e 10 KΩ. Portanto, foi alimentado a entrada ( $V_i$ ) por uma tensão de -15 V, chegando a um resultado de saída de 3 V. Vale destacar que o somador irá somar mais de uma entrada, ou seja, a representação da corrente em tensão enviada pelo potenciostato será aplicada diretamente nos sinais da outra entrada, sendo que o sinal de saída da conexão é a soma dos sinais das entradas do amplificador.

Figura 25 – Amplificador - corrente

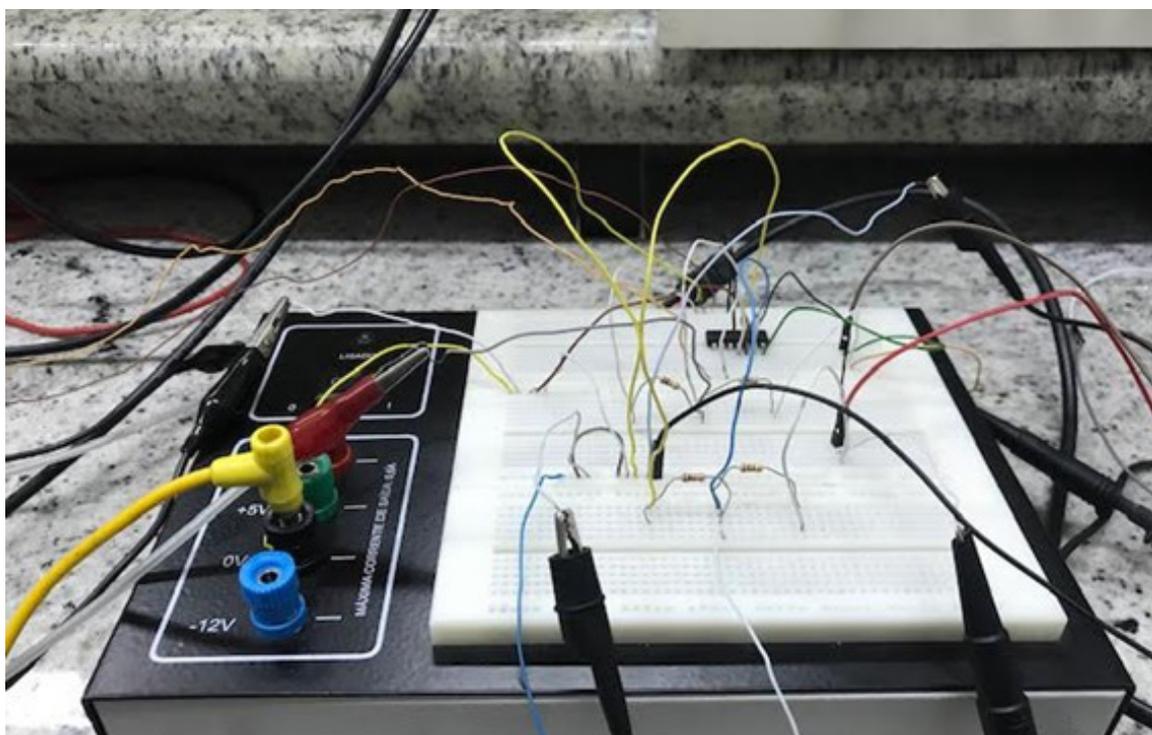


Fonte: Produzido pelo autor

$$V_0 = -\left(\frac{R_2}{R_1} V_1\right) = -\left(\frac{2}{10} \times -15\right) = 3V$$

(5.3)

Figura 26 – Esquema do sistema montado no protoboard



Fonte: Produzido pelo autor

## 6 Resultados

Após construção do sistema, constatamos a melhoria aplicada no ensaio de corrosão. Tivemos um aumento significativo de coleta de amostragens, apresentando dados mais satisfatórios para conclusão dos resultados. figura 27, ilustra os resultados encontrados durante o experimento, conforme proposto. Os dados são salvos no computador e utilizados para criar gráficos para serem analisados. A figura abaixo representa três variáveis, sendo, o tempo (min:s:ms), a corrente (A) e a tensão (V):

Figura 27 – Monitor serial

```

Tempo , Corrente , tensão
00:00:01 , , -0.04000 , 0.70500
00:00:02 , , -0.03500 , 0.62000
00:00:03 , , -0.03000 , 0.53000
00:00:04 , , -0.02500 , 0.46500
00:00:05 , , -0.02500 , 0.42500
00:00:06 , , -0.02000 , 0.30500
00:00:07 , , -0.01500 , 0.22000
00:00:08 , , -0.01000 , 0.16500
00:00:09 , , -0.00500 , 0.10000
00:01:00 , , 0.00000 , 0.04500
00:01:01 , , 0.00500 , -0.06500
00:01:02 , , 0.01000 , -0.09000
00:01:03 , , 0.01500 , -0.21000
00:01:04 , , 0.02000 , -0.28000
00:01:05 , , 0.02500 , -0.36500
00:01:06 , , 0.02500 , -0.38500
00:01:07 , , 0.03500 , -0.49000
00:01:08 , , 0.03500 , -0.50000
00:01:09 , , 0.04000 , -0.65500
00:02:00 , , 0.04500 , -0.69000
00:02:01 , , 0.05000 , -0.70000
00:02:02 , , 0.04000 , -0.67000
00:02:03 , , 0.04000 , -0.57000
00:02:04 , , 0.03500 , -0.49000
00:02:05 , , 0.03000 , -0.47500
00:02:06 , , 0.02500 , -0.34500
00:02:07 , , 0.02500 , -0.31000
00:02:08 , , 0.01500 , -0.20500
00:02:09 , , 0.01000 , -0.15000
00:03:00 , , 0.00500 , -0.09500
00:03:01 , , 0.00500 , -0.02000
00:03:02 , , 0.00000 , 0.03500
00:03:03 , , -0.00500 , 0.14500
00:03:04 , , -0.01000 , 0.21500

```

Fonte: Produzido pelo autor

# 7 Conclusão

A Automação do processo está sendo cada vez mais explorada, tornando os processos, ao longo do tempo, mais ágeis e produtivos. tanto na área da química quanto na área da metalúrgica, elétrica, eletrônica e outras. O microcontrolador arduino pode se tornar uma solução para vários projetos, uma vez que consegue controlar e realizar diversas funções. Além de ser de baixo custo e de fácil compreensão.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema estruturado para automatizar o processo utilizando a técnica de voltametria. Visando verificar as informações fornecidas, realizar leituras confiáveis e melhorar a produtividade do ensaio.

Os resultados apresentados nos ensaios mostraram que o Arduino conseguiu entregar os dados e facilitar o processo. Tornando-o mais fácil e produtivo.

## 7.1 Contribuições

- Entendimento do ensaio de corrosão utilizando a técnica de voltametria;
- Visto na prática o funcionamento do amplificador somador;
- Entendimento do funcionamento do Arduino e componentes;

## 7.2 Trabalhos futuros

- Como complementação deste trabalho, desenvolver um software com interface para conexão via rede de dados, para tornar ainda mais fácil a portabilidade;
- Desenvolver um gerador de frequência portátil junto ao microcontrolador;
- Criar uma placa PCB implementando o circuito do amplificador realizado;

# Referências

- ALEIXO, L. M. Voltametria: conceitos e técnicas. *Universidade Estadual de Campinas, São Paulo*, 2003. Citado nas páginas 20 e 24.
- BANZI, M. Primeiros passos com o arduino. *São Paulo: Novatec*, p. p1, 2011. Citado na página 12.
- CAMPOS, R. A. F. Automação residencial utilizando arduino e aplicação web. 2014. Citado na página 16.
- CARDOSO, J. L. *Desenvolvimento de sistemas portáteis de monitoramento eletroquímico*. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado nas páginas 15 e 16.
- CARDOSO, W. da S.; PORCINO, B. da S. Galvanização eletrolítica contínua de chapas de aço. Citado na página 26.
- FERNANDES, K. et al. Considerações técnicas quanto ao uso da voltametria de varredura escalonada em processos adsorptivos. *Quim. Nova*, v. 38, n. 3, p. 431–435, 2015. Citado nas páginas 23 e 24.
- FONSECA, I.; PROENÇA, L.; CAPELO, S. A voltametria cíclica e de varrimento linear unidirecional: suas potencialidades na caracterização de processos de corrosão. *Corrosão e Proteção de Materiais*, LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia, IP, v. 34, n. 1, p. 12–21, 2015. Citado nas páginas 11, 20, 21 e 22.
- FOUNDATION, A. *Overview is tech specs*. 2018. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Citado na página 28.
- GENTIL, V. Corrosão. In: *Corrosao*. [S.l.]: Rio de Janeiro, 1996. Citado nas páginas 11, 12, 18 e 24.
- HELENE, P. R. Corrosão em armaduras de concreto armado. *São Paulo*, v. 231, p. 14, 1986. Citado na página 18.
- JR, R. C. Estrutura e propriedades dos materiais. *Apostila da disciplina EM342. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP*, 2000. Citado na página 19.
- MENEGUZZI, A. Eletrosíntese de filmes de polímeros a partir de naftilaminas substituídas sobre metais oxidáveis e síntese química: aplicação na proteção contra a corrosão. 2000. Citado na página 18.
- MERCON, F.; GUIMARÃES, P. I. C.; MAINIER, F. B. Corrosão: um exemplo usual de fenômeno químico. *Química Nova na escola*, v. 1, n. 19, 2004. Citado na página 12.
- MONK, S. *Programação com Arduino: começando com Sketches*. [S.l.]: Bookman Editora, 2017. Citado na página 12.
- OLIVEIRA, M. E. d. *Desenvolvimento de sistema automatizado de monitoramento de ambientes de produção animal, utilizando uma rede de sensores sem fio*. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015. Citado na página 15.
- PACHECO, W. F. et al. Voltametrias: Uma breve revisão sobre os conceitos. *Revista Virtual de Química*, v. 5, n. 4, p. 516–537, 2013. Citado nas páginas 12 e 19.

- PANNONI, F. D. Fundamentos da corrosão. *Proteção Estrutural AçoMinas AS*, disponível conforme o endereço eletrônico apresentado a seguir [www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnica/pdf/artigostecnico/Fundamentos\\_da\\_corrosao.pdf](http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnica/pdf/artigostecnico/Fundamentos_da_corrosao.pdf), 2007. Citado na página 18.
- PAULA, F. *Deposição eletroquímica*. [S.l.]: URFIC, 2010. Citado na página 19.
- QUINTINO, M. d. S. M. Desenvolvimento de sensores eletroquímicos associados a batch injection analysis (bia) para aplicações analíticas. 2003. Citado na página 22.
- SARTORI, E. R. et al. Construção de uma célula eletrolítica para o ensino de eletrólise a partir de materiais de baixo custo. *Química Nova na Escola*, v. 35, n. 2, p. 107–111, 2013. Citado na página 24.
- STMICROELECTRONICS. *TL 074*. [S.l.], 2001. Citado na página 30.
- WALKER, M. *Mergulhando no Mundo do Arduino*. [S.l.], 2016. Citado nas páginas 27 e 29.
- WENDLING, M. Amplificadores operacionais. *Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, versão*, v. 2, 2010. Citado na página 29.
- WOLYNEC, S. *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão Vol. 49*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado nas páginas 18 e 25.
- ZEMPULSKI, L. N.; ZEMPULSKI, M. F. S. Galvanização eletrolítica. *Serviço Brasileiro de respostas técnicas: Instituto de Tecnologia do Paraná*, 2007. Citado nas páginas 25 e 26.

# A Código de inicialização do sistema

Abaixo o código de inicialização do sistema, utilizando como base as características do amplificador e os resultados reais:

```

1
2 //iniciando os valores das variaveis do cron metro
3 int miliSegundos = 0;
4 int segundos = 0;
5 int minutos = 0;
6
7 void setup() {
8
9   Serial.begin (9600);
10  while (!Serial){
11
12  }
13  Serial.print("Tempo , Corrente , tens o");
14  Serial.println("");
15 }
16
17 void loop() {
18  double amp = analogRead (A1);
19  double volt = analogRead (A0);
20  volt = ((volt/100)/2) -2.98;// C lculo para encontrar a tens o real
21  amp = ((amp/100)/2) -1.49;// C lculo para encontrar a corrente real.
22
23  miliSegundos = miliSegundos + 1; // Realizar a contagem do
    cronometro em milisegundos.
24    if (miliSegundos>9){
25      miliSegundos = 0;
26      segundos = segundos + 1; // Somar um segundo.
27    }
28    if (segundos>59){
29      segundos = 0;
30      minutos = minutos + 1; // Somar um minuto.
31    }
32
33  Serial.print("0"); Serial.print(minutos); Serial.print(":");
34  if (segundos<10){

```

```
35     Serial.print("0");
36     }
37     Serial.print(segundos); Serial.print(":");
38     Serial.print("0"); Serial.print(miliSegundos); Serial.print(" , ");
39     Serial.print(" , ");
40     Serial.print(amp,5);
41     Serial.print(" , ");
42     Serial.print(volt,5);
43     Serial.println("");
44
45     delay(100);
46 }
```