

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Paulo Victor Silva Ferreira

**Sistema de controle digital para galvanometria
em ensaios de fragilização por hidrogênio**

Uberlândia, Brasil

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Paulo Victor Silva Ferreira

**Sistema de controle digital para galvanometria em
ensaios de fragilização por hidrogênio**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da Uni-
versidade Federal de Uberlândia, Minas Ge-
rais, como requisito exigido parcial à obten-
ção do grau de Bacharel em Engenharia Me-
catrônica.

Orientador: Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecatrônica

Uberlândia, Brasil

2024

Agradecimentos

Eu jamais teria chegado a esse momento se não pela presença de todos aqueles que me acompanharam. A eles, os seguintes agradecimentos:

Gostaria de agradecer primeiro e mais importantemente minha mãe, o principal motivo de eu estar onde estou hoje. Não há muito a dizer que já não esteja caíba dentro dessa unica afirmação. Por ter me ensinado a liberdade de pensar por mim mesmo, alimentado minha curiosidade e imaginação, por tudo aquilo a que me deu acesso e que me fascinou desde sempre. Pelo carinho com que tudo isso foi é é feito. Obrigado

Também um agradecimento todos os meus amigos, em especial a aqueles da turma 29 da mecatrônica pelos anos de aprendizado e companheirismo que passamos juntos. Por todas as sessões de estudos em conjunto, por todos os trabalhos, discussões, conversas e confraternizações que influenciaram tanto o meu percurso durante esse tempo de graduação.

Um agradecimento especial à minha namorada, Anna Karolinn, que no decorrer dos últimos dois anos tem me ajudado a melhorar todos os aspectos de quem eu sou e de como eu me relaciono com o mundo, inclusive com a minha graduação, minha pesquisa e o meu trabalho. Por toda a motivação, por todos os momentos em que eu passei mais tempo que eu deveria falando sobre o progresso e as dificuldades, por todo o carinho, muito obrigado.

À toda a equipe do LTAD pela oportunidade, pelo apoio, pela estrutura e pelo aprendizado. Em especial um obrigado ao engenheiro Matheus Heitor, que acompanhou minha pesquisa durante todo o meu tempo no laboratório, e me ajudou diariamente com sua experiência, conhecimento e profissionalismo. Ao técnico eletricitista Wedeson com quem compartilhei a sala do laboratório durante os primeiros 3 semestres, e que me ajudou muito com os aspectos técnicos do projeto, e com os vários pequenos momentos de descontração no decorrer do dia. Ao técnico Johnson por toda a ajuda na construção dos equipamentos. Aos engenheiros Gustavo Vilela e Miguel Angel que utilizaram e testaram o equipamento que desenvolvi e cujo feedback muito me ajudou. E claro ao meu orientador, professor Leonardo Rosa pela ajuda e autonomia concedidas para a realização desta monografia.

Gostaria de agradecer à UFU, pela excelência da graduação que tive, e a alguns professores em particular cuja qualidade do trabalho me ajudaram e motivaram durante a graduação. Rafael Rossato pela sua paixão contagiante pela beleza da matemática, base sem a qual a graduação teria sido muito difícil. Diego Meringue um dos maiores educadores com quem já interagi. Sua performance como professor garante acessibilidade aos tópicos

mais complexos da física, outra base importantíssima da engenharia. Pedro Augusto pela qualidade ímpar das aulas, garantindo que o controle fosse a disciplina com a qual eu mais quero continuar trabalhando. Vera Lúcia por me ajudar no aprofundamento dos meus estudos em eletrônica, área de atuação na qual mais estou imerso atualmente. Rivalino Matias por ter me engajado no aprendizado de programação de uma maneira sem a qual eu não me sentiria equipado para lidar com as várias dificuldades do desenvolvimento do software desse equipamento.

Por fim um agradecimento à petrobrás e à FAU pelo aporte financeiro ao laboratório e pela realização dos dois projetos dos quais fiz parte durante a minha pesquisa.

Resumo

O seguinte documento detalha o desenvolvimento de um projeto de fim de curso no qual foi elaborado o sistema completo de um galvanostato digital, utilizando um microprocessador ATMega328P para a implementação do controle digital. Este equipamento foi desenvolvido para a realização de ensaios de polarização galvanostática em amostras metálicas, de maneira a induzir a difusão de hidrogênio iônico na estrutura cristalina destes materiais a fim de estudar neles os efeitos da fragilização causada pela presença deste íon.

Palavras-chave: galvanostato, controle, hidrogênio, eletroquímica, ciência dos materiais.

Abstract

The following document details the end of graduation project in which was developed the complete system of a digital galvanostat, utilizing an ATMega328P microprocessor for the implementation of the digital control system. This equipment was developed for use in galvanostatic polarization tests of metallic samples, to induce the diffusion of ionic hydrogen in the crystal structure of these materials, with the goal of studying the effects of the fragilization caused by the presence of these ions.

Keywords: galvanostat, control, hydrogen, electrochemistry, material science..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Hidreto de titânio em estrutura cristalina (DECONINCK; DEPOVER; VERBEKEN, 2023).	16
Figura 2 – Trinca induzida em estrutura fragilizada por hidrogênio (MARTINI-ANO et al., 2021).	17
Figura 3 – Voltamograma de um sistema reversível.(PALMSENS, 2021)	19
Figura 4 – Estrutura de um galvanostato analógico convencional (J.; FAULKNER, 2000).	20
Figura 5 – Símbolo de amplificador operacional ideal	21
Figura 6 – Amplificador real (adaptada de (SSTATIC, 2017))	21
Figura 7 – Amplificador na configuração seguidor de tensão	22
Figura 8 – Diagrama de blocos genérico (RESPONDEAI, 2019).	23
Figura 9 – Galvanostato controlado por computador (J.; FAULKNER, 2000).	25
Figura 10 – Fluxograma da máquina de estados.	27
Figura 11 – Entrada (tensão) e saída (corrente) da planta. Dados experimentais.	29
Figura 12 – Saída simulada e experimental normalizada.	30
Figura 13 – Lugar geométrico das raízes do sistema.	31
Figura 14 – Circuito básico do laço de controle.	32
Figura 15 – Ensaio em corpo de prova C276 27%. Em (a), (c) e (e) curvas de corrente e em (b), (d) e (f) curvas tensão do eletrodo de referência.	37
Figura 16 – Ensaio em corpo de prova C276 27%. Em (a), (c) e (e) curvas de corrente e em (b), (d) e (f) curvas tensão do eletrodo de referência.	38
Figura 17 – Painel frontal do equipamento	45
Figura 18 – Painel frontal do equipamento	46

Lista de tabelas

Tabela 1 – Componentes utilizados e preços(*De acordo com cotação do dólar no dia 23/08/2024).	33
Tabela 2 – Dados dos ensaios com corpos de prova C22.	35
Tabela 3 – Dados dos ensaios com corpos de prova Liga 59.	35
Tabela 4 – Dados dos ensaios com corpos de prova C276.	36

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AO	Amplificador Operacional
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LGR	Lugar geométrico das raízes
PI	Proporcional Integrativo
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

Lista de símbolos

∂	Derivada parcial
$G(s)$	Função de transferência
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integrativo
K_d	Ganho derivativo
ϕ	Letra grega phi utilizada para denotar concentração de soluto
π	Constante matemática pi
s	Frequência
$u(t)$	Entrada da planta no domínio do tempo
$U(s)$	Entrada da planta no domínio da frequência
ω_n	Frequência natural do sistema
ξ	Letra grega xi usada para denotar o coeficiente de amortecimento
$y(t)$	Saída da planta no domínio do tempo
$Y(s)$	Saída da planta no domínio da frequência

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.2	Método	12
1.3	Resultados	13
1.4	Organização do Trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Conceitos Básicos	15
3	METODOLOGIA	25
3.1	Lista de itens	33
4	RESULTADOS	35
5	CONCLUSÃO	39
5.1	Dificuldades e trabalhos futuros	39
	REFERÊNCIAS	42
	ANEXOS	44
	ANEXO A – MANUAL DE USO	45
A.1	Cuidados iniciais	45
A.2	Painéis do equipamento	45
A.3	Manuseio do equipamento	46

1 Introdução

Um dos grandes problemas da engenharia é o desenvolvimento de materiais aplicáveis sobre uma gama de condições de operação. Em um projeto mecânico, os materiais utilizados precisam ser cuidadosamente planejados conforme a situação sob as quais estão sujeitos. Corrosão, fadiga, temperaturas extremas, oxidação, grandes impactos, grandes deformações são apenas alguns dos fatores a serem considerados na escolha do material ([ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010](#)). Uma escolha errada pode prejudicar o funcionamento de todo o sistema, causando danos, despesas e, potencialmente, riscos às pessoas envolvidas.

Por esse motivo, o estudo de propriedades mecânicas de materiais é uma área ampla de pesquisa e muitos investimentos são destinados à realização de ensaios e criação de metodologias para a caracterização de propriedades. De particular interesse para este trabalho é a alteração no comportamento das propriedades mecânicas de ligas metálicas, devido à presença de hidrogênio em sua estrutura cristalina. Este efeito foi observado pela primeira vez em 1875 ([JOHNSON, 1875](#)) e descrito como uma mudança temporária à resistência mecânica do ferro ao ser imerso em ácidos clorídricos e sulfúricos. Nos 149 anos decorridos desde então, o fenômeno foi estudado em diversos materiais e sob diferentes três diferentes causas de fragilização: ambiental, interna e reativa.

A fragilização Ambiental refere-se à cenários em que a difusão de hidrogênio é causada por um ambiente hidrogenado de alta pressão. Já a fragilização Reativa é aquela na qual ocorre uma reação química entre o material e o hidrogênio, causando mudanças na estrutura molecular do material. Por fim, na fragilização interna, a força motora por trás da adsorção é uma reação eletroquímica envolvendo a descarga de hidrogênio em um meio metálico ([NASA, 2016](#)). Esta última é de grande importância, visto a frequência com a qual ela ocorre em meios aquosos e, em especial, corrosivos. Um dos maiores e mais importantes exemplos disso é a água do mar.

Tem-se então a seguinte problemática: É necessária a aplicação de ligas metálicas altamente resistentes tanto à corrosão quanto à fragilização por hidrogênio, para utilização em alto mar. Para a descoberta de materiais que correspondam a essa demanda, faz-se necessário um método consistente de estudo dessa fragilização. Isto pode ser feito por meio da difusão induzida de hidrogênio na estrutura de materiais relevantes, em quantidades conhecidas e precisas. Os procedimentos mais utilizados hoje são os ensaios de polarização, podendo ser do tipo potencioestáticos, ou galvanostáticos, consistindo em aplicar uma quantidade fixa de corrente ou tensão a uma célula eletroquímica. Equipamentos capazes de fazer isso existem hoje no mercado como ferramentas altamente especializadas, sendo

capazes de realizar diversos ensaios além destes citados, e possuindo sistemas robustos de aquisição e análise de dados, como o PGSTAT302F da Metrohm® ou o EmSat4S da PalmSens®. Em contrapartida, essas soluções são caras, custando na faixa de R\$ 33.000,00 a R\$ 72.000,00, o que pode inviabilizar seu uso em larga escala. Como alternativa de baixo custo, foi desenvolvido o equipamento detalhado nesta monografia.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do projeto é o desenvolvimento de um galvanostato capaz de realizar ensaios de galvanometria de corrente constante na faixa de 5 a 200 mA, com uma margem de erro inferior 1 % e que apresente custo consideravelmente abaixo do preço de mercado de um equipamento comercial. Objetivos secundários incluem que o equipamento funcione também como potenciostato, na faixa de 0,1 a 3 V, e possibilite a coleta de dados após cada ensaio, com uma taxa de aquisição de até 1 amostra por segundo.

1.2 Método

O equipamento foi elaborado como um sistema de controle em malha fechada, utilizando um microcontrolador com um conversor digital analógico como fonte de corrente do sistema, e um conversor analógico digital para efetuar a leitura da corrente com a qual o controlador efetua o cálculo dos erros. Isso difere do funcionamento básico de um galvanostato analógico, no qual o mecanismo de realimentação é simplesmente um Amplificador Operacional (AO) em modo comparador.

A justificativa para essa mudança se deve à susceptibilidade de AOs a ruídos eletromagnéticos. Outros sistemas mitigam isso utilizando AOs de altíssima potência e precisão. Como o equipamento desejado já exige o uso de um microcontrolador e um conversor analógico-digital para a aquisição de dados, é possível utilizá-los também para fechar a malha de controle, sendo necessário aumentar a precisão de saída através de um conversor digital-analógico, que é um componente bem mais barato que os AOs de alta precisão.

O controlador utilizado foi um proporcional Integrativo (PI) com *feedforward* e seu funcionamento será descrito com mais detalhes durante a fundamentação teórica. A taxa de amostragem para o controlador é de 1 dado a cada 0,004 s, valor de amostragem escolhido de acordo com a lei de amostragem de Nyquist. Desses dados, o equipamento salva a uma taxa escolhida pelo usuário os valores de tensão na saída do controlador, a corrente enviada para a célula e a tensão do eletrodo de referência. Essas informações são salvas em um cartão de memória microSD e podem ser acessadas em um computador através de um editor de texto. Um script para ler os dados do arquivo gerado pelo equipamento e traçar gráficos nestes softwares também foi desenvolvido no decorrer do projeto.

1.3 Resultados

O galvanostato desenvolvido foi utilizado em ensaios de permeação de hidrogênio com amostras de ligas de níquel submersas em uma solução 0,5 M de H_2SO_4 . A corrente utilizada para esses ensaios de validação foi de 15 mA. Após os testes, foi possível medir quantidades de hidrogênio difusível nas amostras semelhantes às aquelas quantidades encontradas na literatura, comprovando que o equipamento foi bem sucedido em realizar a polarização galvanostática como desejado. A implementação do modo de controle potencioestático foi quase concluída, sendo necessária uma otimização do uso de memória programável.

1.4 Organização do Trabalho

Esse trabalho será dividida em sete partes. O capítulo 2 uma revisão da literatura existente sobre conceitos básicos de fragilização por hidrogênio e técnicas de polarização. Em seguida, traz-se o processo de desenvolvimento do equipamento, desde o projeto elétrico até a montagem. Depois disso, a descrição do modo de uso e as diferentes funcionalidades da ferramenta. Na quinta parte serão detalhados os ensaios realizados, incluindo as dificuldades encontradas e as sugestões de trabalhos futuros. A próxima parte apresenta as conclusões da pesquisa, com considerações sobre a metodologia utilizada e importância do trabalho feito ao longo do projeto. Por último, situam-se referências utilizadas, incluindo anexos relevantes e leituras complementares.

Uma explicação detalhada para o funcionamento do painel frontal e da interface do equipamento serão dadas em uma sessão seguinte.

2 Revisão Bibliográfica

O hidrogênio é o mais simples dos elementos químicos, caracterizado como um próton e um elétron, e podendo apresentar de 1 a 3 nêutrons, a primeira sendo a forma mais comum. Medições de seu raio atômico o colocam entre 25 e 120 picômetros (10^{-12}) (CLEMENTI; RAIMONDI, 1963), (SLATER, 1964). Nessa escala, virtualmente qualquer material apresenta porosidade suficiente para ser permeável, isto é, o hidrogênio é capaz de passar por entre as moléculas de quase qualquer outra substância, permitindo que em alguns casos, este átomo se estabeleça na estrutura do material.

Nos metais, este fenômeno altera o comportamento mecânico, podendo comprometer a performance do material. Para que projetos estejam seguros contra esse problema, é necessário modelar a forma e a quantidade na qual o hidrogênio adentra nas estruturas metálicas, além de conhecer o efeito de sua fragilização, que varia conforme o material. A modelagem pode ser feita utilizando as equações da eletroquímica como as leis de Fick, Nernst, Cottrell e Faraday (KISSINGER; HEINEMAN, 1996). Já a caracterização da fragilização requer uma abordagem empírica, uma vez que, mesmo após anos de pesquisa em fragilização por hidrogênio e vários mecanismos de fragilização tenham sido encontrados, ainda existem aspectos desconhecidos da mudança de propriedades. Por esse motivo, não existem ainda modelos matemáticos unificados para o estudo de fragilização por hidrogênio (LI et al., 2024), fazendo com que cada material deve ser estudado e testado individualmente.

Para este fim, deve-se medir as propriedades do material antes e depois do carregamento de hidrogênio. Portanto são necessários equipamentos para avaliar as propriedades e uma forma consistente de induzir hidrogênio na amostra. Apesar desse processo acontecer naturalmente em meios aquosos, é possível acelerar essa reação em ensaios eletroquímicos, nos quais uma corrente ou um potencial fixo são aplicados a uma célula eletroquímica para a causar a redução eletrolítica da água, promovendo a produção de hidrogênio a ser absorvido. A quantidade de hidrogênio gerado é diretamente proporcional à energia aplicada, o que permite a rápida saturação de hidrogênio no material. Esse ensaio de corrente fixo é denominado de galvanometria de corrente constante.

Para definir os parâmetros do ensaio de galvanometria, podem ser utilizados alguns testes padronizados como a voltametria cíclica e o teste de potencial em circuito aberto. Este primeiro é realizado variando linearmente a tensão aplicada e medindo a corrente resultante. É um teste importante, uma vez que ele dá informações sobre o comportamento do material sob polarização. O segundo teste é realizado deixando o circuito aberto, permitindo que a única tensão resultante no sistema seja proveniente das reações químicas

que ocorrem entre o eletrólito e o material. Esse teste possibilita a determinação do potencial de redução natural do material trabalhado. É possível utilizar esses dados em conjunto com as equações da eletroquímica para garantir a reação desejada. Na prática, é mais simples realizar uma análise gráfica dos resultados obtidos através da voltametria cíclica (ELGRISHI et al., 2017). Esses testes, assim como a metodologia dos ensaios serão descritos com mais profundidade a seguir.

2.1 Conceitos Básicos

As características mecânicas mais afetadas nos materiais que passam pela fragilização por hidrogênio são a ductilidade e a resistência mecânica, alterando os limites de resistência, proporcionalidade e elasticidade. Seguem algumas definições dessas propriedades (BEER et al., 2014):

- A ductilidade refere-se à capacidade de um dado material absorver energia via deformação antes de sofrer uma ruptura. Um material dito dúctil passa por grandes deformações antes de romper. Materiais de baixa ductilidade são ditos frágeis, e rompem subitamente, sem grandes deformações;
- O limite de proporcionalidade diz respeito ao ponto até o qual o material se deforma linearmente conforme o aumento da tensão;
- O limite de elasticidade trata-se de quanta deformação é perfeitamente reversível em um material, isto é, a que tensão um material pode ser submetido de maneira que, após removida a tensão, o material voltará às condições originais;
- O limite de resistência é o ponto até o qual um aumento de tensão em um material afeta a sua área de secção transversal uniformemente por seu comprimento. Após esse ponto, o material passa a se deformar em uma região localizada. A partir desse ponto, o material está altamente propenso ao rompimento.

Com essas definições é possível entender os efeitos da fragilização por hidrogênio. O efeito da presença de hidrogênio em estruturas cristalinas, de maneira geral, diminui todos esses limites, tornando o material mais frágil. Isso acontece por meio de vários mecanismos, alguns conhecidos e alguns desconhecidos. Por si só, o hidrogênio afeta a propagação de falhas, que é um dos mecanismos pelo qual metais apresentam ductilidade. Ele pode ainda exercer pressão no interior do metal ao preencher lacunas na estrutura cristalina. O hidrogênio também pode reagir com o metal, criando hidretos extremamente frágeis que tendem a se concentrar nos contornos de grão e nas fronteiras entre as diferentes fases metálicas (NGUYEN et al., 2024). Na Figura 1 podemos observar esses hidretos na estrutura cristalina do titânio.

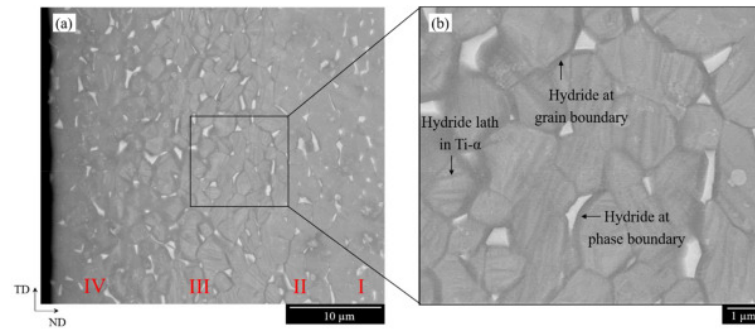


Figura 1 – Hidreto de titânio em estrutura cristalina (DECONINCK; DEPOVER; VERBEKEN, 2023).

Os grãos são estruturas microscópicas que compõe o metal. Trata-se de um agrupamento de átomos do material em regiões de mesma direção de polaridade magnética. O tamanho, formato e disposição desses grãos varia de acordo com a forma que o metal foi trabalhado e influencia drasticamente nas propriedades mecânicas do material. De grande importância nesse estudo, os contornos de grão também agem como armadilhas de hidrogênio, facilitando a formação de hidretos como descritos anteriormente.

Além disso, o hidrogênio age como concentrador de tensões, facilitando a propagação de trincas. Aqui deve-se ressaltar a importância da distinção entre uma trinca e uma falha. Falhas são defeitos nas estruturas, e acontecem naturalmente em qualquer estrutura, seja devido a impurezas durante a formação do material, ou devido a condições de pressão e temperatura. Já as trincas acontecem quando a estrutura cristalina de um metal rompe em um determinado local. As falhas fazem parte da morfologia dos cristais e tem o efeito de aumentar a ductilidade de um material, pois dão um mecanismo através do qual a energia proveniente da tensão pode ser dissipada. Trincas, por outro lado, são resultados de tensões acima do limite de resistência, e tem efeitos prejudiciais na integridade física do material. Na Figura 2 obtida por difração de elétrons retroespalhados, é possível observar uma trinca causada por fragilização por hidrogênio.

Em ensaios eletroquímicos, o processo de polarização é utilizado para introduzir hidrogênio nos materiais. Este processo é descrito como a alteração do potencial de uma célula do potencial de referência, devido à passagem de uma corrente. A célula é composta por dois ou mais eletrodos e ao menos uma fase de um eletrólito (J.; FAULKNER, 2000). Nos eletrodos, a transferência de carga se dá por meio de elétrons e no eletrólito por meio de íons e o estudo da eletroquímica diz respeito às reações que ocorrem na interface entre o eletrodo e o eletrólito. Para este projeto, a reação relevante é a redução do eletrólito, de maneira a separar de suas moléculas os átomos de hidrogênio, que são subsequentemente adsorvidos pelo eletrodo.

Para evitar reações indesejadas, é necessário conhecer as propriedades do material em análise. Para isso, é empregado o teste de voltametria cíclica. Nesse, um potencial

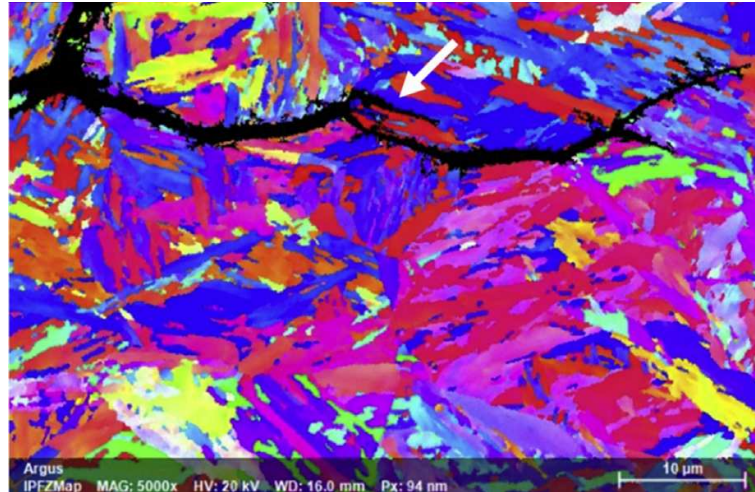


Figura 2 – Trinca induzida em estrutura fragilizada por hidrogênio (MARTINIANO et al., 2021).

variando linearmente é aplicado à célula, de maneira a modificar a dinâmica de polarização. Para cada potencial aplicado, uma determinada corrente será imposta ao sistema. Traçando o gráfico dos valores de corrente por tensão, obtém-se um gráfico denominado voltamograma, representado pela Figura 3, do qual obtém-se vários valores importantes. Primeiro, é possível medir os pontêciais de oxidação e redução e ainda a reversibilidade do sistema com base no deslocamento da curva ao decorrer de vários ciclos. Pode-se medir também a parcela da corrente que não pode ser associada a nenhuma reação de oxirredução. Esse último é particularmente relevante para o galvanostato, uma vez que apenas a corrente proveniente dessas reações é de fato proporcionais à quantidade de hidrogênio adsorvido.

Durante o processo de polarização, a corrente teria um comportamento sigmoidal em condições ideais. Isto é, começaria crescendo exponencialmente, até um dado ponto de inflexão a partir do qual o sistema tenderia a se aproximar assintoticamente de uma reta horizontal. Nessas condições, a equação seria perfeitamente descrita pela lei de Nernst (ATKINS; PAULA, 2006):

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln(Q) \quad (2.1)$$

Na qual:

E = potencial de redução;

E^0 = Potencial de redução sob condições padrões;

R = Constante universal dos gases, dada pela relação entre as condições de pressão, temperatura e volume de um gás;

T = Temperatura em Kelvin;

z = Carga em ions;

F = constante de Faraday, equivalente à carga elétrica presente em 1 mol de elétrons;

Q = quociente de reação, dado pela razão entre as quantidades relativas de produtos e reagentes.

Contanto, a curva descrita não pode ser obtida em prática, pois se presume um sistema em que nenhuma força se oponha à difusão dos íons. Em casos práticos, as reações eletroquímicas são limitadas de acordo com a primeira lei de Fick (ATKINS; PAULA, 2006), nas quais a difusão dos íons do eletrólito dependem do gradiente de concentração desses íons conforme:

$$J = -D \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.2)$$

Sendo

J = Fluxo de difusão, quantidade de substância que flui por uma área unitária em uma quantidade unitária de tempo;

D = Coeficiente de difusividade;

ϕ = Concentração, quantidade de substância por unidade de volume;

x = posição ao longo da direção de difusão

É natural então que, ao concentrar hidrogênio no eletrodo, o gradiente de difusão seja alterado. Para valores de carga abaixo do potencial de equilíbrio essa mudança não é significativa, uma vez que ela representa apenas um teto para o valor máximo de corrente. Apenas após ser excedido o potencial natural é que a corrente passa a diminuir conforme diminui também a velocidade de difusão dos íons que transmitem esta corrente. A curva proveniente desse efeito é prevista pela lei de Cottrell para um eletrodo planar. Para eletrodos com outras geometrias, é necessário aplicar também a segunda lei de Fick, com algumas complicações matemáticas fora do escopo deste trabalho (J.; FAULKNER, 2000).

$$i = \frac{nFAc_j^0 \sqrt{D_j}}{\sqrt{t\pi}} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

Sendo:

i = Corrente em amperes

n = Número de elétrons necessários para reduzir/oxidar uma molécula do material

F = Constante de Faraday

A = Área planar do eletrodo em cm^2

c_j^0 = concentração inicial do analito

D_j = Coeficiente de difusividade

t = Tempo em segundos

Utilizando essas equações, é possível desenhar um voltamograma como o da Figura 3 como citado anteriormente:

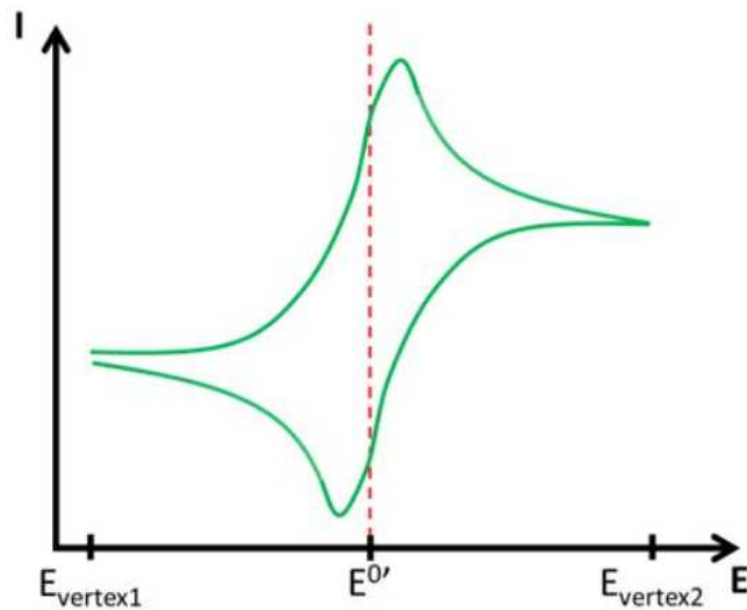


Figura 3 – Voltamograma de um sistema reversível. (PALMSENS, 2021)

Desse gráfico, tiram-se algumas informações relevantes. Imediatamente é possível observar a limitação de corrente prevista pelas equações descritas. A corrente chega a um determinado valor de pico, a partir do qual ela diminui devido à limitação por difusividade. Através desses picos é possível também determinar se um sistema é reversível, isto é, se tanto a reação de oxidação quanto a reação de redução acontecem em tempo suficientemente pequeno para não agirem como limitante. Tais reações são ditas cinematicamente viáveis e ocorrem quando os picos anódico e catódico são espaçados por um valor máximo de 59 mV (ELGRISHI et al., 2017) por elétron transferido durante a reação. Por fim, o valor de corrente desses picos traz informações sobre os potenciais e correntes de oxidação e redução, que serão os valores utilizados para determinar a corrente aplicada pelo galvanostato. Em termos simples, a corrente desejada está entre os picos do voltamograma na direção de aumento de potencial. Dessa forma, previne-se a corrosão ou redução do eletrodo em si.

A partir desses dados são configurados os parâmetros para o ensaio de galvanometria, que é um ensaio mais simples que o ensaio anterior, e consiste apenas em aplicar na célula eletroquímica um valor constante de corrente durante um intervalo de tempo.

O intervalo dado pela normatização ASTM é de cerca de 21 dias, e serve de base como quantidade mínima de tempo que o equipamento deve conseguir permanecer ligado e funcionando corretamente.

Além desse, alguns parâmetros foram levantados pelo time responsável pelo uso do equipamento. Ele deve funcionar na faixa de 10 a 200 mA, ser capaz de coletar dados a uma frequência de 1 Hz, e funcionar dentro de uma margem de erro de até 1% em torno do valor de corrente selecionado. Logo, pode-se interpretar o equipamento desenvolvido como uma fonte de corrente em malha fechada de alta precisão, dispondo de uma interface homem-máquina clara e intuitiva, permitindo programação para diversas condições de ensaio e que armazene os dados coletados. Para essa tarefa, é implementado um sistema digital de controle por meio de um microcontrolador ATmega328PU.

Microcontroladores são essencialmente computadores dentro de chips, responsáveis pela execução de um único programa. São essenciais para aplicações embarcadas e equipamentos portáteis, uma vez que substituem um computador normal por uma fração do tamanho. O Microcontrolador escolhido dispõe de notoriedade, sendo usado como processador das placas Arduino, equipamentos de programação muito empregados para aplicações simples ou para treinamento de iniciantes em conceitos básicos de automação e programação. Para os objetivos desse projeto, trata-se de uma solução barata e eficiente, de uso e implementação simples, e com ampla facilidade de manutenção por terceiros, vista a familiaridade que muitas pessoas têm com o dispositivo. O microcontrolador é utilizado em conjunto com um dos circuitos mostrados na Figura 4. Na esquerda está a estrutura convencional de um galvanostato e na direita de um potenciostato.

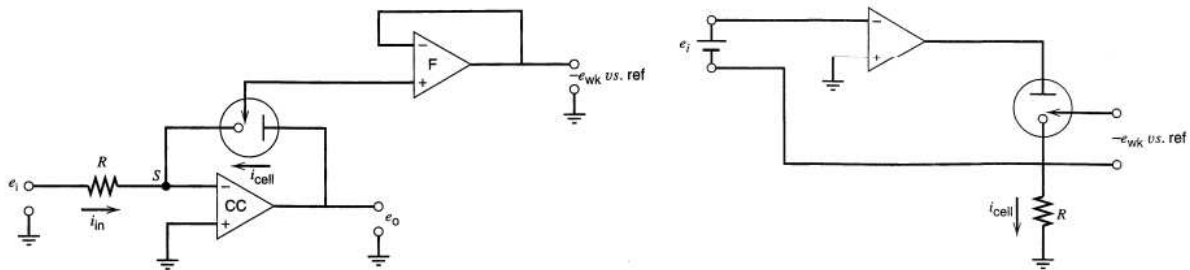


Figura 4 – Estrutura de um galvanostato analógico convencional (J.; FAULKNER, 2000).

Em ambas essas estruturas, o controle é realizado empregando-se um AO. Amplificadores operacionais têm vasta aplicabilidade em circuitos eletrônicos, sendo utilizados para realizar operações diretamente entre sinais de entrada. A seguir, uma breve explicação de seu funcionamento.

Na Figura 5 a entrada marcada com um sinal '-' é dita a entrada inversora, a entrada marcada com um sinal '+' é a entrada não inversora e V_{out} a saída do amplificador. Para promover a simplicidade do diagrama, foram omitidas as entradas de alimentação. O princípio básico de utilização do AO é a manipulação do sinal de saída com base na

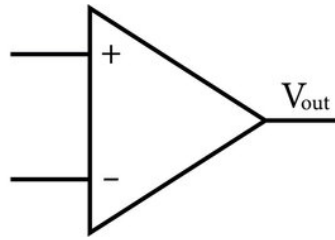


Figura 5 – Símbolo de amplificador operacional ideal

configuração do circuito de entrada. Algumas características dos amplificadores ideais são necessárias para que se entenda seu funcionamento embora na realidade, um AO seja melhor modelado como podemos ver na Figura 6

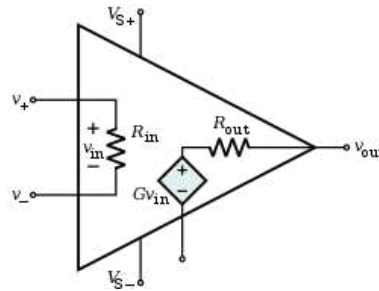


Figura 6 – Amplificador real (adaptada de (SSTATIC, 2017))

Dois fatores importantes são os valores das impedâncias R_{in} e R_{out} . No caso ideal a impedância R_{in} tem valor infinito, isto é, não permite nenhuma passagem de corrente, e a impedância R_{out} tem valor 0, ou seja, não afeta a passagem de corrente. Nessas condições, não há corrente entre as duas entradas apesar de elas estarem eletricamente conectadas. Para que isso seja verdade, temos que a tensão em ambas as entradas deve ser igual. Além disso, como a impedância de saída é 0, não existe nenhum impedimento que modifique o valor da tensão ou corrente na saída do AO. Na realidade, essas condições não podem ser cumpridas. A impedância de entrada, apesar de muito grande, na casa de até 10^{12} Ohms, não é infinita, existindo portanto uma pequena corrente entre as entradas. A impedância de saída também não é zero, o que modifica um pouco o sinal de saída em relação ao resultado da operação realizada com os sinais de entrada. Por fim, podemos ver ainda na figura que a tensão de saída é dada por $G \cdot V_{in}$, em que G é o ganho em malha aberta do amplificador. No AO ideal o valor de V_{in} é sempre de zero, uma vez que não passa corrente em R_{in} . O valor G do amplificador ideal deve portanto ser infinito. Na realidade, o AO possui um ganho na casa de 10^4 a 10^8 , isto é, a tensão obtida pela diferença entre as duas entradas é multiplicada por um valor muito grande, como mostra a Figura 2.5

$$\begin{aligned}
V_{out} &= G \cdot (V^+ - V^-) \\
V_{out} &= G \cdot (V_{in} - V_{ref}) \\
\frac{V_{out}}{G} &= (V_{in} - V_{ref})
\end{aligned}
\tag{2.5}$$

Existem duas configurações importantes envolvendo AOs para a aplicação no nosso projeto. A primeira delas, que pode ser vista na Figura 7 é a configuração de seguidor de tensão, também chamado de buffer. Nessa montagem, a tensão na saída do amplificador é igual àquela na entrada não inversora. A princípio esse uso pode parecer redundante, afinal, o AO não está realizando nenhuma alteração ao sinal de entrada. O motivo de um seguidor de tensão ser desejável em um circuito eletrônico é que, devido à sua alta impedância de entrada, praticamente não passa corrente pelos pinos de entrada. Isso é extremamente importante ao realizar medições, uma vez que, ao modificar o valor da corrente, a própria medição estaria modificando o valor lido.

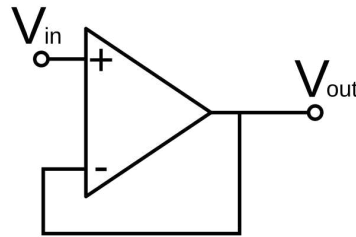


Figura 7 – Amplificador na configuração seguidor de tensão

A segunda configuração relevante é a de amplificador comparador. Nesta montagem, é conectado à entrada inversora um ponto do circuito no qual deseja-se que o valor de tensão seja o mesmo encontrado na entrada não inversora. Por isso, essa configuração é chamada de comparador. O AO "compara" as duas entradas e modifica seu valor de saída até que as duas entradas sejam iguais. Desenvolvendo a equação (2.5) para um valor muito grande de G , pode-se aproximar o lado esquerdo da equação a zero como na equação (2.6), demonstrando o porquê de o AO igualar os dois valores.

$$\begin{aligned}
(V_{in} - V_{ref}) &\approx 0 \\
V_{in} &\approx V_{ref}
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

Com essa configuração, o controle pode ser feito apenas alimentando ao AO o valor de tensão desejado para o controle. Isso claro, no modo de operação potencioestático. Para o modo galvanostático, é necessário aplicar um valor de tensão baseado na leitura da corrente. Um método de controle galvanostático mais direto poderia ser obtido utilizando a estrutura , porém essa abordagem dificultaria a utilização do equipamento como potencioestato, e como ambas as aplicações são desejáveis, nenhuma dessas duas estruturas é desejável em relação a outra, o que é um dos primeiros incentivos para uma estrutura alternativa de controle. Outros motivos serão citados nas etapas posteriores.

A alternativa escolhida foi a de um controlador PI. Este tipo de controlador, muitas vezes implementado em sua versão completa (PID) é um dos mais usados por ser simples, de fácil implementação e ter uma vasta gama de conteúdo de apoio disponível. Primeiramente, PID significa proporcional integrativo derivativo. Esses nome é indicativo da forma como o controlador age de maneira a corrigir erros. A parcela proporcional do controlador é responsável pelo controle de erro imediato do sistema, ou seja, é responsável por aplicar ao sistema um valor proporcional à diferença entre o valor desejado e o valor lido naquele instante. A parcela integrativa refere-se ao erro cumulativo. Um controlador puramente proporcional pode se estabilizar em um valor constante, porém diferente daquele desejado devido a pontos de estabilidade do sistema. Quando isto acontece, o erro integrativo cresce até ser suficiente para tirar o sistema daquele ponto. Por fim, a parcela derivativa, não é utilizada no presente trabalho, devido às interações desse tipo de controle com sinais ruidosos, pois modificações muito rápidas do sinal lido causam sobrecorreções na parcela derivativa tornando o sistema mais oscilatório. A essas parcelas são relacionados pesos, tipicamente denotados por K_p , K_i e K_d respectivamente. Apesar de o equipamento não empregar o controle derivativo, ele é completamente implementado em código, e pode ser utilizado apenas modificando o valor de seu peso para um valor diferente de zero.

Para a decisão da melhor forma de projetar esse controlador, é necessário entender os conceitos de controle linear, em particular, conhecimento acerca da resposta em frequência, e da estrutura de blocos dos sistemas. Um diagrama de blocos é uma forma comum de representar um sistema de controle. Na Figura 8 se encontra um diagrama de blocos para um sistema genérico.

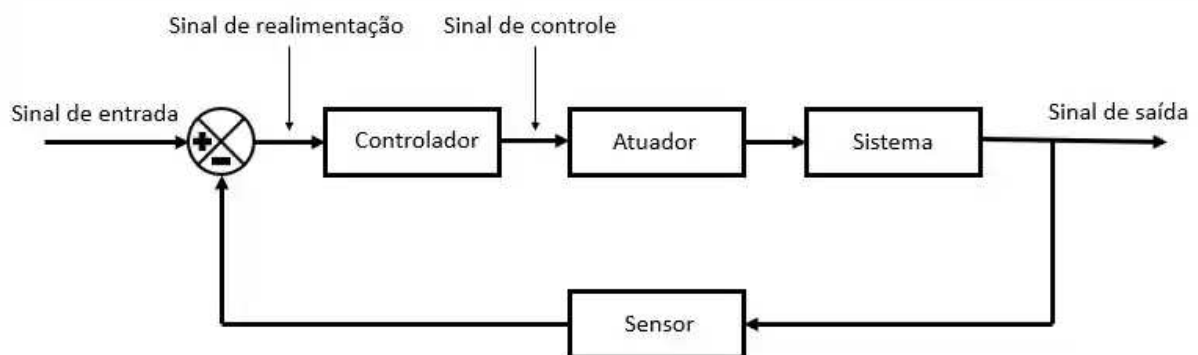


Figura 8 – Diagrama de blocos genérico (RESPONDEAI, 2019).

O sinal é modificado em ao passar por cada um dos blocos do diagrama. Se a entrada for considerada como uma função do tempo $r(t)$, então existe uma função $f(t)$ referente a um dado bloco do diagrama de tal maneira que a função de saída do bloco seja dada pela convolução das duas funções. A convolução é um operador linear dado pela

Equação (2.7)

$$(r * f)(t) := \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau)f(t - \tau)d\tau \quad (2.7)$$

Para eliminar a necessidade de fazer a convolução das duas funções, é possível trabalhar as funções invés disso como funções da frequência, no qual a operação de convolução é dada por uma simples multiplicação. Apesar de muito útil, no cotidiano é extremamente incomum que pensemos em algo do ponto de vista da frequência, o que dificulta a obtenção de um modelo matemático de maneira direta. Uma forma de contornar essa dificuldade é equacionando um modelo no domínio no tempo e encontrando uma forma de transformar este modelo para o domínio da frequência. Este procedimento foi estudado por Pierre-Simon, Marquis de Laplace em seus trabalhos sobre teoria da probabilidade (LAPLACE, 2019) e denominado a transformada de Laplace.

Com essa ferramenta, podemos ler a saída do sistema no domínio do tempo, aplicar a transformada de Laplace para encontrá-la no domínio da frequência e em seguida expressá-la em função da entrada, também no domínio da frequência para obter a função de transferência do sistema. A partir dela, várias ferramentas existem para auxiliar no projeto do controlador, como por exemplo as funções de controle do MATLAB®. Uma das principais formas que o software auxilia nesse âmbito é na alocação de pólos e zeros do sistema. Uma função de transferência tem seus pólos dados pelas raízes de seu denominador e seus zeros pelas raízes do numerador. A localização desses pólos nos diz acerca do comportamento do controlador.

Utilizando uma função para uma saída de segundo grau genérica, podemos encontrar os valores desejados para esses pólos utilizando alguns requisitos de projeto como por exemplo o tempo de subida e o máximo valor de overshoot. Sabendo desses valores, podemos apenas aplicar um controlador que faça com que o sistema físico real passe pelos mesmos pólos, supondo que a resposta desse sistema também seja de segundo grau.

3 Metodologia

Esse trabalho foi baseado no projeto para um potenciostato computadorizado como mostra a Figura 9. Nessa estrutura, o bloco central é exatamente o circuito representada na Figura 4, enquanto os demais componentes servem funções auxiliares.

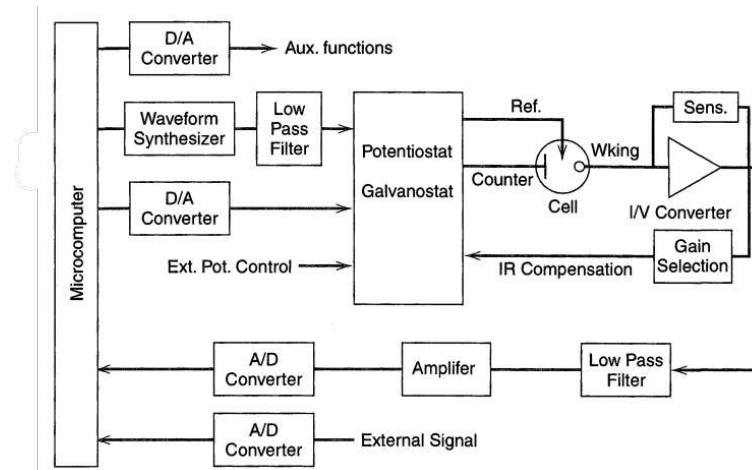


Figura 9 – Galvanostato controlado por computador (J.; FAULKNER, 2000).

Um sintetizador de função de onda é utilizado para gerar a entrada desejada no sistema. Um filtro passa baixa é utilizado na entrada do circuito para prevenir ruídos de alta frequência, mitigando os problemas de amplificação de ruído do amplificador operacional. Após a célula, um circuito de compensação eletrônica de impedância é utilizado na realimentação para impedir que a queda de tensão na célula afete o resultado da leitura. Um seletor de ganhos também é utilizado para garantir maiores precisões de leitura para valores mais baixos. O sinal passa por outro filtro passa baixa, é amplificado e convertido para um sinal digital para possibilitar sua leitura. Por fim, o equipamento possui uma forma de realizar comunicação externa com outros equipamentos por meio de outros dois conversores. Testes iniciais foram realizados com essa estrutura, montada em protoboard, mas não foi possível alcançar resultados satisfatórios. Testes com AO's mais precisos demonstraram performances melhores, porém ainda inadequadas.

Utilizando esse circuito como ponto de partida, varias alterações foram feitas para adequação do equipamento aos requisitos de projeto. A primeira alteração feita foi a remoção do sintetizador de onda, uma vez que o aparelho será utilizado apenas em ensaios de entrada constante. Em seu lugar, um DAC foi utilizado para aumentar a precisão de saída do microcontrolador. Em seguida, para evitar a grande amplificação de ruídos dos amplificadores operacionais sem recorrer à utilização de amplificadores de alta precisão e alta saída de corrente, que são muito mais caros que amplificadores convencionais, a estrutura básica do equipamento foi replanejada. O AO comparador foi substituído por

um controlador PI digital. Esse modelo de controlador, mais comumente implementado também com sua parcela derivativa, foi escolhido para evitar interações indesejadas entre o alto ruído eletromagnético ao qual o material será exposto em seu local de trabalho e a parcela derivativa, além de o sistema ser suficientemente lento para que esta parcela derivativa não seja importante para o projeto. O microcontrolador envia para o DAC, por meio de comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C), o valor de tensão desejado. Para definir esse valor, o microcontrolador utiliza a leitura de corrente, realizada pelo ADC, calcula o erro de rastreamento e então obtém a tensão de saída usando o PI. Uma importante distinção entre essa forma e o AO comparador é a discretização do sinal de saída, introduzindo uma resolução máxima ao sistema, que deve ser suficientemente grande para possibilitar seu uso.

Com isso em mente, foi escolhido um DAC de 12 bits com saída de 0 a 5 V. O que isso significa é que o conversor recebe do microcontrolador um número de 0 a $2^{12} - 1$, isto é, 4095. A resolução do módulo portanto é o valor máximo do seu intervalo de saída (5 V) dividido por 4095, ou seja, 1,25 mV. É importante para o funcionamento do sistema que o erro máximo permissível seja maior do que este valor, isto é, que a menor variação possível do DAC ainda esteja dentro da faixa de valores aceitável. Para um erro de 1% isso significa que o menor valor controlável de tensão é de 125 mV. Para um resistor de 10 Ohms, isso nos daria também uma corrente mínima controlável de 12,5 mA. Na prática, o alcance de tensão do DAC é reduzido devido ao efeito capacitivo da amostra, caindo cerca de 40%, o que nos dá uma tensão mínima controlável de 50 mV e 5 mA. Devido a esse fato, o equipamento foi projetada para um limite mínimo de 10 mA.

Uma interface básica foi programada no microcontrolador, utilizando uma máquina de estados finitos. Essa máquina realiza operações com base em três botões e a posição atual da máquina, neste caso, relacionado a qual tela o usuário está vendo. Esses três botões são ‘cima’, responsável por navegar os menus e acrescentar valores numéricos, ‘baixo’, responsável por navegar os menus e decrescer valores numéricos e ‘menu’, responsável por confirmar valores e mudar a posição da máquina de estados. O funcionamento da máquina pode ser visto em detalhes no fluxograma da Figura 10. O equipamento inicia na tela de ensaio, com os parâmetros do ensaio anterior, de maneira a dar praticidade durante períodos onde os ensaios são executados com a mesma referência. O botão menu é utilizado para acessar o menu inicial a partir do qual o usuário pode alterar o tempo de amostragem e valor da referência do ensaio, realizar o auto ajuste do equipamento ou iniciar outro ensaio. Sair do ensaio ou modificar os parâmetros ambos levam o usuário a uma tela de confirmação. Em um display LCD, o usuário pode ver um menu com o qual navegar pelas diferentes telas da máquina, cada uma referente a um estado. Esse display conta com um módulo de extensão de pinos digitais de 8 bits, responsável por realizar a comunicação entre o LCD e o microcontrolador.

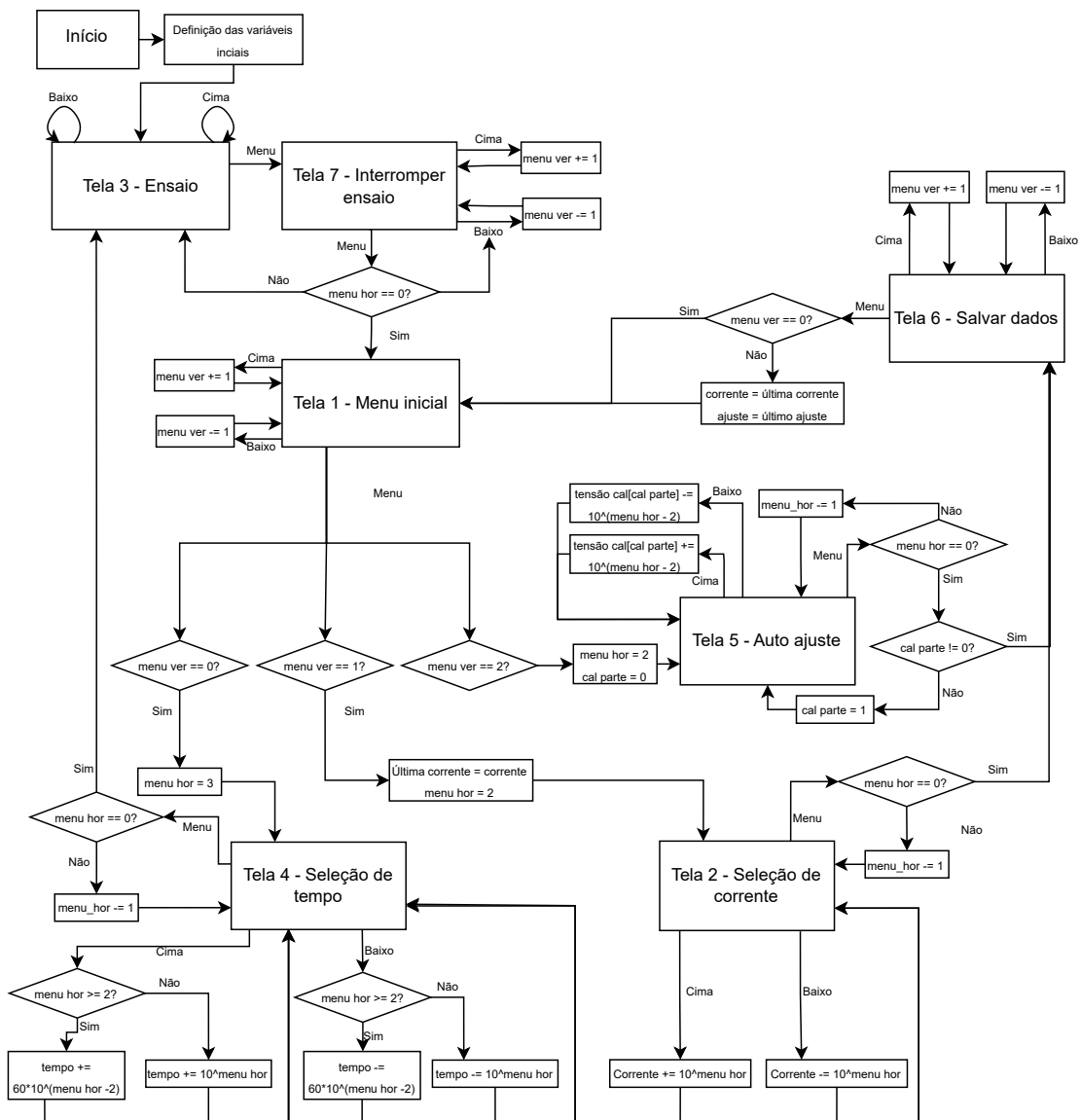


Figura 10 – Fluxograma da máquina de estados.

O módulo de 8 bits foi escolhido por que, apesar de mais caro que módulos de 4 bits, ele apresenta maior confiabilidade. O display LCD utilizado é um display com instruções de 8 bits, ou seja, ele recebe mensagens com 8 bits de informação, e seu comportamento depende dos 8 bits lido. O mesmo é verdade para a grande maioria dos displays lcd. Apesar disso, módulos extensores de 4 bits são muito mais comuns devido ao seu preço reduzido, e funcionam razoavelmente bem mandando sequencialmente duas mensagens de 4 bits que o display interpreta como uma única instrução. Para isso, é imprescindível que as duas mensagens sejam sincronizadas. Mudanças de carga, como por exemplo a mudança na corrente de saída do equipamento, podem tirar essas mensagens de sincronia, introduzindo um comportamento errático ao display e podendo até travá-lo. O módulo de

8 bits elimina essa possibilidade.

Ainda partindo do circuito computadorizado da Figura 9, uma das funções auxiliares implementadas foi o sistema de coleta de dados. O módulo SD foi implementado e o código alterado para efetuar a comunicação com este via SPI. Vários testes foram executados e essa função passou por diversas reelaborações à medida que problemas de comunicação foram encontrados. Nessa etapa, o controlador PI também passou por algumas otimizações. Por exemplo, a utilização de um PI adaptativo para diminuir o tempo de estabilização e também a oscilação do sinal em regime estacionário. Neste método, o controlador alterna entre dois valores para os pesos do PI, utilizando valores mais altos para diminuir o tempo de subida e valores mais baixos uma vez que o sistema se encontre suficientemente próximo do valor de referência.

Outra medida vantajosa para diminuir o tempo de estabilização foi a utilização de um offset para tirar o controlador de sua ‘zona morta’. Para isso, é somado à saída do controlador um valor estimado para a queda de tensão na célula, assim como um valor de tensão que, caso a queda de tensão na célula fosse zero, resultaria na corrente desejada passando pelo resistor de medida. Com essas modificações o tempo de subida foi diminuído para menos de 2 min, facilitando os testes de curta duração que serão utilizados para encontrar os valores finais para os pesos do controlador. Até este ponto o sistema foi desenvolvido usando valores subótimos, adequados para os testes anteriores, mas obtidos empiricamente, sem aplicação rigorosa das teorias de controle. Uma metodologia mais específica para projeto é necessária para melhorar a performance.

Para isso, é necessário encontrar um modelo matemático representativo do sistema, um procedimento complexo de se fazer por meio do equacionamento do sistema físico. Alternativamente, um modelo foi obtido aplicando degraus ao sistema. O programa aplica degraus com amplitude de 4 V e com duração aleatória entre 1 e 9 s e o ensaio é executado por uma quantidade arbitrária de tempo. Este é um tipo de sinal da família de sinais denominada sequências binárias pseudo-aleatórias, do inglês, *pseudo-random binary sequence* ou PRBS, e são muito úteis na área de identificação de sistemas (GODFREY, 1991), uma vez que é possível demonstrar matematicamente que esse sinal excita a planta em várias faixas de frequência. Ensaio de 10, 30 e 60 min foram empregados para que uma função de transferência representativa fosse encontrada. Os dados de entrada e saída foram divididos pela metade, com a primeira metade sendo usada para identificação do sistema e a segunda metade para validação. Nas Figuras 11 e 12 encontram-se os gráficos de entrada e saída, e a saída calculada a partir da função de transferência respectivamente.

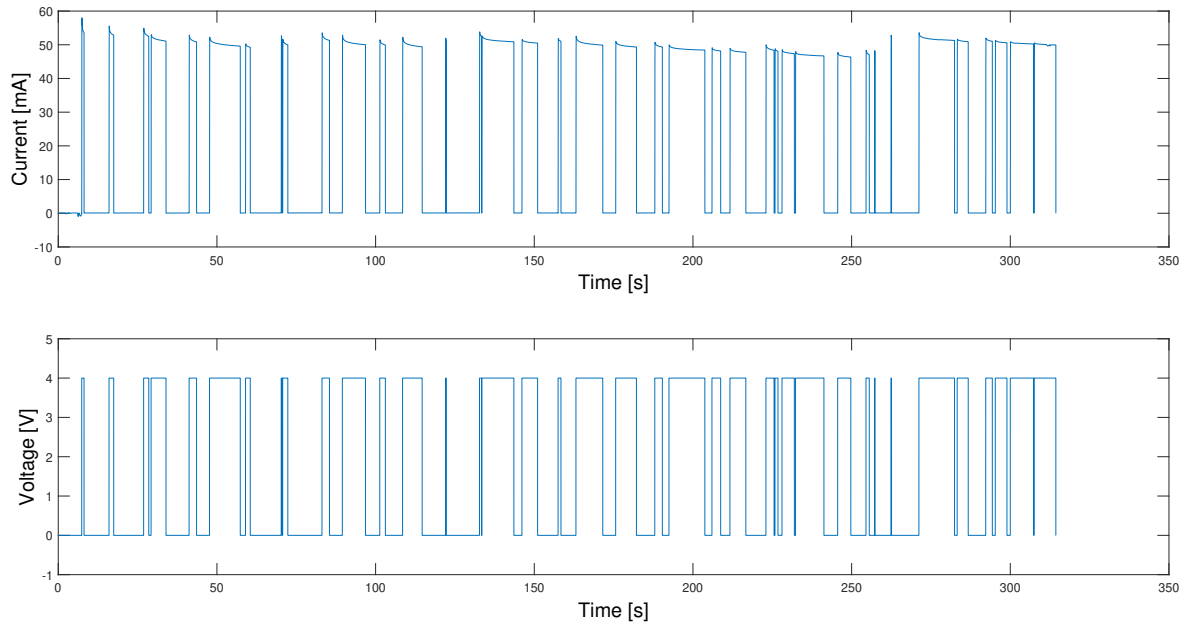


Figura 11 – Entrada (tensão) e saída (corrente) da planta. Dados experimentais.

Com esses dados, é possível encontrar a função de transferência. Aqui seria possível utilizar ferramentas do cálculo numérico para obter uma função polinomial que represente adequadamente a saída, e assim relacionar as funções de saída e de entrada. Novamente, a ferramenta computacional é útil para a automatização desse processo. Utilizando a ferramenta *systemIdentification* do MATLAB® e utilizando os sinais da Figura 11 como entrada e saída e escolhendo o método função de transferência, encontra-se a função $G(s)$ dada pela Equação (3.1), onde $U(s)$ e $Y(s)$ são respectivamente as funções de entrada e saída dadas no domínio da frequência. É importante mencionar que a saída aqui está normalizada, isto é, subtraída do valor médio de saída, para prevenir o aparecimento de frequências ‘fantasma’. Por este motivo podemos ver que a saída chega a valores negativos.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.1)$$

$$G(s) = \frac{232,1s+34,92}{s^2+18,26s+3,086}$$

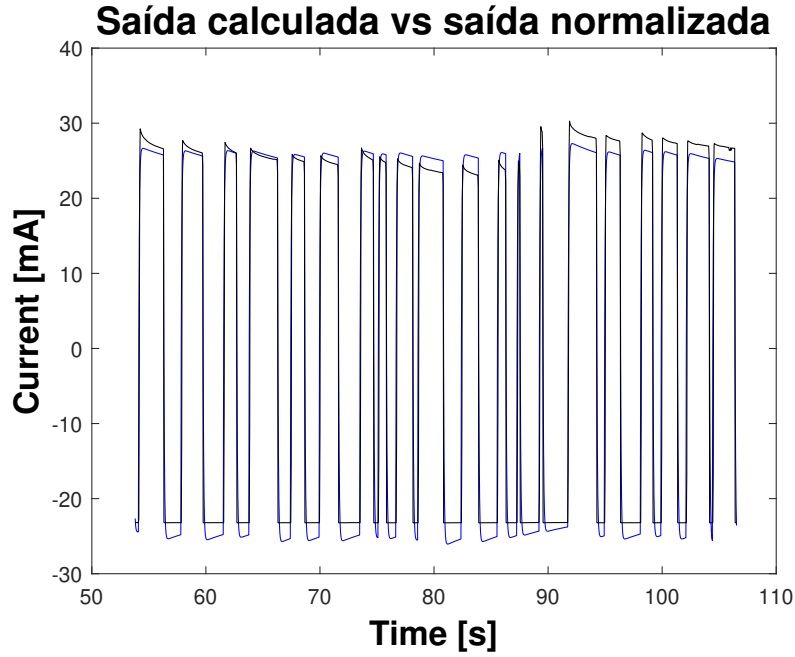


Figura 12 – Saída simulada e experimental normalizada.

Utilizando a função encontrada, juntamente com o modelo conhecido para controladores PI, é possível obter os ganhos do PI de acordo com os requisitos do projeto. Para isso, basta alocar os polos de malha fechada na região ditada por esses requisitos. Em particular, define-se um valor de máximo sobressinal de 5% para impedir que o controlador saia da região na qual o PID adaptativo utiliza os pesos menores.

$$MS = 100e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.2)$$

Logo, tem-se um coeficiente de amortecimento ξ de 0,69. Escolhendo como segundo requisito um tempo de estabilização de 10 segundos para aumentar a agilidade dos testes preliminares e utilizando o critério de 2% de oscilação, tem-se (OGATA, 2010):

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{4}{\xi\omega_n} \\ \omega_n &= \frac{4}{10\xi} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Logo, a frequência natural desejada é 0,58 rad/s. Utilizando esse valor, juntamente com o fator de amortecimento encontrado anteriormetne, são calculados os polos desejados de malha fechada:

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \\ s_{1,2} &= -0,40 \pm j0,42 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Como um controlador PI possui um zero arbitrariamente posicionado e um pólo necessariamente na origem, é necessário alocar o zero deste sistema de maneira a fazer com que o LGR (Lugar geométrico das raízes) passe por esses polos. Isso pode ser feito matematicamente, resolvendo as equações pertinentes às regras de construção do LGR. Outra possibilidade é utilizar a ferramenta computacional para ajustar visualmente a localização dos zeros e acompanhar em tempo real o formato do root locus. Este procedimento pode ser realizado no MATLAB® por meio da ferramenta *sisotool*, facilitando o trabalho de projeto. Entretanto, ao alocar este zero, é possível perceber que, apenas com ele, não é possível fazer com que o LGR passe pela localização desejada. É necessário projetar ainda um compensador com um segundo polo para obter o resultado esperado. Alocando o zero do controlador PI suficientemente à esquerda e alocando o polo do compensador utilizando a ferramenta *sisotool*, temos o rootlocus mostrado na Figura 13, obtemos um polo adicional em $s = 0,775$.

$$C(s) = \frac{0,0012(s + 21)}{s(s + 0,775)} \quad (3.5)$$

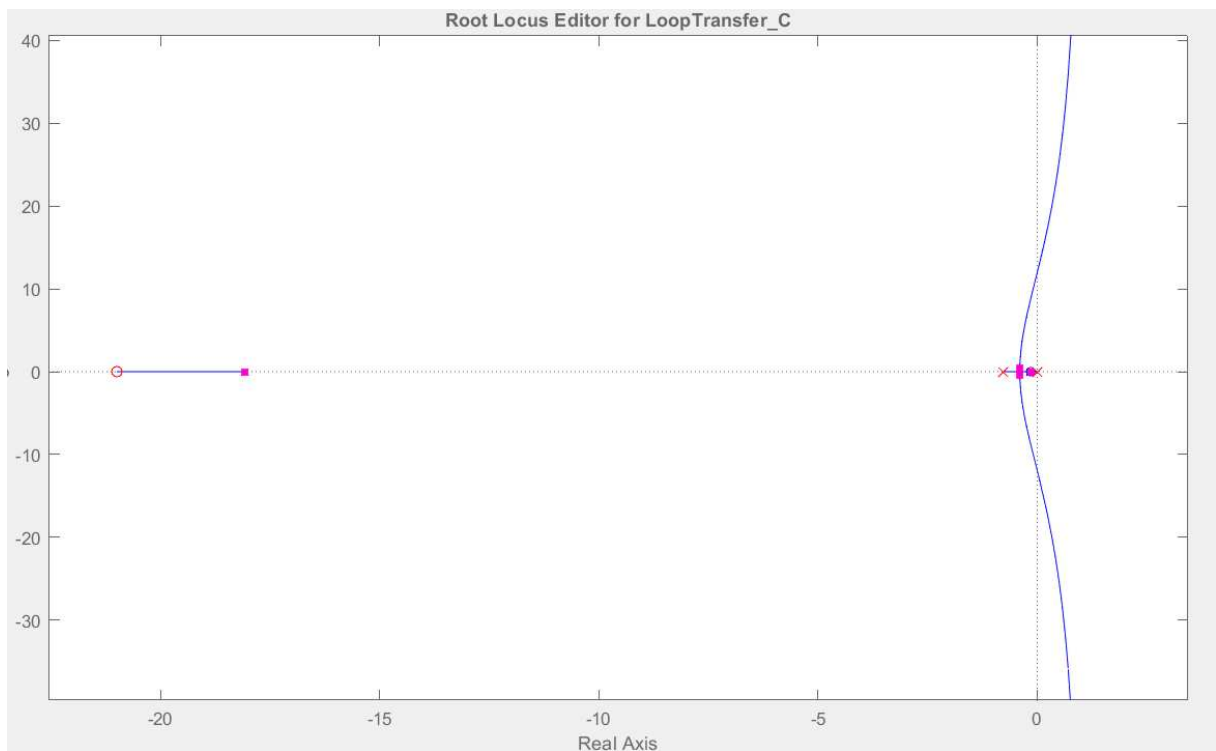


Figura 13 – Lugar geométrico das raízes do sistema.

Sabendo a forma desejada da função de transferência do controlador, podemos encontrar os valores dos ganhos do PI através do sistema de equações como demonstrado a seguir:

Durante o desenvolvimento dessa versão da placa foi também efetuada a manufatura da caixa de alojamento do circuito. O alojamento consiste em uma caixa patola PB-208 na qual foram feitos furos para a passagem de tomadas, conectores externos e módulos. Estes módulos referem-se ao display que é montado na caixa por meio de um encaixe com interferência e um módulo microSD que é parafusado na lateral do painel frontal. A caixa dispõe de seis espaçadores que foram utilizados para a fixação da placa por meio de parafusos M3. Juntamente à placa é montado também um transformador abaixador com tap central +15V/+15V que recebe da tomada a alimentação de 220 V.

A seguir encontra-se uma lista dos componentes utilizados para a montagem das placas.

3.1 Lista de itens

Tabela 1 – Componentes utilizados e preços(*De acordo com cotação do dólar no dia 23/08/2024).

Item	Quantidade	Preço(R\$)*
ATMEGA328 pu	1	13,81
Base para CI 28P	1	19,27
Capacitor eletrolítico 3300 uF 25 V	2	9,15
Capacitor cerâmico 330 nF 50 V	2	1,83
Capacitor eletrolítico 22 uF	1	1,52
Capacitor cerâmico 100 nF 50 V	5	1,26
Capacitor eletrolítico 100 uF 16 V	1	0,89
Capacitor cerâmico 22 pF 50 V	1	0,99
Capacitor eletrolítico 3300 uF 16 V	1	6,89
Diodo 1N4001	3	0,52
Diodo 1N4007	4	0,52
Terminal Tblock 3 posições	1	3,60
Conector fêmea 4 vias	2	0,89
Conector fêmea 5 vias	1	0,94
Conector fêmea 6 vias	2	1,67
Conector fêmea 7 vias	1	1,67
Conector fêmea 9 vias	1	1,51
Conector macho 4 vias	1	2,14
Conector macho 6 vias	2	3,13
Conector macho 7 vias	2	3,13
Conector macho 9 vias	1	5,64
Terminal crimp	39	0,08
Conector fêmea 6 vias barra de pinos 180° empilhável	1	7,26
Termistor NTC	1	2,74

Resistor de filme de carbono 10 k Ω ¼W 5%	2	0,53
Resistor de filme de carbono 220 Ω ¼W 5%	2	0,53
Resistor de filme de carbono 12k Ω ¼W 5%	1	0,53
Resistor de filme de carbono 10 Ω 2 W 0,1%	1	10,83
Transistor NPN BC548C 30V 100mA 500mW	1	0,79
Transistor NPN TIP41C 100 V 6 A 65 W TO-220	1	4,05
Regulador tensão linear 7815 15 V 1.5 A TO-220	1	4,00
Regulador tensão linear 7915 15 V 1.5 A TO-220	1	6,29
Regulador tensão linear 7812 15 V 1.5 A TO-220	1	3,21
Regulador tensão linear 7808 15 V 1.5 A TO-220	1	4,16
Regulador tensão linear 7805 15 V 1.5 A TO-220	1	4,79
Conversor Digital Analógico 12 bits 5 V	1	26,04
Conversor Analógico Digital 16 bits 5 V	1	78,73
Amplificador operacional TL034IN \pm 15 V 40 mA	1	17,71
Base para CI 14p	1	14,39
Cristal oscilador HC49/H4 16 MHz	1	2,64
Chave tátil	3	0,53
Fusível de vidro 100 mA ação rápida	1	6,98
Soquete D-Sub 9 pinos	1	56,83
Display LCD 20x4	1	94,70
Módulo de expansão I/O MCP27013	1	52,50
Tomada AC tripolar para painel com chave e fusível	1	23,49
Módulo SD	1	39,59
Cartão de memória microSD 16 GB	1	59,60
Transformador bivolt 15+15 V	1	49,90
Varistor 234 V 100 A	1	4,25
Caixa Patola plástico ABS 178x170x80 mm	1	86,96
Cabo flat de 10 condutores 4 ft	1	9,33
Conector borne preto	4	5,39
Conector borne vermelho	2	6,03
	Total	814,81

4 Resultados

O equipamento foi continuamente testado em células simples durante o processo de prototipagem, montadas com água salina em béquers. Para maior confiabilidade, o equipamento precisaria ainda ser utilizado em ensaios mais próximos das condições reais, isto é, utilizando a liga de níquel correta em um ambiente com controle básico de temperatura, de alto ruído eletromagnético, em soluções de ácido sulfúrico e em containers selados e devidamente desaerados. Os ensaios de validação foram realizados seguindo esses parâmetros e os resultados obtidos foram medidos com um analisador de hidrogênio e comparados a valores encontrados na literatura.

Ao todo foram realizados 25 ensaios de validação, com resultados de corrente média e desvio padrão por ensaio. A primeira coluna indica a identificação do corpo de prova por material, a segunda coluna lista a corrente média no corpo de prova, a terceira coluna apresenta o desvio padrão dos valores de corrente lidos e a quarta coluna contém a duração de cada ensaio em horas. Esses resultados foram obtidos durante a terceira etapa do processo de desenvolvimento e portanto correspondem aos valores sub-ótimos das constantes de controle.

Tabela 2 – Dados dos ensaios com corpos de prova C22.

Ensaio	Corrente média [mA]	Desvio Padrão [mA]	Duração [h]
CP01	15,00	0,15	159
CP02	15,00	0,03	164
CP03	15,00	0,04	483
CP04	15,00	0,08	245
CP06	15,00	0,10	88
CP07	15,00	0,14	72
CP08	15,00	0,14	72
CP09	15,00	0,10	23
CP10	15,00	0,05	156
CP11	15,00	0,03	157
CP12	15,00	0,03	157
CP13	15,00	0,05	158
CP14	15,00	0,05	158

Tabela 3 – Dados dos ensaios com corpos de prova Liga 59.

Ensaio	Corrente média [mA]	Desvio Padrão [mA]	Duração [h]
CP01	15,00	0,11	22
CP02	15,00	0,25	22

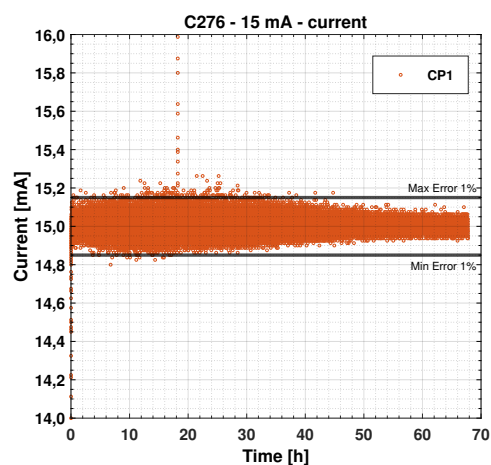
Tabela 4 – Dados dos ensaios com corpos de prova C276.

Ensaio	Corrente média [mA]	Desvio Padrão [mA]	Duração [h]
CP01	15,00	0,06	68
CP03	14,99	0,23	23
CP05	15,00	0,08	23
CP06	14,99	0,35	23
CP07	15,00	0,12	23
CP08	15,00	0,10	22
CP09	15,00	0,07	61

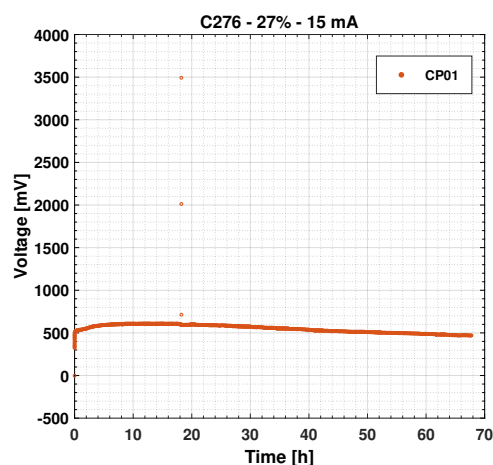
Podemos observar que os resultados de hidrogenação e de estabilidade da corrente atenderam aos requisitos do projeto. Nas Figuras 15 e 16 os gráficos referentes a alguns ensaios destacando as características dos ensaios realizados.

É possível observar alguns picos de corrente e de tensão cuja causa não pôde ser identificada, mas como esses picos duram de 5 a 10 segundos em ensaios de múltiplos dias, eles não foram considerados problemáticos. A grande variação nas curvas do eletrodo de referência por outro lado, estão sendo investigadas e estão sendo causadas possivelmente por problemas na célula eletroquímicas. Uma tentativa de corrigir esses problemas foi a instalação de um rotâmetro para controlar a vazão de nitrogênio que entra na célula para realizar o desaeramento. Após a instalação o comportamento do eletrodo de referência se mostrou muito mais consistente, como podemos ver a seguir.

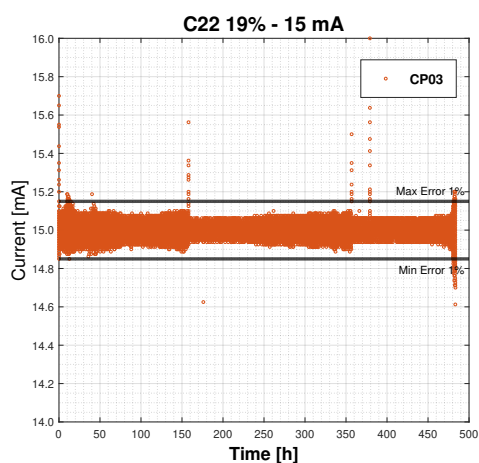
Os gráficos são bem representativos dos resultados gerais obtidos e apartir deles, juntamente com uma análise estatística dos demais ensaios, é possível aferir que o galvanostato está funcionando de maneira satisfatória, com os requisitos de desempenho oscilatórios e de regime estacionário dentro dos limites desejados.



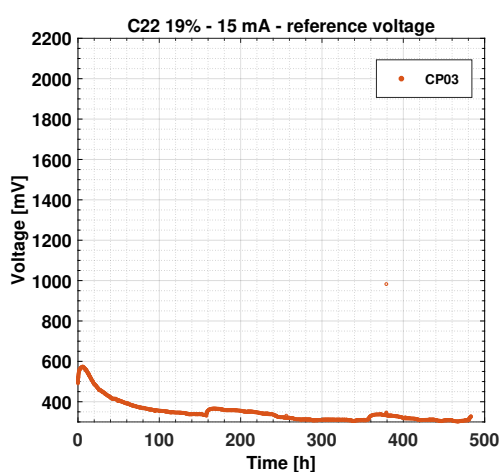
(a)



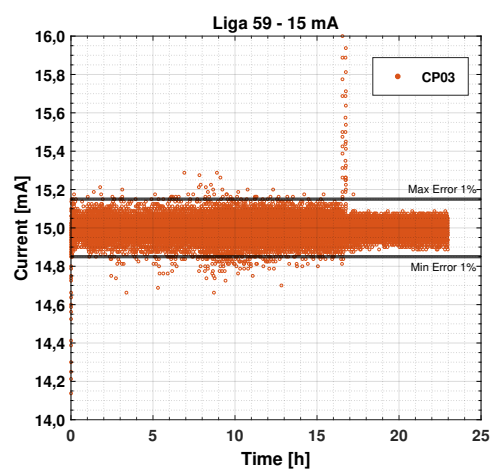
(b)



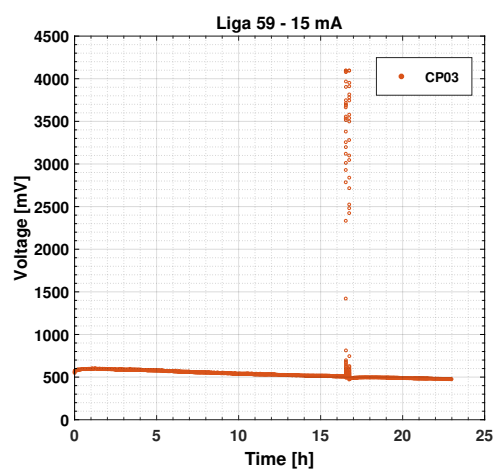
(c)



(d)

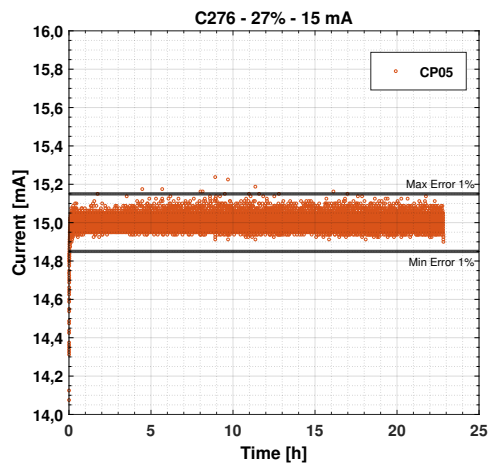


(e)

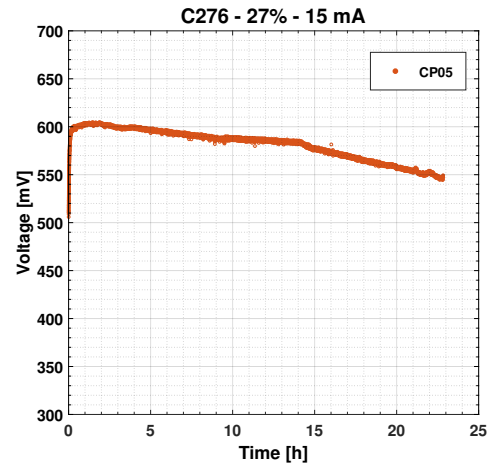


(f)

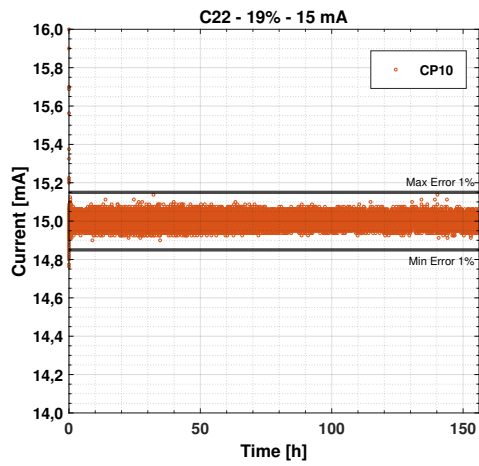
Figura 15 – Ensaio em corpo de prova C276 27%. Em (a), (c) e (e) curvas de corrente e em (b), (d) e (f) curvas tensão do eletrodo de referência.



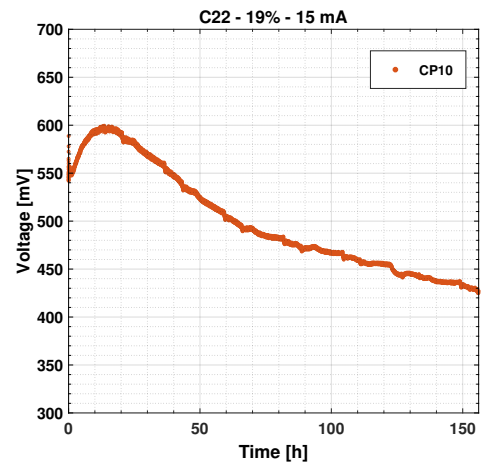
(a)



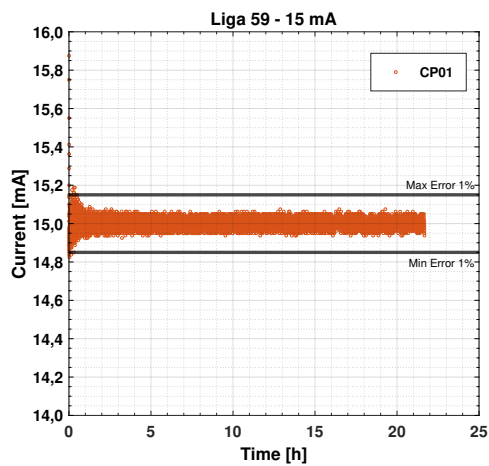
(b)



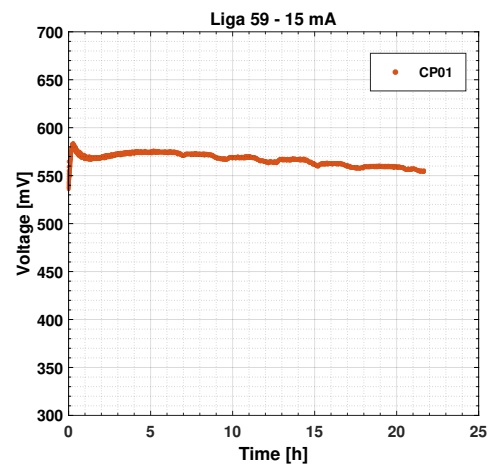
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 16 – Ensaio em corpo de prova C276 27%. Em (a), (c) e (e) curvas de corrente e em (b), (d) e (f) curvas tensão do eletrodo de referência.

5 Conclusão

A fragilização por hidrogênio é um problema complexo e multifacetado. Melhor entendimento dos mecanismos de fragilização e susceptibilidade à hidrogenação acarretariam em melhores escolhas de materiais possibilitando custos menores e maior durabilidade. É um estudo imprescindível para a realização de projetos em alto mar e ambientes corrosivos no geral, justificando os altos preços dos equipamentos envolvidos. Por outro lado, esses preços são muitas vezes proibitivos e os equipamentos possuem funcionalidade além da necessária para ensaios mais simples.

Para contornar este problema, foi desenvolvido uma solução focada nas necessidades do laboratório, uma fonte de corrente em malha fechada com controlador PI, interface homem máquina e sistema de aquisição de dados, capaz de aplicar valores constantes de corrente com alta confiabilidade. Embora a grande complexidade do processo de desenvolvimento de equipamentos, a solução foi justificada pelos requerimentos técnicos demandados e pela enorme diminuição de preço em relação ao equipamento de mercado, visto que o equipamento produzido custou menos de 3% do preço.

Após os ensaios iniciais a performance do equipamento mostrou-se adequada para a realização dos ensaios de permeação de hidrogênio, com possibilidades de melhoras futuras como previamente descrito nesta monografia. Ao todo foram fabricados oito equipamentos, quintuplicando a quantidade de ensaios concorrentes que podem ser realizados pelo laboratório. Sendo assim, a equipe encontra-se equipada para a realização mais ágil de ensaios de permeação, possibilitando que projetos de maior escopo sejam executados ou que projetos atuais sejam feitos de maneira mais eficiente.

Contemplando também o caráter formativo das atividades do laboratório, o galvanostato mostra-se também uma excelente ferramenta de pesquisa, possibilitando que alunos de diversas áreas façam suas próprias pesquisas na área de fragilização por hidrogênio ou mesmo continuem o desenvolvimento do equipamento nas áreas de eletrônica, controle e programação.

5.1 Dificuldades e trabalhos futuros

Várias dificuldades foram encontradas durante os ensaios em todas as fases, especialmente nas fases iniciais de prototipagem. Um dos desafios já comentados foi a dificuldade de utilizar um sistema puramente analógico, a solução para o qual foi o controle digital do sistema. No equipamento analógico as influências externas modificavam drasticamente a saída do aparelho, de maneira que a carga capacitiva do próprio operador era suficiente

para interferir no bom funcionamento do aparelho. Tentativas de filtrar esse efeito foram por vezes insuficientes, e por vezes maléficas ao funcionamento do equipamento, sendo possível que o atraso de fase introduzido pelos filtros utilizados estava causando desestabilização do sistema de controle. Esse fenômeno não foi amplamente investigado uma vez que o controle digital foi suficiente para reduzir a sensibilidade do equipamento, e pode ser um bom ponto de partida para o desenvolvimento de outros projetos nos quais haja a necessidade de uma filtragem mais sofisticada do sinal de saída.

Outros problemas do ensaio são picos na tensão de referência e na corrente, cuja fonte não puderam ser identificados. Esses problemas podem ser observados em alguns dos gráficos de ensaio, mas não foram considerados problemáticos uma vez que eles são de curta duração, geralmente durando de 5 a 10 s, em um ensaio de múltiplos dias. Devido à rápida natureza destes picos, podem ser descartadas as hipóteses de que estes são problemas na atuação do controlador, uma vez que a resposta deste é lenta demais para induzir os comportamentos observados. Tentativas extensivas para identificar problemas no esquema elétrico ou falhas nos componentes eletrônicos foram realizadas porém inconclusivas. Possibilidades incluem inconsistências na alimentação da rede, causando sobretensões ou afundos de tensão breves. Problemas de contato elétrico na placa e na célula também podem ser responsáveis, mas não puderam ser identificados.

Também persistente é o carregamento capacitivo do eletrodo de trabalho (J.; FAULKNER, 2000). À medida que o eletrodo carrega hidrogênio, estes íons geram uma tensão reversa que opõe a saída da célula, aumentando a impedância do circuito. A depender do tamanho e geometria da peça esse efeito pode crescer de maneira a reduzir o valor máximo de corrente que o equipamento é capaz de induzir na célula. Uma rigorosa investigação das geometrias e tamanhos do eletrodo de trabalho que permitam o pleno funcionamento do equipamento pode fazer-se necessária para a realização de ensaios com maior demanda de corrente no futuro.

O salvamento dos dados também apresentou considerável dificuldade, uma vez que a comunicação com o módulo SD requer uma velocidade de comunicação diferente daquela usada para todos os outros módulos do equipamento. Embora na maioria dos casos essa conversão de velocidade seja realizada pela biblioteca, a interação entre as interrupções da comunicação I2C e o funcionamento sequencial da comunicação SPI gera inconsistências de funcionamento quando o equipamento não consegue efetivamente se comunicar com o cartão SD. Isso pode acontecer pois o equipamento está sem um cartão SD ou por que o circuito não está o reconhecendo. Como não é desejável que ensaios rodem sem o salvamento de dados, o equipamento apresenta erros quando uma dessas condições é verdadeira, possibilitando que o usuário identifique e retifique o problema. Uma solução mais robusta poderia ser obtida unificando os meios de comunicação utilizados de maneira que eles não interfiram entre si, e mais estudos precisam ser feitos para conferir a viabilidade

desta implementação.

O modo de controle potencioestático foi desenvolvido porém não coube na memória programável do Arduino. Portar o código para um microcontrolador com maior memória e atualizar a placa PCB de acordo tornariam essa implementação possível. Alternativamente, como a utilização de memória não foi uma grande preocupação durante o desenvolvimento do código, é possível que otimizações em sua estrutura sejam o suficiente para permitir este uso, sendo necessária a realização de testes de validação deste modo de funcionamento.

Por fim, melhoras podem ser feitas no design da PCB. Devido às limitações dos equipamentos utilizados no desenvolvimento deste projeto, não foi possível projetar uma placa com mais de uma camada de cobre. Placas de uma única camada são pouco usadas no mercado devido à sua impraticidade, que força com que o design das trilhas seja feito conforme restrições espaciais e não conforme boas regras de design. Idealmente, os componentes eletrônicos digitais e analógicos deveriam ser agrupados em partes diferentes da placa, evitando que as rápidas flutuações dos sinais digitais interfiram nos sinais analógicos DC, com uma camada de terra em comum entre esses grupos possibilitando caminhos de retorno de corrente mais bem definidos ([ENCYCLOPEDIA... , 2005](#)). Esse design seria mais resistente a ruídos eletromagnéticos e poderia portanto diminuir o erro médio apresentado pelo sinal de saída. Um maior foco nessa área poderia resultar em um equipamento com um valor de repetibilidade consideravelmente mais alto.

Referências

- ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. *The science and engineering of materials*. 6. ed. Belmont, CA: Wadsworth Publishing, 2010. Citado na página 11.
- ATKINS, P.; PAULA, J. de. *Physical Chemistry*. 8. ed. [S.l.]: W.H. Freeman & Company, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- BEER, F. P. et al. *Mechanics of Materials*. 7. ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2014. Citado na página 15.
- CLEMENTI, E.; RAIMONDI, D. L. Atomic screening constants from scf functions. *The Journal of Chemical Physics*, AIP Publishing, v. 38, n. 11, p. 2686–2689, jun. 1963. ISSN 1089-7690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.1733573>>. Citado na página 14.
- DECONINCK, L.; DEPOVER, T.; VERBEKEN, K. The mechanism of hydride formation during electrochemical hydrogen charging of ti-6al-4v. *Materials Today Sustainability*, Elsevier BV, v. 22, p. 100387, jun. 2023. ISSN 2589-2347. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100387>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 16.
- ELGRISHI, N. et al. A practical beginner's guide to cyclic voltammetry. *Journal of Chemical Education*, American Chemical Society (ACS), v. 95, n. 2, p. 197–206, nov. 2017. ISSN 1938-1328. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.
- ENCYCLOPEDIA of RF and Microwave Engineering. Wiley, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/0471654507>>. Citado na página 41.
- GODFREY, K. Introduction to binary signals used in system identification. In: *International Conference on Control 1991. Control '91*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 161–166 vol.1. Citado na página 28.
- J., A.; FAULKNER, L. R. *Electrochemical Methods*. 2. ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2000. Citado 6 vezes nas páginas 6, 16, 18, 20, 25 e 40.
- JOHNSON, W. H. On some remarkable changes produced in iron and steel by the action of hydrogen and acids. *Nature*, Springer Science and Business Media LLC, v. 11, n. 281, p. 393–393, mar. 1875. ISSN 1476-4687. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/011393a0>>. Citado na página 11.
- KISSINGER, P. T.; HEINEMAN, W. R. (Ed.). *Laboratory techniques in electroanalytical chemistry, revised and expanded*. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996. Citado na página 14.
- LAPLACE, P. S. de. *Theorie Analytique Des Probabilites, Volume 1*. [S.l.]: Wentworth Press, 2019. Citado na página 24.
- LI, Q. et al. Hydrogen impact: A review on diffusibility, embrittlement mechanisms, and characterization. *Materials*, MDPI AG, v. 17, n. 4, p. 965, fev. 2024. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma17040965>>. Citado na página 14.

- MARTINIANO, G. A. et al. Effect of specific microstructures on hydrogen embrittlement susceptibility of a modified aisi 4130 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier BV, v. 46, n. 73, p. 36539–36556, out. 2021. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.147>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 17.
- NASA. *Hydrogen Embrittlement*. 2016. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160005654/downloads/20160005654.pdf>>. Citado na página 11.
- NGUYEN, T.-D. et al. Deciphering hydrogen embrittlement mechanisms in ti6al4v alloy: Role of solute hydrogen and hydride phase. *Materials*, MDPI AG, v. 17, n. 5, p. 1178, mar. 2024. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma17051178>>. Citado na página 15.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 2010. (Instrumentation and controls series). ISBN 9780136156734. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Wu5GpNAelzkC>>. Citado na página 30.
- PALMSENS. *What is a cyclic voltammogram*. 2021. Disponível em: <<https://www.palmsens.com/knowledgebase-article/cyclic-voltammetry-what-is-a-cyclic-voltammogram/>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 19.
- RESPONDEAI. *Diagrama de blocos*. 2019. Disponível em: <<https://www.respondeai.com.br/conteudo/sistemas-de-controle/analise-de-sistemas-dinamicos-linearesfuncao-de-transferencia-e-diagrama-de-blocos/1782>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 23.
- SLATER, J. C. Atomic radii in crystals. *The Journal of Chemical Physics*, AIP Publishing, v. 41, n. 10, p. 3199–3204, nov. 1964. ISSN 1089-7690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.1725697>>. Citado na página 14.
- SSTATIC. *AO real*. 2017. Disponível em: <<https://i.sstatic.net/enMZ0.gif>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 21.

Anexos

ANEXO A – Manual de uso

A.1 Cuidados iniciais

- Certificar-se que o equipamento está ligado em uma tomada 220 V e que o fusível do equipamento está no lugar antes de ligar.
- Verificar se o LCD está funcionando apropriadamente. Em caso de tela vazia ou caracteres completamente em branco, ajustar potenciômetro do display com uma chave de fenda.
- Verificar se o cartão SD está inserido. O equipamento não deve funcionar sem cartão SD, e deve avisar na tela que o SD não está inserido, além também de acionar um LCD vermelho para alertar do problema.
- Não manter o equipamento ligado por grandes períodos de tempo sem conexões externas para evitar sobrecarga do sistema de controle.
- Sempre ao programar o equipamento certificar-se de que o mesmo está desligado. O equipamento jamais deve ser ligado enquanto a entrada programadora estiver plugada.

A.2 Painéis do equipamento

O painel frontal do equipamento é composto por uma tela de display, dois leds, três botões e seis bornes. Abaixo uma explicação de cada componente:

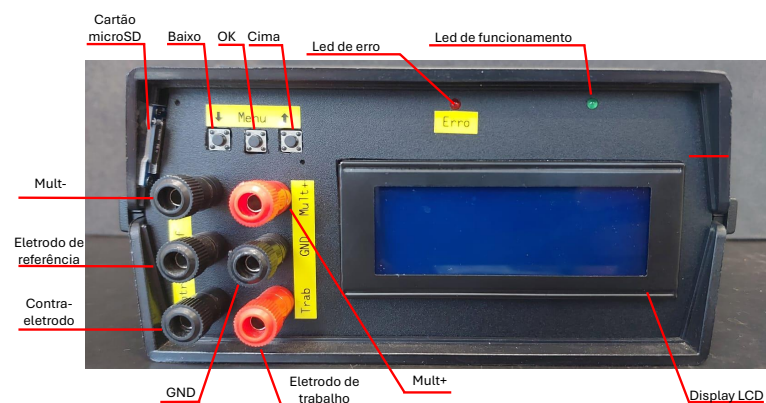


Figura 17 – Painel frontal do equipamento

- Tela LCD: O display é responsável por mostrar as informações referentes ao ensaio e também permitir a interação do usuário com o equipamento por meio da navegação de menus.
- LED Verde: O led verde é responsável por informar que o equipamento está ligado e que a linha de alimentação está com os 5 volts necessários.
- LED Verde: O led verde é responsável por informar que o equipamento está ligado e que a linha de alimentação está com os 5 volts necessários.
- Botões: Os botões permitem que o usuário interaja com a interface do equipamento.
- Bornes: Os bornes permitem a utilização de medições por meio de equipamentos externos, além de serem utilizados para conectar o equipamento à célula eletroquímica.
- Módulo SD: O módulo SD permite que seja realizada a coleta de dados do ensaio.

Já no painel traseiro:



Figura 18 – Painel frontal do equipamento

- Botão on/off: Liga e desliga alimentação do equipamento.
- Caixa de fusível: Protege o equipamento contra sobrecorrente. O equipamento não deve ser operado sem um fusível nesta caixa
- Plug tripolar: Fornece a alimentação do equipamento por meio de um cabo tripolar
- Programador: Permite atualizações de software no código por meio de um cabo DB9

A.3 Manuseio do equipamento

Para ligar o equipamento basta conectá-lo na tomada e acionar o interruptor liga e desliga. O ensaio começará imediatamente com as configurações salvas do ensaio anterior,

de maneira a imediatamente proteger galvanicamente a peça ensaiada. Mesmo durante a navegação dos menus, o equipamento manterá sempre este controle de corrente ligado, portanto deve-se evitar manter o equipamento conectado à célula enquanto nenhum ensaio estiver em decorrimto. Caso os parâmetros do ensaio já estejam corretos, não é necessário mexer nas configurações do equipamento. Do contrário, basta apertar o botão "Menu". O equipamento alertará o usuário de que esta ação interromperá a leitura de dados do ensaio, e pedirá confirmação para a interrupção. Uma vez confirmado, o equipamento entrará no menu principal.

Para navegar o menu, basta utilizar as setas pra cima e pra baixo para selecionar a função desejada, e o botão Menu para confirmar a escolha da função. A partir daqui, o usuário tem acesso à três funções: A função de ensaio, a de ajuste de ensaio e a de autoajuste. A primeira opção direciona o usuário à tela de ensaio, passando primeiro pela tela de seleção de tempo de aquisição. Uma vez selecionado, o equipamento volta à tela de ensaio e começa a captura dos dados. A opção de ajuste de ensaio permite mudar o valor de referência para o ensaio, modificando a saída do equipamento. Por fim, a opção de auto ajuste permite que o usuário ajuste a leitura do equipamento com a leitura de um equipamento de medição externa como um multímetro. Para fazer isso, basta colocar as ponteiros do multímetro nas saídas Mult+ e Mult-, e informar ao equipamento o valor lido. Esse procedimento deve ser feito duas vezes para os valores de tensão de 100 mV e de 500 mV. O equipamento ajustará a curva de calibração de acordo com o desvio encontrado entre a própria leitura e a do multímetro.

Todas as mudanças relacionadas ao equipamento devem ser salvas uma vez efetuadas, e o equipamento pedirá cconfirmação antes de realizar essas alterações. O usuário pode cancelar as modificações feitas optando pela opção negativa na tela de salvamento. Neste caso, o equipamento continua utilizando os mesmos valores especificados antes da alteração. Vale ressaltar que a faixa de funcionamento do equipamento é de 5 a 200 mA, portanto o equipamento não permitirá valores fora dessa faixa, arredondando o valor selecionado para o valor válido mais próximo.

Para montar o ensaio, basta conectar as saídas aos eletrodos de mesmo nome, sendo a conexão do eletrodo de referência opcional apenas para o o modo de operação galvaostático. Para o potenciostato, é necessário que todos os três eletrodos estejam conectados. O equipamento foi testado em soluções de água salina 4,5% e em solução meio molar de H₂SO₄ e pode ser utilizado para ensaios com ambos os eletrólitos.