



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

CONTROLE E MONITORAMENTO DE PROCESSO DE PROTEÇÃO
CATÓDICA COM USO DE MICROCONTROLADOR E DISPOSITIVOS
MÓVEIS

Felipe de Carvalho Gomes de Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia de Controle e
Automação da Escola Politécnica, Uni-
versidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Engenheiro.

Orientador

Marcos Vicente de Brito Moreira

Orlando de Brito Correia

Rio de Janeiro, Setembro de 2016

**Controle e monitoramento de processo de
Proteção Catódica com uso de microcontrolador e dispositivos móveis**

Felipe de Carvalho Gomes de Oliveira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE AUTOMAÇÃO.

Apresentado por:

Felipe de Carvalho Gomes de Oliveira

Aprovado por:

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, DSc.

Orlando de Brito Correia, Eng.

Prof Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Setembro de 2016

de C G de Oliveira, Felipe

Controle e monitoramento de processo de Proteção Catódica com uso de microcontrolador e dispositivos móveis/ Felipe de C G de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

xi, 73 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Marcos Vicente de Brito Moreira

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 70 – 71.

1. Proteção Catódica. 2. Controle e monitoramento. 3. Corrente impressa. I. Vicente de Brito Moreira, Marcos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente, devo agradecer ao meu orientador de estágio, Orlando de Brito, por ter me auxiliado e guiado nesse projeto e por estar sempre disposto a compartilhar seus conhecimentos.

Dedico esse trabalho também aos meus pais, Glaucio e Rosana, que sempre valorizaram a importância da educação e me apoiaram durante a graduação.

Agradeço a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao meu orientador Prof. Marcos Moreira, que me guiou durante a realização deste trabalho.

Obrigado também ao Leonardo, sobretudo por ter tido a paciência de me ensinar sobre a eletroquímica envolvida nesse trabalho. Agradeço ao Raphael Pereira por não poupar esforços em me ajudar com a parte eletrônica, e por ter confeccionado a placa do Controlador, o que eu não teria conseguido sem sua ajuda.

Agradecimentos também ao meu amigo Eduardo, por ter me ajudado a revisar meu projeto e por me ajudar com a apresentação do mesmo.

RESUMO

Projeto e montagem de sistema de controle e monitoramento de processo de
Proteção Catódica com uso de microcontrolador e dispositivos móveis

Felipe de Carvalho Gomes de Oliveira

Setembro/2016

Orientador: Marcos Vicente de Brito Moreira, DSc.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema de monitoramento e controle de uma reação eletroquímica de proteção catódica. Nela, visa-se proteger ligas metálicas dos efeitos da corrosão provocada pelo meio, por meio de um circuito que controla a diferença de potencial elétrico entre o metal e uma referência.

O mecanismo projetado tem o propósito de automatizar o processo de coleta de dados relativos às variáveis monitoradas, sobretudo a corrente que o controlador fornece quando o metal está protegido. Os dados sobre a evolução dessas variáveis serão registrados em uma memória externa.

O projeto para o monitoramento em tempo real das variáveis do sistema controlador-planta também é apresentado. O usuário tem à sua disposição interfaces para dispositivos móveis na plataforma Android ou para computadores.

ABSTRACT

Control and monitoring system for Cathodic Protection using microcontroller and mobile devices

Felipe de Carvalho Gomes de Oliveira

Setembro/2016

Advisor: Marcos Vicente de Brito Moreira, DSc.

This work aims to develop a monitoring and control system for a electrochemical reaction of cathodic protection. It is used to protect metal alloys from corrosion caused by the environment, through a circuit that controls the electrical potential difference between the metal and a reference.

The designed mechanism aims to automate the gathering of data of the monitored variables, especially the current provided by the controller when the metal is protected. The evolution of the value of those variables will be recorded in an external memory.

The design for real-time monitoring of the system variables is also presented. This is possible through user interfaces for both Android devices and computers.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Estágios da formação da meia pilha	5
Figura 2.2: Pilha de corrosão galvânica	7
Figura 2.3: Pilha de ação local	8
Figura 3.1: Representação do circuito de controle da proteção catódica	11
Figura 3.2: Diagrama de Blocos do sistema de controle	12
Figura 3.3: Resposta de um sistema com controle proporcional [15]	13
Figura 3.4: Resposta em frequência de um filtro com média móvel [20]	16
Figura 3.5: Saída de um sinal PWM atenuada com Duty Cycle de 10% e 90% [10]	17
Figura 4.1: Ilustração da transmissão de um byte pelo protocolo RS-232 [21] .	20
Figura 4.2: Diagrama de blocos de uma conexão SPI com um mestre e um servo	21
Figura 4.3: Filtro passa-baixas [12]	22
Figura 4.4: Circuito entre a saída do PWM e a Planta	23
Figura 4.5: Circuito entre a eletrodo de referência e pino do conversor A/D .	24
Figura 4.6: Circuito para medição da corrente injetada na planta	25
Figura 4.7: Listagem de pinos e foto de um HC-06	27

Figura 4.8: Esquático dos amplificadores operacionais, LM10 (à esquerda) e LM6132 (à direita)	28
Figura 4.9: Placa vista de cima, com destaque para o microcontrolador, LEDs e aplicadores operacionais	31
Figura 4.10: Placa vista de outro ângulo, com destaque para interface de cartão SD e módulo Bluetooth	32
Figura 5.1: Da esquerda para a direita: Eletrodo de referência, Chapa de aço, Anodo de platina.	34
Figura 5.2: Planta completa, com os 3 elementos imersos em solução de água do mar.	34
Figura 5.3: Fluxograma do processo de medição de resposta a pequenos degraus	36
Figura 5.4: Gráfico com de resposta do potencial do eletrodo aos degraus no sinal de controle	37
Figura 5.5: Comparativo entre respostas achadas	39
Figura 5.6: Modelo em Simulink usado para sintonizar	40
Figura 5.7: Gráfico das respostas dos sistemas realimentados para as diferentes regiões (Região 2 atinge o regime permanente não visível na imagem)	42
Figura 5.8: Gráfico das respostas do sistema real para os setpoints de 0.4V, 0.5V e 0.6V respectivamente	44
Figura 6.1: Fluxograma do programa principal do PIC	49
Figura 6.2: Loop principal	50
Figura 6.3: Rotina de tratar novas leituras dos A/Ds	51
Figura 6.4: Rotina que checa se o sistema está em estado estacionário	52
Figura 6.5: Aba de leitura de dados	62

Figura 6.6: Aba da tabela de correntes	63
Figura 6.7: Aba do Gráfico das leituras	64
Figura 6.8: Barras de informações	65
Figura 6.9: Menu do aplicativo	65
Figura 6.10: Janela do aplicativo para Windows	67
Figura A.1: Esquemático do Circuito do Sistema	72
Figura A.2: Esquemático do Circuito do Sistema	73

Sumário

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivo	2
2 Corrosão	4
2.1 Introdução	4
2.2 Metal em meio eletrolítico	5
2.3 Pilha de corrosão	6
2.4 Proteção catódica por corrente impressa	7
2.5 Conclusão	9
3 Detalhamento do projeto	10

3.1	Esquemático do controlador	10
3.2	Identificação da Função de Transferência da Planta	12
3.3	Escolha do tipo de controlador	13
3.4	Discretização do controle	14
3.5	Entrada e saída de dados	15
3.5.1	Leitura de dados analógicos	15
3.5.2	Geração de saída analógica (PWM)	16
4	Montagem do controlador	18
4.1	Introdução	18
4.1.1	Comunicação com dispositivos móveis e computadores	19
4.1.2	Interface com memória externa	20
4.1.2.1	Comunicação com o cartão	21
4.1.3	Eletrônica dos conversores e leitura de corrente	22
4.1.3.1	Saída do PWM e conversão D/A	22
4.1.3.2	Leitura do eletrodo de referencial	24
4.1.3.3	Leitura da corrente injetada no circuito	24
4.1.4	Escolha do micro-controlador utilizado e seus parâmetros	25
4.1.4.1	Frequência do oscilador do PIC	26
4.2	Dimensionamento e escolha dos componentes eletrônicos do circuito	27
4.2.1	Módulo Bluetooth	27
4.2.2	Amplificadores Operacionais	28
4.2.3	Valores das resistências e capacitâncias do circuito	29

4.3	Circuito final do sistema de controle	30
5	Controle da Planta	33
5.1	Estimando o modelo da planta	35
5.1.1	Resposta da planta a pequenos degraus	35
5.1.2	Usando o Matlab para estimar comportamento da planta . . .	37
5.2	Sintonizando o PID através do Simulink	40
5.3	Resultados experimentais	42
6	Sistema de Monitoramento e Interface com Usuário	46
6.1	Programa no PIC	46
6.2	Protocolo de comunicação	53
6.2.1	Função 01 - Informação sobre Set-Points	54
6.2.2	Função 02 - Mudança do set-point	54
6.2.3	Função 03 - Mudança do valor no PWM	55
6.2.4	Função 04 - Mudança para modo NORMAL	56
6.2.5	Função 05 - Reset	57
6.2.6	Função 06 - Envio das leituras	57
6.2.7	Função 07 - Mudança de set-point	58
6.2.8	Função 08 - Fim do processamento	59
6.2.9	Função 09 - Correntes finais	59
6.2.10	Função 10 - Modo de operação	60
6.3	O aplicativo para Android	60
6.3.1	Funcionamento e Layout	61

6.4	Aplicativo para Computadores	66
6.4.1	Funcionamento e Layout	66
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	68
	Referências	70
A	Esquemático do Circuito do Sistema	72

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A corrosão pode ser descrita como a deterioração de um material, geralmente metálico, por meio de uma reação química ou eletroquímica ligada ao meio ambiente, seja esse mar, ar ou solo. Esse fenômeno costuma causar alterações indesejáveis sobre os materiais, tais como desgaste, variações químicas e modificações estruturais, podendo prejudicar o desempenho dos mesmos [7].

Diversas ligas metálicas estão sujeitas à influência da corrosão, que constantemente as transforma e deteriora. A influência dessas alterações afeta várias áreas da vida urbana moderna, como usinas elétricas, tanques de combustível, equipamentos eletrônicos e meios de transporte.

As perdas econômicas causadas pelo fenômeno da corrosão estão sobretudo ligadas ao custo de substituição de materiais corroídos e aos custos dos meios de proteção contra a corrosão. Além destas, outras razões, como a perda de eficiência de equipamentos, riscos de segurança e paralisações acidentais são fatores motivadores para o investimento em meios eficientes de prevenir a corrosão [7] [17].

Para a preservação de ligas de aço, uma técnica frequentemente usada é a proteção catódica, que consiste em fazer da liga o cátodo da reação de corrosão. A proteção catódica viabiliza a operação econômica e segura de estruturas metálicas,

e é uma operação relativamente simples, com baixo custo e que elimina por completo os processos de corrosão, tornando o material metálico imune a seu ataque [4].

Neste trabalho será abordado o processo de desenvolvimento de um sistema automatizado para controlar, supervisionar e medir um processo de proteção catódica em um ambiente controlado, para o dimensionamento de equipamentos necessários para a utilização dessa técnica em ambientes submarinos reais. A técnica de proteção catódica abordada aqui é a de corrente impressa, em que fontes geradoras de corrente elétrica contínua são utilizadas para injetar grandes quantidades de corrente nas estruturas [4].

1.2 Objetivo

A motivação deste projeto partiu da necessidade do laboratório de Tecnologia de Equipamentos Submarinos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES) em medir a quantidade de corrente que precisa ser fornecida para que uma chapa de aço fique protegida de corrosão. A partir desse valor de corrente é possível saber a densidade de corrente necessária para proteger tubulações de aço com área de secção conhecida.

O sistema a ser desenvolvido tem grande foco na automatização do processo de medição e controle da reação química de proteção, através de um circuito eletrônico baseado em um micro controlador PIC. Dentro de suas funcionalidades, tem-se a leitura de um arquivo em cartão SD para a definição de valores de referência do controle da reação, e interface com celulares Android e PCs, para o monitoramento e testes do sistema.

O sistema aqui apresentado possui o intuito de viabilizar uma ferramenta de medição e controle de um processo de proteção catódica de forma abrangente. Portanto, o foco principal do projeto não é apenas o controle da saída do sistema, mas também a criação de um mecanismo que automatize todo o processo e que possa ser adaptado e aperfeiçoado para o uso em projetos semelhantes.

Esse mecanismo pode ser monitorado em tempo real por meio de aplicação para

PC e dispositivos móveis Android, e permite ao usuário dessas ferramentas alterar parâmetros do sistema. Além disso, ele deve registrar os valores medidos, para que possam ser avaliados após o controle dos processos.

Capítulo 2

Corrosão

2.1 Introdução

Nesse projeto, trata-se o caso de corrosão de ligas metálicas. Por meio desse processo, elas sofrem a ação de eletrólitos, que podem ser água do mar, solo, soluções aquosas de ácidos, bases, sais, ar atmosférico com umidade e outros [17].

O processo de corrosão é composto de duas reações parciais, uma anódica e uma catódica, que ocorrem em pontos distintos. A reação anódica é uma reação de oxidação, onde elétrons são liberados e se deslocam através do meio para outras áreas do material, onde ocorre a reação catódica, que é uma reação de redução. A parte da liga metálica que fornece elétrons sofre corrosão, já a parte sujeita a reação catódica não é afetada, uma vez que a redução se dá nas espécies presentes no meio.

Esse mecanismo pode ser explicado como uma pilha de corrosão composta por quatro elementos:

- Uma região onde ocorre uma reação anódica;
- Uma região onde ocorre uma reação catódica;
- Uma ligação elétrica unindo ambas as regiões, permitindo que os elétrons resultantes da reação anódica possam fluir;

- Um eletrólito em contato com ambas as regiões por onde fluem íons resultantes de ambas reações.

Quando materiais dissimilares cercados por um eletrólito estão eletricamente conectados, a reação eletroquímica resultante é chamada de corrosão galvânica.

2.2 Metal em meio eletrolítico

A imersão de um metal em solução eletrolítica determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre ele e o meio. Através de uma reação anódica o metal, portanto, passa para a forma iônica [7]:



Essa reação prossegue nesse sentido, até ocorrer saturação do meio eletrolítico nas imediações da interface metal/meio. Nesse momento há um equilíbrio eletroquímico, tornando a reação reversível:



Este conjunto metal/meio é denominado meia pilha e está ilustrado na figura 2.1.

Com isso, se estabelece uma diferença de potencial entre as camadas de cargas elétricas de sinais contrários, que existem na interface metal/solução. O valor desse potencial depende de muitos fatores, tal como a liga metálica utilizada e a temperatura do meio.

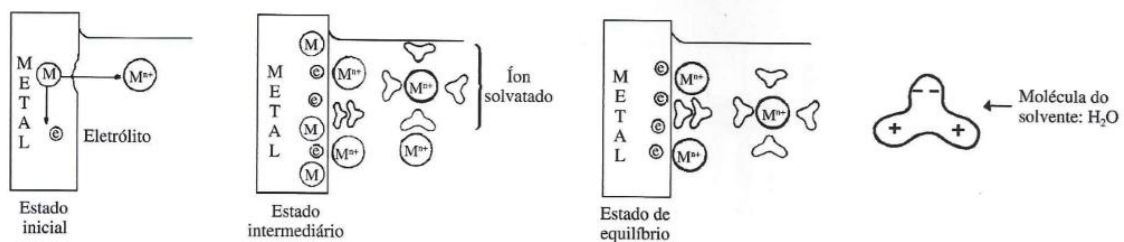
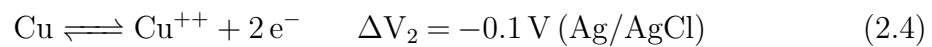
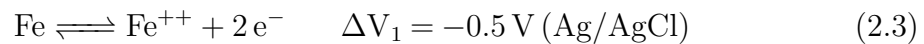


Figura 2.1: Estágios da formação da meia pilha

2.3 Pilha de corrosão

Segundo o princípio descrito na seção 2.2, quando dois metais estão em contato com um mesmo eletrólito, cada um deles desenvolve uma diferença de potencial própria, de acordo com suas reações reversíveis. Essa diferença é denominada potencial de corrosão [4] [5]. Por exemplo, considere



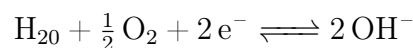
No exemplo acima, como o ferro é mais ativo, na água do mar seu potencial é mais negativo que o do cobre. Quando é feita uma ligação desses dois materiais por um condutor metálico, as condições de equilíbrio são rompidas, resultando em uma pilha eletroquímica, cuja força eletromotriz equivale à diferença entre os potenciais dos metais:

$$f \cdot e \cdot m \cdot = \Delta V_2 - \Delta V_1 = (-0.1) - (-0.5) = 0.4 \text{ V} \quad (2.5)$$

Nesse caso, os elétrons do ferro se deslocam para o cobre. Assim, a corrente elétrica entre os dois metais elimina a reversibilidade da reação anódica do ferro, e este passa a se corroer no meio eletrolítico. Esta é a reação anódica de oxidação.

Um diagrama desse caso pode ser visto na figura 2.2. É importante ressaltar que nesta figura o sentido dos elétrons representado pela seta é contrário ao sentido da corrente convencional.

Em volta do cobre ocorrem reações de redução de íons do eletrólito. Quando esse meio é a água do mar, a reação de redução pode ser expressa por



Quando apenas um metal está em contato com o meio eletrolítico, devido a sua heterogeneidade e à do eletrólito, ocorrem em torno dele reações semelhantes às descritas acima. Diferentes regiões heterogêneas desse mesmo metal agem como pilhas de corrosão localizadas, como ilustra a figura 2.3.

Neste projeto, é observado o caso de uma pilha local, uma vez que se deseja proteger uma liga de um mesmo material.

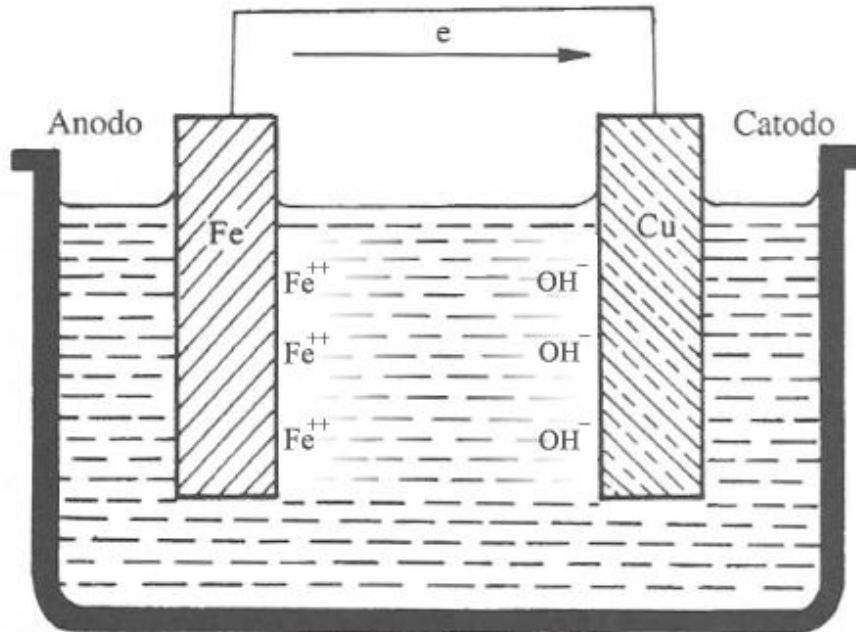


Figura 2.2: Pilha de corrosão galvânica

2.4 Proteção catódica por corrente impressa

O princípio da proteção catódica por corrente impressa está na transformação da estrutura metálica que se deseja proteger no cátodo de uma pilha artificial, de modo a tornar reações de corrosão termodinamicamente impossíveis.

Portanto, caso se transfira artificialmente a região anódica de um processo para uma área concebida para este fim, de forma a permitir que toda a área da estrutura metálica seja catódica, não haverá fluxo de elétrons nesta, impedindo a deterioração do material.

Na proteção catódica, injeta-se corrente contínua na estrutura metálica por meio de ânodos feitos de materiais inertes que ficam imersos no meio eletrolítico [17] [16].

Para o funcionamento desse sistema são necessários os seguintes agentes:

- Uma unidade retificadora, que converte a corrente alternada recebida para contínua, que será drenada pelos ânodos em função do nível de potencial de proteção desejado. Nesse trabalho a alimentação do controlador já estará

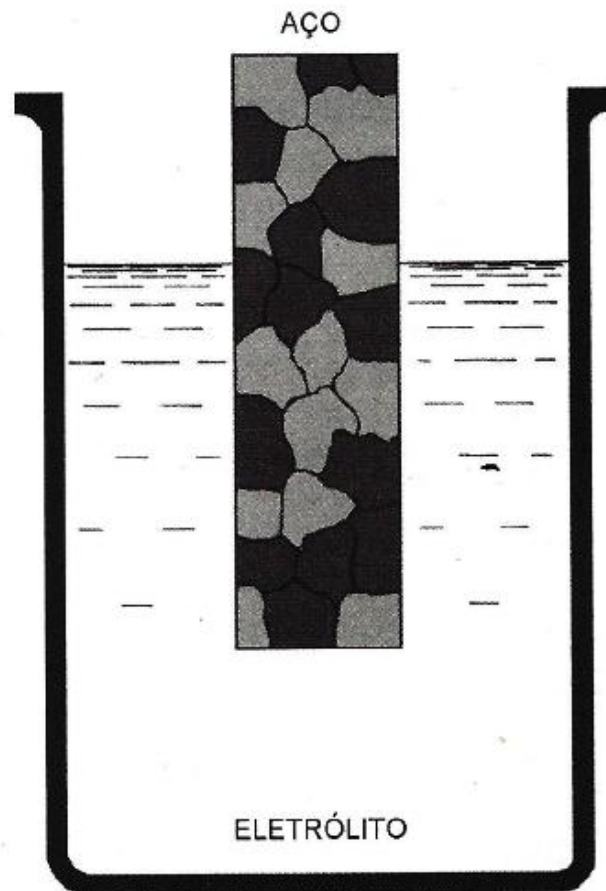


Figura 2.3: Pilha de aço local

retificada e a potência necessária para alimentar a reação de proteção será fornecida por um amplificador operacional.

- Anodos inertes, que são montados com o objetivo de distribuir a corrente de proteção ao longo da superfície submersa ou enterrada. Neste projeto, utilizou-se um anodo de platina, que recebe da saída do controlador a corrente a ser injetada no eletrólito;
- Eletrodo de referência, que tem como objetivo administrar os potenciais eletroquímicos. A tensão no eletrodo é a saída da planta, e é a variável que se deseja controlar no processo.

O critério para se comprovar a proteção de uma estrutura metálica é o do potencial mínimo entre ele e o eletrólito, que é medido através do eletrodo de referência. Esse potencial mínimo varia de acordo com a liga que está sendo protegida [17].

Caso a corrente injetada não eleve o potencial até o mínimo desejado, o material não estará protegido. Se, no entanto, for injetada corrente demais e o potencial ultrapassar muito o mínimo indicado, não só haverá desperdício de energia, como também pode ocorrer o fenômeno de superproteção da liga. Nesse caso, é gerado hidrogênio na estrutura protegida em quantidade suficiente para gerar bolhas e rachaduras nesta [18].

2.5 Conclusão

A corrosão se dá pela reação de ligas metálicas e um meio eletrolítico. Neste trabalho, será abordado o caso de uma liga composta de um mesmo material, que está sujeita à ação local de corrosão em áreas heterogêneas de sua superfície, quando imerso em água salgada, que é o meio eletrolítico.

Para a proteção do material, se usará proteção catódica por corrente impressa, com a injeção de corrente em um metal inerte imerso no meio eletrolítico. Através da diferença de potencial entre o eletrodo de referência, imerso no meio, e o eletrólito a ser protegido, será controlado o nível de proteção do material.

Capítulo 3

Detalhamento do projeto

3.1 Esquemático do controlador

Para executar a proteção do material metálico, foi projetado um sistema com os seguintes elementos:

- Chapa de aço, que é o material a ser protegido;
- Recipiente preenchido com água do mar, que é o eletrólito ao qual o aço está submetido;
- Anodo de platina, que é um material inerte por meio do qual se injeta corrente na solução;
- Eletrodo de referência, que serve para administrar os potenciais eletroquímicos. O eletrodo utilizado nesse projeto é de calomelano, baseado na reação entre mercúrio metálico e cloreto de mercúrio;
- Microcontrolador digital, que lê o valor do potencial da referência e injeta corrente no anodo de platina. Para fornecer a potência necessária à planta, será usado um amplificador operacional com saída ligada à platina.
- Conversores A/D e D/A, utilizados para converter tensão analógica para digital e vice-versa para interface entre micro controlador digital e o circuito

analógico. Estes conversores estão integrados no microcontrolador escolhido para o projeto.

Esses elementos e suas conexões estão retratados na figura 3.1.

Nesse projeto, o objetivo de proteger a chapa de aço será atendido quando a diferença de potencial entre o eletrodo de referência e a chapa alcançar $500mV$. O circuito projetado deve ser capaz de fornecer uma corrente de 0 até $6mA$ ao anodo de platina.

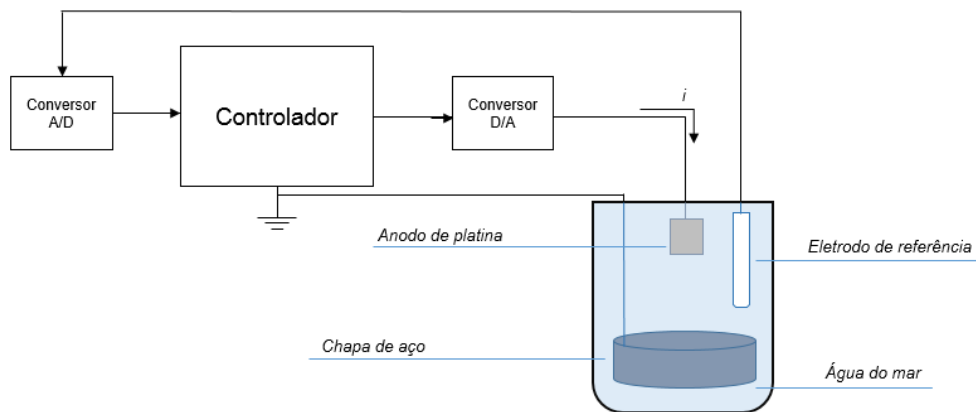


Figura 3.1: Representação do circuito de controle da proteção catódica

Para que o microcontrolador possa medir a diferença de potencial entre o eletrodo de referência e o aço, necessária para verificar se o sistema está protegido [17], seu terra foi conectado à chapa de aço, para que assim todas as medidas de potencial feitas por ele sejam com relação ao aço.

Analisando o circuito como um sistema de controle na figura 3.2, a tensão lida pelo microcontrolador é a variável que se quer controlar, ou seja, a saída da planta. O valor de referência é o valor em que se deseja manter essa variável de forma a obedecer o critério do potencial mínimo, citado na seção 2.4, garantindo proteção do material. Para manter a variável em tal valor, o micro-controlador varia o nível de tensão sobre a platina, que é o sinal de controle, e um buffer formado por um amplificador operacional injetará na platina a corrente correspondente. A solução na figura é o conjunto chapa de aço, eletrodo, anodo de platina e eletrólito.

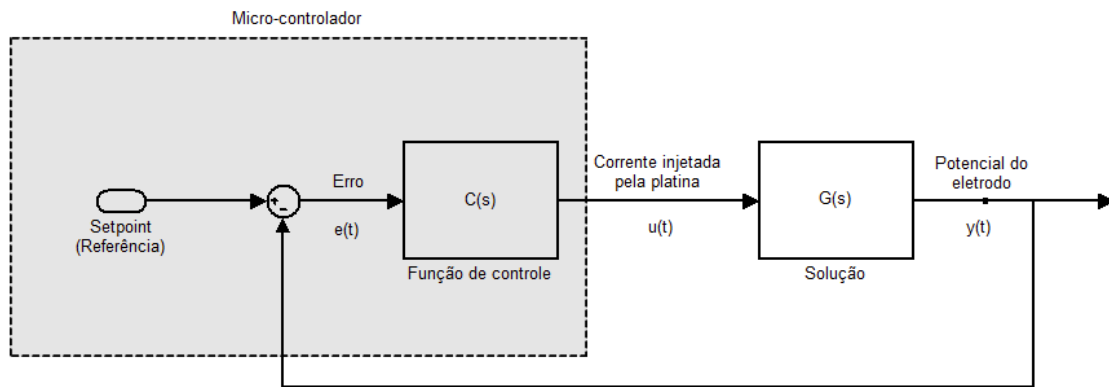


Figura 3.2: Diagrama de Blocos do sistema de controle

Para garantir que a saída da planta esteja de acordo com a referência desejada, o microcontrolador lê a saída da planta $y(t)$ e a compara com o set-point. Essa diferença, $e(t)$, serve como entrada para o função de transferência do controlador. Uma vez que a saída da planta é medida e usada para calcular o sinal de controle, esse é um sistema de controle com realimentação de saída [6].

3.2 Identificação da Função de Transferência da Planta

A cinética da planta abordada é descrita pela polarização das áreas heterogêneas da liga metálica, que é a variação de seus potenciais. Essa polarização está associada à intensidade e ao sentido da corrente elétrica circulando no sistema e traduz uma relutância da natureza em oposição às causas que rompem o equilíbrio do sistema. Essa relutância reduz a intensidade de corrente circulando entre catodo e anodo pelo condutor metálico, diminuindo, assim, a corrosão [4] [2].

As curvas de polarização que descrevem a relação entre a densidade de corrente e o potencial sobre a estrutura metálica dependem de um grande número de fatores, tais como a temperatura, a profundidade e a velocidade do eletrólito [2]. Assim, a relação entre essas grandezas é não linear e o levantamento da planta do sistema por meio da análise desses fatores vai além do escopo desse projeto.

Para identificar essa planta, optou-se por linearizá-la em torno de uma região de

operação. Nesse caso, a região de operação escolhida foi em torno do potencial mínimo para a proteção do material. Essa escolha foi motivada pelo comportamento suave da não-linearidade desse sistema [6]. A identificação da função de transferência da planta foi feita a partir da análise da sua resposta a pequenos degraus, considerando diferentes condições iniciais, sobretudo aquelas próximas ao potencial de proteção.

3.3 Escolha do tipo de controlador

O controlador inicialmente escolhido para esse projeto foi do tipo PI chaveado, com mudança dos parâmetros dependendo da faixa de valores em que se encontra o potencial do eletrodo, para assim lidar com a diferença de comportamento da planta nessas faixas distintas.

Na figura 3.3 tem-se um gráfico típico de resposta de um sistema com controlador que possui apenas o termo proporcional.

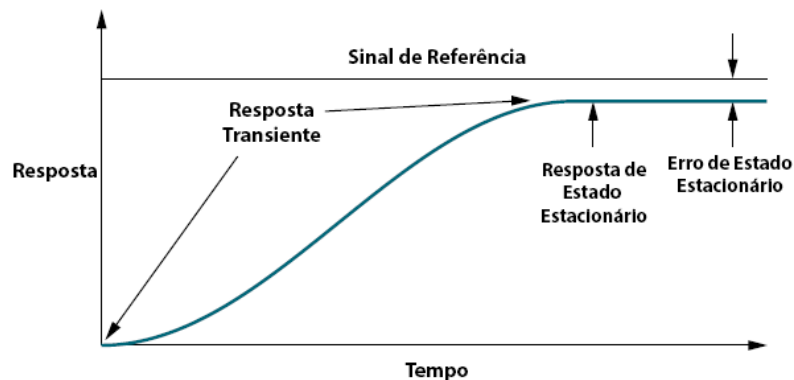


Figura 3.3: Resposta de um sistema com controle proporcional [15]

O gráfico da figura 3.3 define bem dois momentos distintos da resposta de um sistema de controle, a resposta transitória e a de estado estacionário. Uma análise dos requisitos do CENPES para o problema tratado nesse projeto, revela que o objetivo é obter a medida de corrente fornecida pelo controlador quando o potencial indicar que o sistema está protegido, ou seja, quando o potencial já estiver em estado estacionário. Portanto, foi adotado um controlador com o intuito de eliminar o erro

de estado estacionário, exemplificado na figura.

A função de transferência genérica de um controlador do tipo PI é

$$C(s) = K \frac{s + z_c}{s} \quad (3.1)$$

. Como o controlador do tipo PI possui um pólo na origem, ele rejeita bem o erro de estado estacionário [15]. Como a planta desse projeto se comporta como um sistema de primeira ordem, o uso de controlado PI é o suficiente para posicionar o pólo do sistema.

3.4 Discretização do controle

Como o controle será feito por um micro-controlador discreto, não é possível usar diretamente o controlador representado na equação 3.1, uma vez que a leitura da saída da planta será amostrada. A função de transferência de um controlador PI também pode ser escrita da seguinte forma:

$$C(s) = k_p \left(1 + k_i \frac{1}{s} \right) \quad (3.2)$$

Para encontrar seu equivalente discreto, usou-se o método de Tustin, que aborda a integração contínua de $1/s$ como uma integração trapezoidal em tempo discreto, aproximando a área da integral entre duas leituras separadas por um período de amostragem pela área do trapézio formado por elas [6]. Assim, podemos fazer a seguinte substituição

$$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.3)$$

em que T é o período de amostragem do sinal. A partir disso, obtem-se a equação do controlador discreto:

$$C(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = k_p \left(1 + k_i \frac{T}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (3.4)$$

Reorganizando a equação 3.1, tem-se

$$Y(z) = k_p U(z) + \left(\frac{k_i k_p T}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) U(z) \quad (3.5)$$

$$Y(z) - z^{-1}Y(z) = k_p - k_p z^{-1}U(z) + QU(z) + Qz^{-1}U(z), \quad Q = \frac{k_p k_i T}{2} \quad (3.6)$$

Pela fórmula da transformada Z, vemos que os elementos z^{-1} da equação da frequência discreta, se tornam atrasos de um período em tempo discreto [3]. Assim, obtém-se a seguinte equação a diferenças:

$$y(n) = (k_p + Q)u(n) + (Q - k_p)u(n - 1) + y(n - 1) \quad (3.7)$$

A partir dessa equação, o controle pode ser implementado dependendo apenas das constantes proporcional e integral do controlador, o período de amostragem, das entradas atuais e passada e da saída passada.

3.5 Entrada e saída de dados

3.5.1 Leitura de dados analógicos

Para usar realimentação, o microcontrolador precisa ler a tensão de saída do eletrodo de referência, que é um sinal analógico, e transformá-lo em um sinal digital. Para isso, um conversor A/D de 10 bits é utilizado [11], com faixa de excursão de 0 a 1023 análogo à faixa do terra ao Vcc de sua alimentação, que no caso é de 3,3 V.

Para evitar o uso de um filtro que exige mais processamento, como um filtro passa-baixas, optou-se por fazer média móvel das leituras do conversor A/D, que tem a característica de ser eficaz em reduzir ruído branco [20]. A resposta em frequência desse tipo de filtro é descrita por

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f M)}{M \sin(\pi f)} \quad (3.8)$$

A partir da equação 3.8, pode-se obter o gráfico visto na figura 3.4. Na figura, são comparadas as respostas em frequência de filtros de média móvel com diferentes números de termos utilizados na média. Pode-se observar que os filtros com mais termos rejeitam melhor as frequências mais altas, dessa forma, é possível calcular o número de termos do filtro para que este rejeite frequências desejadas.

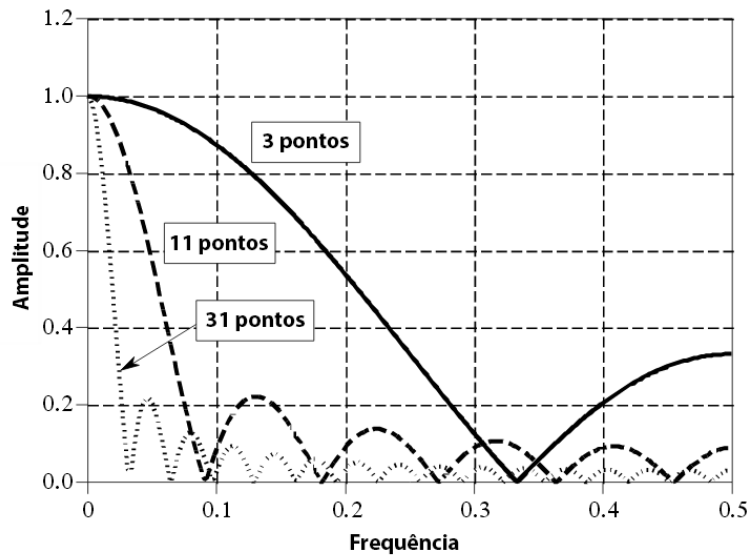


Figura 3.4: Resposta em frequência de um filtro com média móvel [20]

3.5.2 Geração de saída analógica (PWM)

O controle por Modulação de Largura de Pulso (Pulse Width Modulation - PWM) é usualmente utilizado em microcontroladores digitais. Utilizando o contador de alta resolução do microcontrolador, o Duty Cycle de uma onda quadrada é modulada de forma que a média de tensão seja a mesma de um sinal analógico desejado [8].

Em todos os instantes de tempo, a saída de um PWM está em nível alto ou baixo. Porém, com o controle da porcentagem de tempo que esta permanece em cada estado, é possível obter um sinal que em média está em um nível desejado entre as tensões alta e baixa do circuito.

Para garantir uma atenuação, utilizou-se um circuito RC ligado à saída do PWM, para gerar o sinal analógico desejado [10]. Na figura 3.5 é possível observar a forma de onda de um sinal PWM com Duty Cycles distintos, para gerar tensões médias distintas. Também é possível observar o efeito da atenuação obtida com um RC simples ligado em série com sua saída.

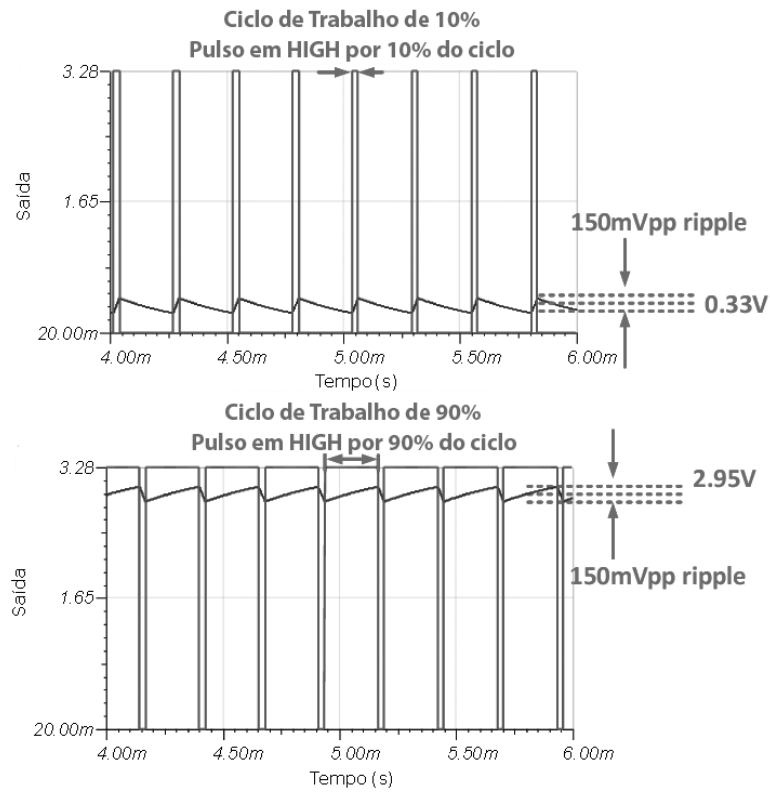


Figura 3.5: Saída de um sinal PWM atenuada com Duty Cycle de 10% e 90% [10]

Capítulo 4

Montagem do controlador

4.1 Introdução

No capítulo anterior foram abordadas as características teóricas da planta e do projeto de controle. Neste capítulo, será descrito o processo de dimensionamento e escolha dos dispositivos eletrônicos a serem usadas para viabilizar o funcionamento do controlador.

O objetivo principal do mecanismo é fornecer a quantidade de corrente necessária à planta para que a chapa de aço esteja protegida. Portanto, o dispositivo deve ser ajustado para controlar a planta até que a saída alcance o valor de referência desejado.

Nesse projeto, foi requisitado que o dispositivo de controle fosse capaz de encontrar a corrente de carga da planta para diferentes valores de tensão de eletrodo em estado estacionário. Quando a tensão do eletrodo estiver estacionária, o controlador deve registrar o valor de corrente sendo fornecido e então começar a controlar o sistema com uma nova tensão de referência, previamente escolhida pelo usuário.

Antes da escolha definitiva dos componentes eletrônicos a serem usados, é preciso listar as funcionalidades desejadas para o dispositivo e planejar como estas poderão ser implementadas. Sua funcionalidades são:

- Meio físico que permita a comunicação do mecanismo com dispositivos móveis e computadores. Por meio destes deve ser possível o monitoramento em tempo real das leituras de tensão e corrente obtidas pelo micro-controlador, e também a alteração de parâmetros do controle;
- Interface com memória externa. Assim, será possível ler de um arquivo quais são os valores de referência a serem seguidos e gravar as leituras obtidas em outro arquivo;
- Eletrônica que permita a leitura da corrente injetada na planta e a conversão A/D e D/A relacionadas ao micro-controlador, previstas na figura 3.1;
- Microcontrolador com pinos, memória de dados e de programa suficientes para atender às funcionalidades citadas.

4.1.1 Comunicação com dispositivos móveis e computadores

Para a transmissão das informações desejadas, não é necessária a transferência de uma quantidade grande de dados, uma vez que as leituras de tensão e corrente podem ser expressas em números inteiros ou de ponto flutuante com 2 ou 4 bytes. Portanto, será usada comunicação que emula o protocolo RS-232 para tal interface.

Nessa forma de comunicação, os dispositivos possuem duas conexões físicas entre seus pinos de envio e recebimento de dados e uma conexão do terra compartilhado entre eles. Quando a linha está inativa, ela permanece em tensão alta. Para sinalizar o começo da transferência de um dado, envia-se um bit LOW (Start Bit), em uma baud rate que é igual nos dois dispositivos, e em seguida 8 bits de mensagem, começando com o bit menos significativo do byte. Após o envio do oitavo bit, envia-se um bit HIGH (Stop Bit) para sinalizar o fim da transmissão do byte [21].

Para fazer a interface física com computadores de dispositivos Android, foi adotado o Bluetooth, uma vez que ele é nativo em quase todos os celulares e em muitos PCs. A conexão por cabo foi descartada, por exigir conversores serial-USB ou serial(3.3V/5V)-RS-232(voltagem padrão).



Figura 4.1: Ilustração da transmissão de um byte pelo protocolo RS-232 [21]

O protocolo de bluetooth escolhido foi o RFCOMM, uma vez que ele encapsula seus dados emulando portas seriais RS-232 [1], o que facilita a criação dos aplicativos em PCs e Android para comunicarem-se com o microcontrolador.

4.1.2 Interface com memória externa

Para que o mecanismo projetado possa funcionar de forma autônoma, é preciso que ele seja capaz de ler de uma memória externa quais são os set-points que ele deseja seguir no circuito, de forma a obter a corrente final fornecida no estado estacionário. Também é preciso que ele possa registrar nessa memória as leituras que fez durante o processo, para que elas possam ser analisadas pelo usuário mesmo que ele não tenha acompanhado a evolução do sistema em tempo real.

As leituras a serem guardadas são a tensão lida do eletrodo de referência, e a tensão e corrente na saída do PWM que serão enviadas à planta. Cada uma dessas leituras é feita baseada no span de 0 a 1023 da saída do PWM e da leitura do conversor A/D do PIC, que são ambos de 10 bits. Portanto, são variáveis de 2 bytes cada. Assim, cada gravação possui 6 bytes.

Devido à quantidade de bytes a serem gravados por leitura e o objetivo de fazer um mecanismo que possa funcionar em autonomia por longos períodos de tempo, CIs de memória externa não volátil poderiam não ser capazes de guardar todos os dados desejados. Assim, optou-se por fazer interface com cartão de memória SD.

4.1.2.1 Comunicação com o cartão

A comunicação com o cartão SD se dá pelo protocolo serial SPI, criado pela Motorola. Este protocolo suporta, múltiplos servos, mas no caso será usado apenas um, que é o cartão SD, enquanto o microcontrolador será o mestre. A conexão está esquematizada na figura 4.2, e é composta pelos 4 pinos de cada dispositivo:

- SCLK: Clock da serial (enviado pelo mestre);
- MOSI: Clock da serial (enviado pelo mestre);
- MISO: Clock da serial (enviado pelo servo);
- SS: Seletor de servo (enviado pelo mestre).

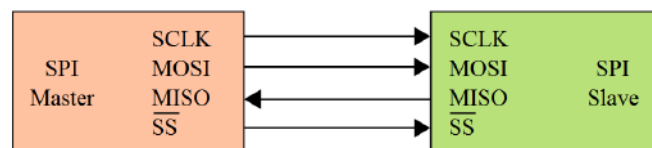


Figura 4.2: Diagrama de blocos de uma conexão SPI com um mestre e um servo

O cartão SD funciona como uma máquina de estados, esperando o clock do mestre para poder executar suas transações. É também esse clock que sincroniza os bits das mensagens enviadas através de MOSI e MISO [14].

Como o cartão suporta frequência de até 20MHz, o microcontrolador poderá rodar com seu oscilador na frequência mais alta garantindo que a gravação de dados seja a mais rápida possível, e, assim, não afete o sincronismo das outras atividades do sistema.

4.1.3 Eletrônica dos conversores e leitura de corrente

4.1.3.1 Saída do PWM e conversão D/A

Como mencionado na seção 3.5.2, a saída de um PWM é uma onda quadrada com um ciclo de trabalho variável. Essa onda pode ser atenuada ligando um circuito RC em série com o pino de saída.

Uma análise de Fourier de um PWM típico de período de amostragem T revela que há uma forte frequência de pico em $F_n = 1/T$. Outros harmônicos intensos podem ser encontrados nas frequências $F=K/T$, em que K é um número inteiro [12], como mostra a figura 4.1.3.1.

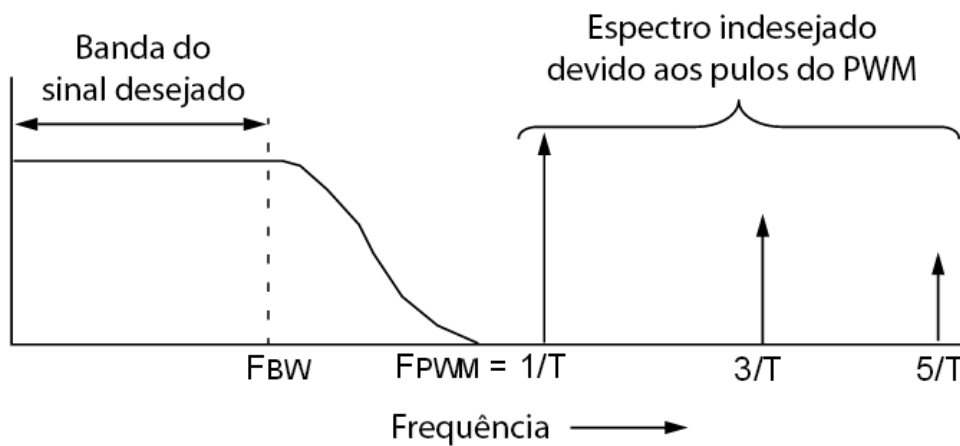


Figura 4.3: Filtro passa-baixas [12]

Como visto na figura 4.1.3.1 deve-se eliminar os picos de frequência com filtro passa-baixas, em que é necessária a seguinte relação entre a frequência de corte do filtro F_{BW} e a frequência do PWM F_{PWM} :

$$F_{BW} \ll F_{PWM} \quad (4.1)$$

$$F_{PWM} = KF_{BW}, \text{ em que } K \gg 1 \quad (4.2)$$

O filtro passa-baixas escolhido foi um filtro RC, pela facilidade de acesso aos componentes necessários para montá-lo.

Escolhendo uma constante K que obedece a esse critério, é possível encontrar a frequência de corte desejada F_{BW} do filtro RC, assim seus parâmetros podem ser adquiridos da relação

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.3)$$

Após o filtro RC, também deve ser colocado um amplificador operacional funcionando como buffer, para garantir que a impedância de saída do pino do PIC não interfira na planta. Em um amplificador operacional ideal, a tensão entre os terminais de entrada positivo e negativo é igual. Num buffer, a saída é realimentada diretamente no terminal negativo. Dessa forma, o potencial na entrada (pino positivo) e na saída do Buffer se torna o mesmo. Nesse caso, porém, a impedância ligada à planta é igual a impedância da saída do operacional, que é próxima de zero. [19]

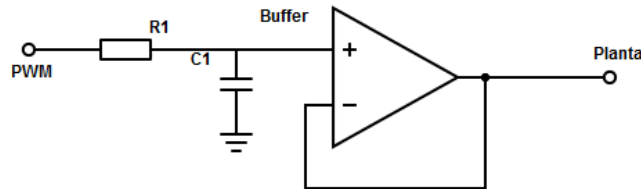


Figura 4.4: Circuito entre a saída do PWM e a Planta

4.1.3.2 Leitura do eletrodo de referencial

Para a leitura da tensão vinda do eletrodo, é preciso garantir que a impedância de saída da planta não influencie na leitura do A/D do micro-controlador.

De acordo com o datasheet da família 18F de PICs, deve-se garantir que a impedância máxima da fonte ligada ao A/D seja de $2,5k\Omega$. Para garantir isso, é colocado um buffer entre o eletrodo e o pino de leitura do A/D.

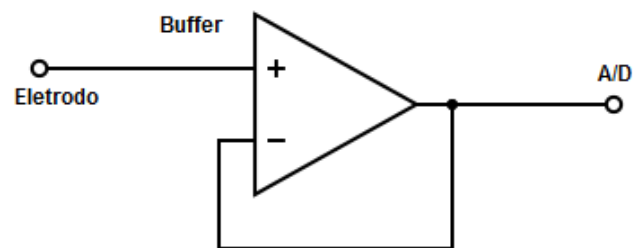


Figura 4.5: Circuito entre a eletrodo de referência e pino do conversor A/D

4.1.3.3 Leitura da corrente injetada no circuito

No micro-controlador é possível controlar a tensão de saída no pino do PWM, por meio do ajuste do seu ciclo limite. No entanto, a corrente de saída desse pino não é controlada pelo PIC e depende do sistema a que ele está ligado.

Para fazer a leitura de corrente injetada na planta, é inserido um resistor em série com a saída para a planta após o buffer do PWM. A tensão sobre esse resistor é amplificada por um amplificador operacional, de forma que a faixa de valores lidos pelo microcontrolador seja análoga à variação entre V_{cc} e terra do microcontrolador, que são os valores máximo e mínimo de leitura do A/D.

Na figura 4.5, um amplificador diferencial mede a tensão sobre uma resistência de carga [19]. O ganho desse amplificador, quando usados apenas 2 resistores distintos é [19]

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.4)$$

A resistência R_{carga} deve ser bem pequena, de forma a interferir o mínimo possível

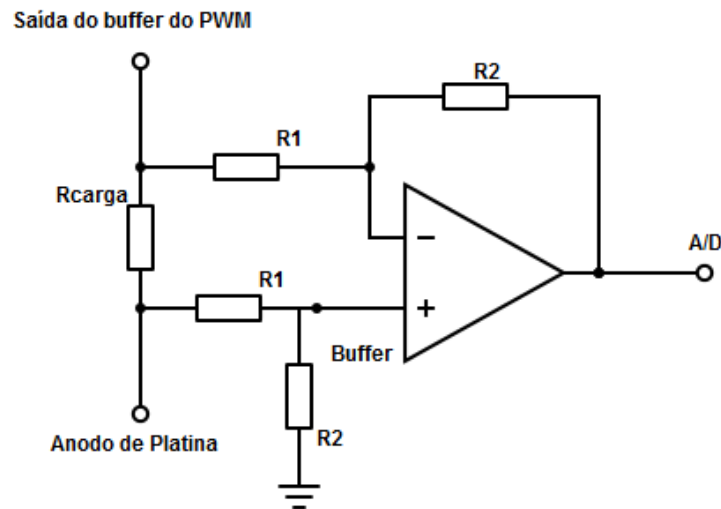


Figura 4.6: Circuito para medição da corrente injetada na planta

no circuito, o que resulta numa pequena tensão sobre ela, que é amplificada em seguida e ligada ao A/D. Como a resistência de carga é conhecida, e o ganho de amplificador também, é possível calcular a corrente.

4.1.4 Escolha do micro-controlador utilizado e seus parâmetros

A partir da análise das seções acima, é possível encontrar os requisitos mínimos que o micro-controlador deve ter para executar as funcionalidades esperadas. Dentre essas destacam-se:

- Possuir memória RAM o suficiente para guardar a menor subdivisão de memória que um cartão SD transfere. O sistema de arquivos usado pelo cartão SD é o FAT (File Allocation Table) e para que se efetue leitura e escrita de dados nele, utiliza-se blocos contendo 512 bytes. Assim, o microcontrolador precisa ser capaz de armazenar esses 512 bytes, assim como as variáveis do programa de controle.
- A memória de programa deve ser capaz de armazenar as funções de leitura do cartão SD, que podem ocupar mais de 20KB de memória, assim como o programa que governa o funcionamento do sistema de monitoramento e controle;

- O micro-controlador deve estar entre aqueles que suportam a biblioteca da Microchip para interface com SD;
- Ter pinos para todas as conexões necessárias, incluindo dois para leitura do A/D, um para a saída do PWM, e um para o led de status. São necessários seis pinos para serial e SPI juntas, e preferencialmente essas formas de comunicação já devem estar implementadas por hardware no PIC.

O micro-controlador escolhido para o projeto foi o PIC18LF2620, com 32K de instruções single-word (64KB de Flash), 4KB de memória RAM, 28 pinos, 8 canais de A/D de 10 bits. Além disso, ele possui suporte aos protocolos RS-232 e SPI por Hardware [11].

Outro motivo para a escolha do PIC18LF2620 é sua alimentação por 3.3V. Essa voltagem é a mesma usada para alimentar o cartão SD e muitos modelos de módulo Bluetooth.

4.1.4.1 Frequência do oscilador do PIC

O oscilador interno do PIC escolhido chega até a frequência de 32 MHz. No entanto, o PIC escolhido executa suas instruções a um quarto da frequência de operação do oscilador, podendo alcançar no máximo 8MHz de frequência de instrução. A frequência utilizada será a máxima, para garantir que as transações com o cartão SD sejam tão rápidas quanto possíveis, de forma a não prejudicar a parte de controle do programa.

O funcionamento do PWM está diretamente ligado ao oscilador, de forma que é a sua frequência de oscilação que ele divide para formar o período de suas ondas quadradas. Para a resolução máxima do PWM, de 10 bits, são possíveis $2^{10} = 1024$ Duty Cycles distintos. Isso significa que a frequência do oscilador deve ser dividida por 1024 para se obter a do PWM. Então, para esse PIC, a frequência máxima do PWM é $32MHz/1024 = 31250Hz$.

4.2 Dimensionamento e escolha dos componentes eletrônicos do circuito

Com a decisão do micro-controlador a ser utilizado para o mecanismo, é possível agora escolher os valores das resistências e capacitores dos circuitos, assim como definir os CIs usados para os amplificadores operacionais e o módulo Bluetooth.

4.2.1 Módulo Bluetooth

O módulo Bluetooth escolhido foi o HC-06, um dos mais usados para circuitos com micro-controladores, uma vez que ele possui baixo consumo de corrente e pode ser alimentado com tensão 3,3V. Esse módulo possui a capacidade de trabalhar como mestre ou servo, mas para esse projeto ele só será usado como servo.

O módulo e o PIC se comunicarão a uma Baud Rate de 115200bps.

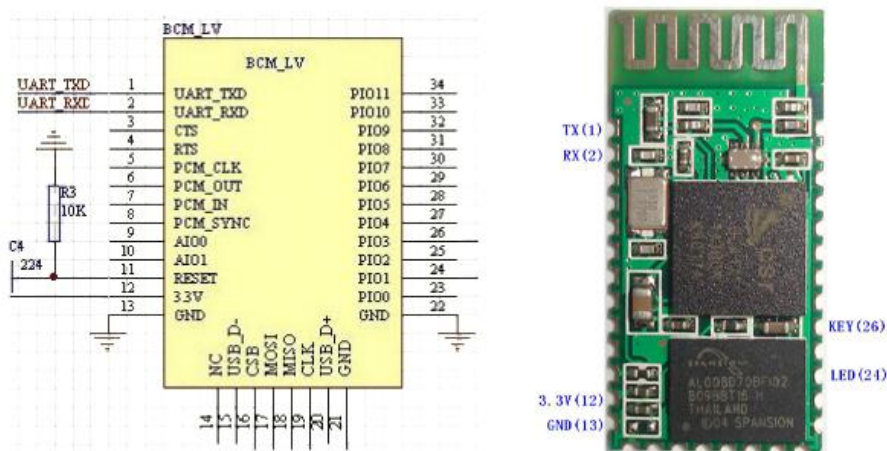


Figura 4.7: Listagem de pinos e foto de um HC-06

4.2.2 Amplificadores Operacionais

Para os CIs dos amplificadores operacionais, foram escolhidos um LM10, com um amplificador operacional, e um LM6132, com dois amplificadores operacionais, totalizando três amplificadores necessários ao nosso sistema. Os pinos desses dois amplificadores estão esquematizados na figura 4.8.

No circuito, nenhum dos dois amplificadores é alimentado simetricamente. Ambos são alimentados com terra e V_{cc} com potencial 3.3V, o que limita tanto a leitura dos A/Ds, quanto o sinal de tensão enviado à planta de 0 a 3.3V com relação ao terra da fonte e à chapa de aço.

É importante destacar que para o operacional ligado à planta, a alimentação não pode ser simétrica. Isso poderia ter sido implementado para permitir um sinal de controle negativo, através do uso de um offset de tensão, mas iria contra o propósito do sistema. Caso fosse possível ter uma tensão negativa na saída do operacional, a planta estaria fornecendo corrente para o circuito, o que significaria que o aço estaria sendo corroído, o que é o contrário do objetivo deste projeto.

O amplificador utilizado para fornecer a corrente necessária à platina deve ser capaz de fornecer até $6mA$ em sua saída. O amplificador operacional usado para isto foi o LM6132, que é capaz de fornecer até $25mA$. [9]

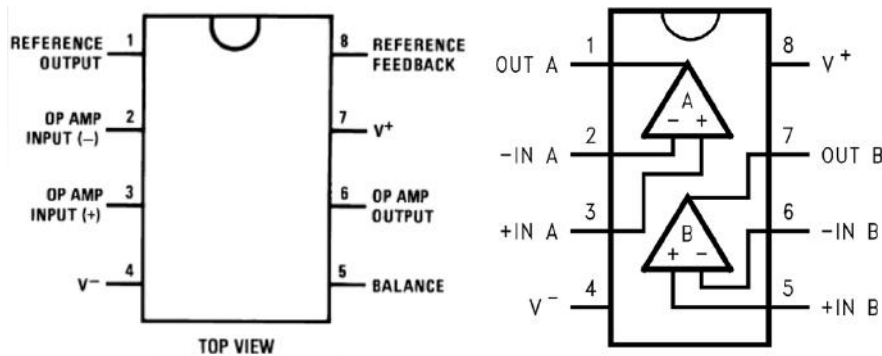


Figura 4.8: Esquático dos amplificadores operacionais, LM10 (à esquerda) e LM6132 (à direita)

4.2.3 Valores das resistências e capacitâncias do circuito

Como visto na seção 4.1.3.1, a inserção de um circuito RC em série com a saída do PWM serve para atenuar sua forma de onda quadrada, gerando o sinal analógico desejado. Com a frequência do PWM conhecida, é possível agora calcular uma frequência de corte do filtro F_{BW} de acordo com a equação 4.2. Escolhendo a constante $K = 10$

$$F_{PWM} = 10F_{BW} \Rightarrow F_{BW} = \frac{31250}{10} = 3125Hz \quad (4.5)$$

Usando agora, a equação 4.3, com a frequência de corte $f_c = 3125Hz$, pode-se obter os valores de R e C para esse filtro passa baixas

$$\frac{1}{2\pi RC} = 3125Hz \quad (4.6)$$

$$R = 4.7K\Omega \quad (4.7)$$

$$C = 0.01\mu F \quad (4.8)$$

Para encontrar os valores das resistências $R1$ e $R2$ da seção 4.1.3.3, é preciso saber quais são as faixas de corrente que podem passar pelo resistor de carga R_{carga} . De acordo com a especificação do projeto, essa corrente não passa de $6mA$ dentro da região de trabalho desejada para a planta. O valor mínimo para essa corrente é zero, uma vez que a tensão na saída do buffer do PWM não pode ser negativa, como visto em 4.2.2.

A escolha do resistor de carga é feita de forma a minimizar a influência da perda da tensão sobre ele na planta. Um resistor $R_{carga} = 1\Omega$ é definido para atender esses critérios.

Como a corrente máxima sobre o resistor de carga é $6mA$, então a tensão máxima sobre ele é

$$V_{max} = R_{carga} * 0.006 \Rightarrow V_{max} = 6mV \quad (4.9)$$

O ganho do diferencial deve ser escolhido de forma a transformar a tensão acima na máxima que o A/D do microcontrolador pode ler, que é $3.3V$. Com isso, garante-se uma boa precisão na leitura da corrente que passa pelo resistor de carga e é

injetada na planta. Assim, pode-se calcular o ganho do amplificador diferencial e as resistências $R1$ e $R2$, de acordo com a equação 4.4

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{3.3V}{6mV} = \frac{R2}{R1}, \quad (4.10)$$

$$\frac{R2}{R1} = 550. \quad (4.11)$$

Com essa relação, e com base nas resistências disponíveis no ambiente de elaboração do projeto, escolheu-se

$$R1 = 1.0K\Omega \text{ e } R2 = 510K\Omega \quad (4.12)$$

Nessa configuração, é possível fazer a leitura correta de uma corrente de até $6.47mA$ injetada no circuito.

4.3 Circuito final do sistema de controle

Com o cálculo de todos os elementos e a escolha dos CIs necessários foi feito o esquemático do sistema, que foi colocado no Apêndice A.

As figuras 4.9 e 4.10 mostram a placa com o circuito pronto. Foram adicionados dois LEDs à placa, um para sinalizar que o sistema está ligado e outra para sinalizar que uma gravação está sendo feita no cartão SD. Um botão também está presente na placa para reiniciar o programa do microcontrolador.

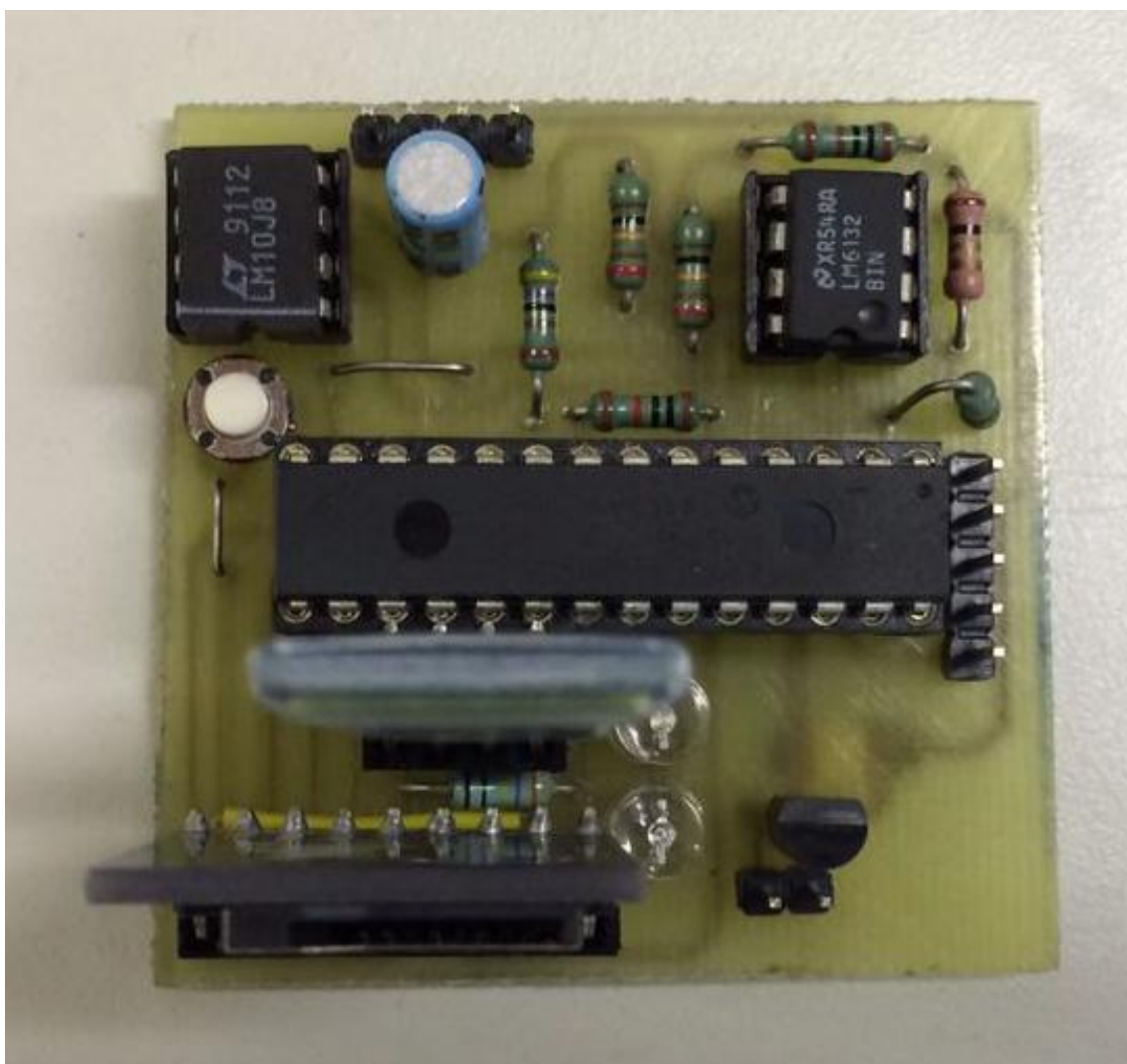


Figura 4.9: Placa vista de cima, com destaque para o microcontrolador, LEDs e amplificadores operacionais



Figura 4.10: Placa vista de outro ângulo, com destaque para interface de cartão SD e módulo Bluetooth

Capítulo 5

Controle da Planta

Após a montagem do sistema descrito no capítulo anterior, ele está pronto para ser ligado à planta. Em primeiro momento, o sistema de controle ainda não tem um programa que execute todas as funcionalidades previstas anteriormente. Ele é apenas usado para a coleta de dados para que se estime a função de transferência da planta de proteção catódica e que se encontre e teste uma lei de controle satisfatória.

Nas figuras 5.1 e 5.2 abaixo são mostrados os elementos da planta de proteção catódica. A chapa de aço, o eletrodo e o anodo de platina estão submersos em uma solução, feita em um laboratório do CENPES, que se aproxima da água do mar. Este é o eletrólito da planta.

O eletrodo, quando imerso no eletrólito, gera um potencial em relação à chapa de aço, também em solução. Na especificação passada com o projeto, se esse valor de tensão ultrapassar $500mV$, então a chapa de aço está protegida. Para controlar esse potencial, o controlador varia a tensão sobre o anodo de platina — também em contato com a planta — injetando corrente na planta.

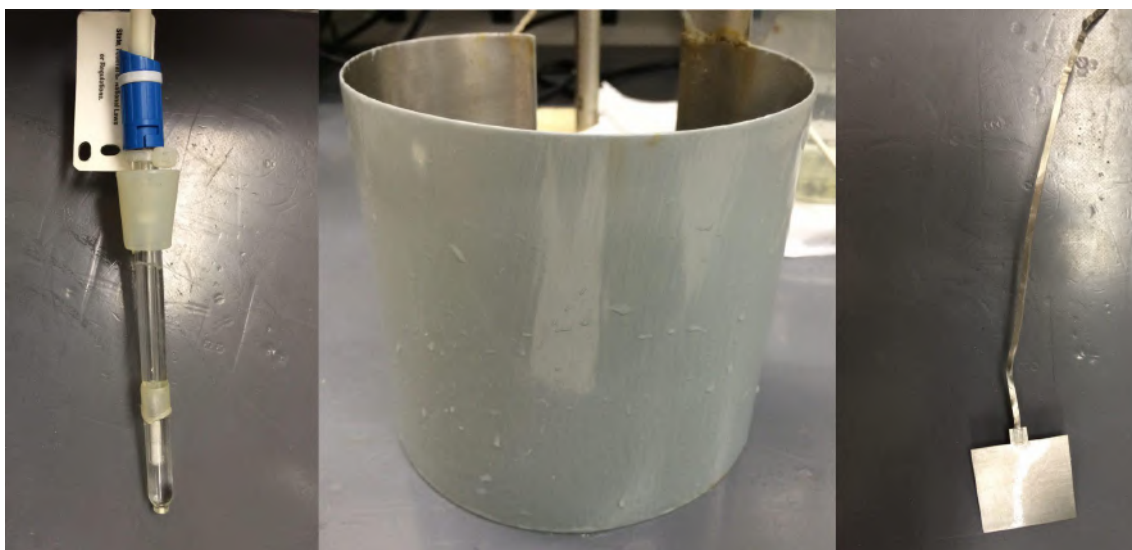


Figura 5.1: Da esquerda para a direita: Eletrodo de referência, Chapa de aço, Anodo de platina.

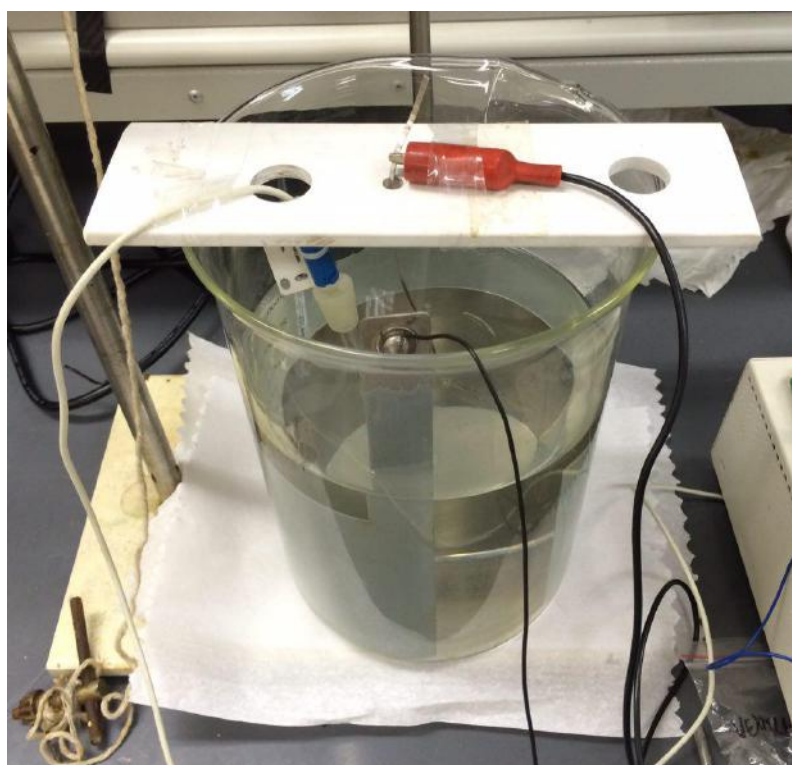


Figura 5.2: Planta completa, com os 3 elementos imersos em solução de água do mar.

5.1 Estimando o modelo da planta

Com o sistema de controle conectado à planta, é possível enviar sinais arbitrários a ela e fazer a leitura de suas variações. Utilizando-se dessa vantagem, o modelo da planta é estimado através da análise da resposta a pequenos degraus do sistema a partir de diferentes patamares de tensão em estado estacionário.

O comportamento da resposta da planta com relação ao degrau dentro de cada região distinta de tensão na referência vai indicar quais os parâmetros que o controlador PI utilizado deve adotar para uma determinada faixa de valores da saída.

Nos cálculos e medições feitas adiante, será usado o período de amostragem de um segundo. Tal período foi escolhido após observar que a planta possui um tempo de resposta lento a mudanças que ocorrem na entrada. Além disso, o foco desse sistema de controle está na resposta de estado estacionário do sistema.

5.1.1 Resposta da planta a pequenos degraus

Para alcançar a saída da planta obtida na figura 5.4, o controlador enviou um sinal de controle constante e se manteve medindo a tensão do eletrodo referência até um ponto em que as medidas ao longo do tempo indicassem que a tensão lida estivesse em estado estacionário. Nesse momento, o controlador adicionava um degrau de 250mV ao sinal de controle, e a partir daí o ciclo se repetia. O fluxograma desse processo pode ser visto na figura 5.3.

Gerador de pequenos degraus

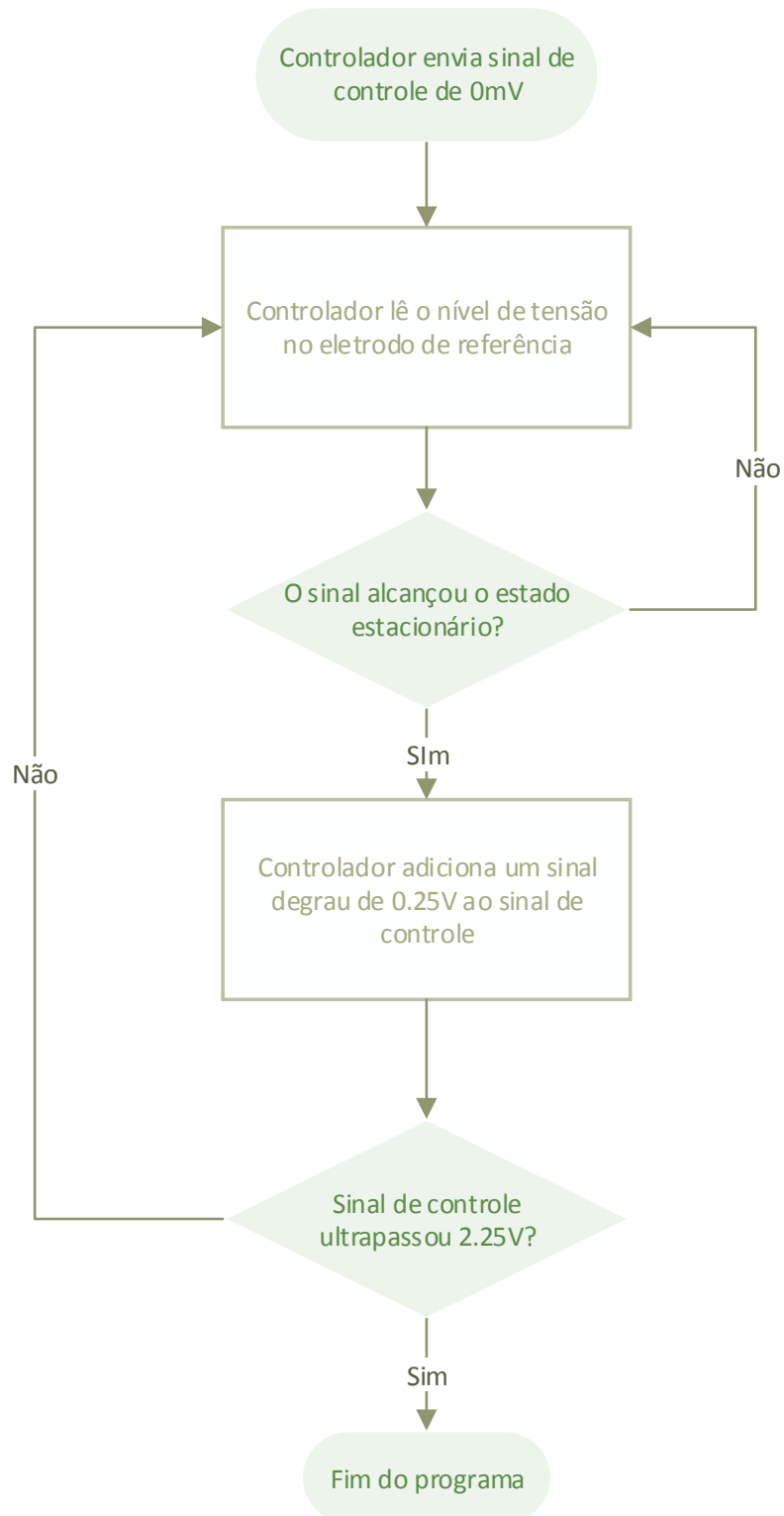


Figura 5.3: Fluxograma do processo de medição de resposta a pequenos degraus

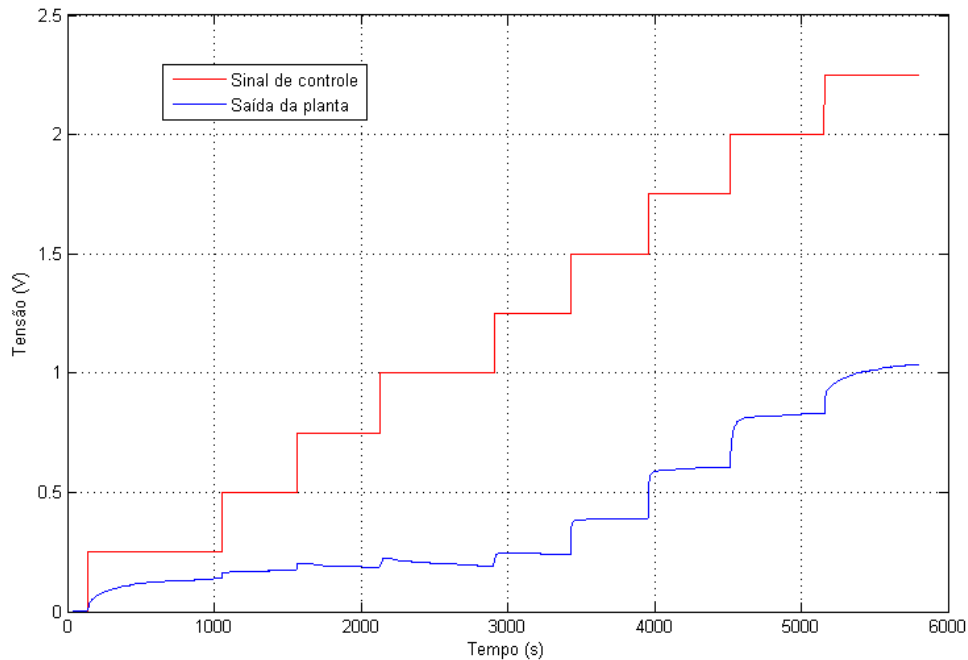


Figura 5.4: Gráfico com de resposta do potencial do eletrodo aos degraus no sinal de controle

5.1.2 Usando o Matlab para estimar comportamento da planta

Utilizando a ferramenta System Identification Tool, são encontrados por algoritmos numéricos os parâmetros do modelo do sistema. Observando o gráfico da figura 5.4, se identificou o sistema baseado no comportamento dentro de 3 faixas de valores de tensão de saída na referência:

- Região 1 - Referência de $0mV$ a $130mV$ - Essa é a faixa de valores obtidas a partir da aplicação de um degrau de $0mV$ a $250mV$ no sinal de controle. A resposta do sistema nessa região se assemelha a de um sistema de primeira ordem sem tempo morto — uma vez que a resposta da planta ao degrau foi imediata. Utilizando-se desses parâmetros na ferramenta de identificação do Matlab, achou-se a seguinte função de transferência.

$$G_1(s) = \frac{0,54175}{199,7s + 1} \quad (5.1)$$

Esta função possui o pólo estável $p_1 = -0,005$ bem próximo da origem, tor-

nando a resposta da planta bem lenta. Isso é explicado porque o pólo define o expoente da exponencial da resposta no tempo a um degrau de uma planta de primeira ordem [15].

$$c(t) = 1 - e^{p_1 t}, t \geq 0 \quad (5.2)$$

Assim, quanto mais próximo de zero for o pólo negativo, mais lenta é a exponencial, e mais tempo é necessário para seu termo zere e a resposta chegue a um.

Com um pólo tão próximo da origem, a porção integral do controle PI a ser usado não precisará ter tanto peso sobre a saída de controle na região 1;

- Região 2 - Referência de $130mV$ a $240mV$ - Essa é a faixa de valores observada entre os tempos 1000 e 3400 segundos. A identificação dessa faixa por planta de primeira ordem não foi satisfatória, assim, essa planta foi considerada como de segunda ordem sem tempo morto, e o programa de identificação encontrou a seguinte função de transferência

$$G_2(s) = \frac{0,18493}{(441,79s + 1)(5,3576s + 1)} \quad (5.3)$$

Que possui dois pólos estáveis em $p_1 = -0,0023$ e $p_2 = -0,1867$. O pólo p_1 contribui para uma resposta lenta da planta nessa região, por estar bem próximo a origem, o que também o faz agir quase como um integrador. É importante notar que a constante proporcional da planta é menor nessa região. Uma vez que a região em que se deseja trabalhar é a 3 — onde estão os valores de potencial do eletrodo que protegem o aço —, a constante proporcional do controle PI nessa faixa deve ser alta, para garantir uma variação maior de tensão e permitir a passagem da planta para a região 3;

- Região 3 - Referência de $240mV$ em diante - Para que a proteção catódica ocorra, é nessa faixa em que o sistema deve trabalhar. Pela resposta do gráfico, é possível ver na figura 5.4 que a resposta da reação eletroquímica é mais rápida nessa faixa e que se assemelha a uma planta de primeira ordem sem tempo morto. Usando a ferramenta de identificação, obtém-se

$$G_3(s) = \frac{0,34178}{6,2605s + 1} \quad (5.4)$$

Que possui um pólo estável em $p_1 = -0,1597$. Esse pólo mais distante da origem condiz com o previsto observando-se o gráfico, de que a resposta da planta ao degrau nessa região é mais rápida.

Na figura 5.5 são mostrados os gráficos comparativos entre a resposta ao sinal de entrada para as funções de transferências achadas e a resposta do gráfico na figura 5.4, dados pela System Identification Tool do Matlab. Na figura 5.5 as respostas medidas em experimento estão na cor preta, e as respostas dos respectivos sistemas identificados estão coloridos.

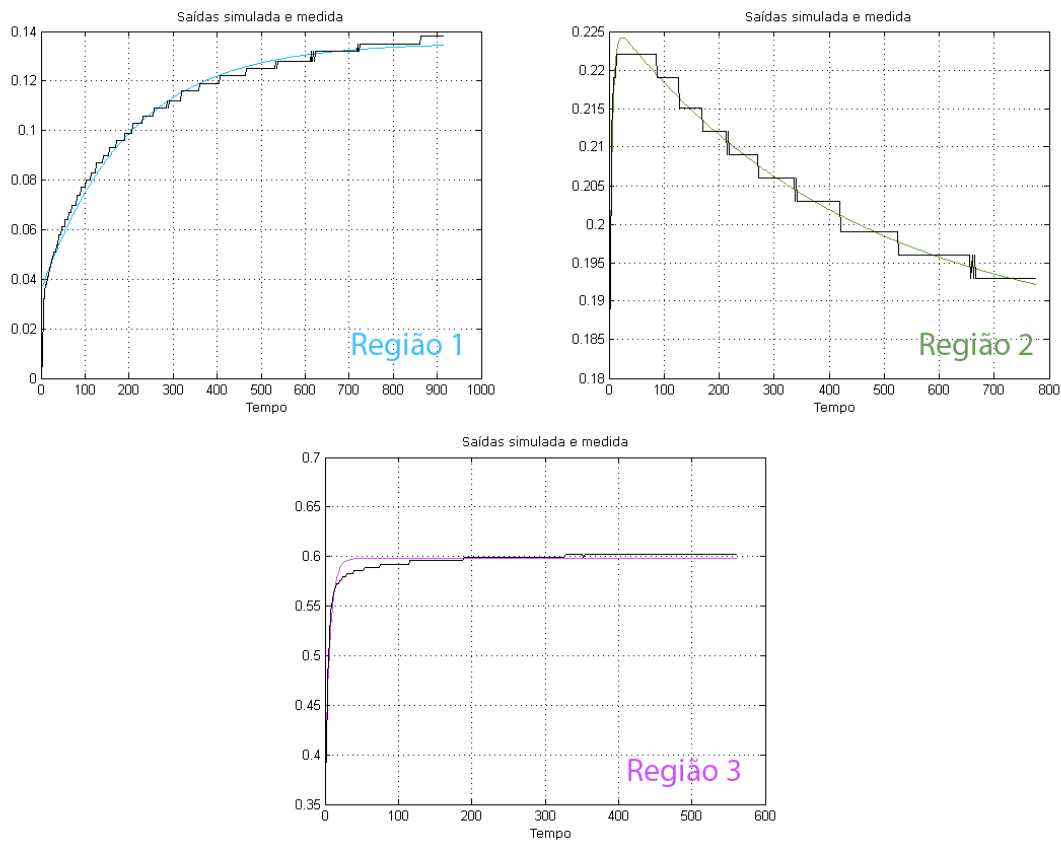


Figura 5.5: Comparativo entre respostas achadas

5.2 Sintonizando o PID através do Simulink

Com as funções de transferência de cada região já obtidas, foi utilizado o Simulink para encontrar os melhores parâmetros que permitem fazer a planta seguir um valor de referência.

Para a simulação do sistema, foi usado o modelo da figura 5.6.

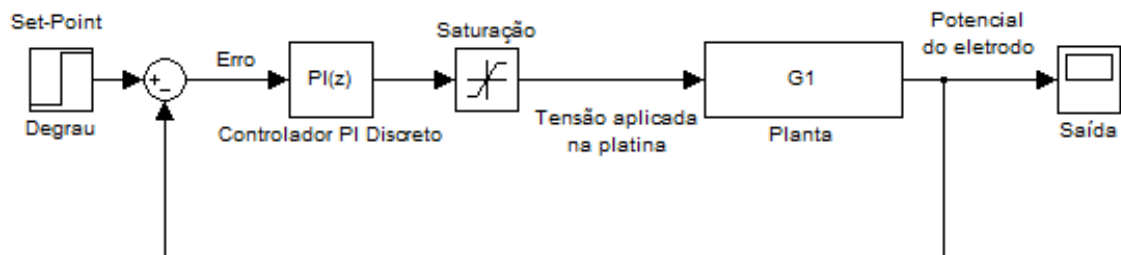


Figura 5.6: Modelo em Simulink usado para sintonizar

em blocos estão configurados da seguinte forma:

- Degrau - Serve como a referência a ser seguida pela planta. Configurado como um degrau do começo da região até 0,5V;
- PI - Está configurado como discreto, com método de aproximação da integral Tustin e tempo de amostragem de 1s — o mesmo a ser usado no sistema real;
- Saturação - Limita a saída do controlador PI de 0 a 3,3, como no sistema real. Devido a essa saturação, seria possível ocorrer wind-up do termo integral do controlador, porém, isso não foi uma preocupação devido às constantes integrais de valor baixo esperadas para o controlador. Essas constantes são justificadas pelos pólos tão próximos à origem nas plantas estimadas para as 3 regiões.
- Planta - Possui a função de transferência da região da planta que se deseja controlar.

A função de transferência do controlador PI é parametrizada da seguinte forma:

$$C(s) = k_p \left(1 + k_i \frac{1}{s} \right). \quad (5.5)$$

Utilizou-se a ferramenta de sintonia de PI fornecida pelo Simulink, com especificação seguir a referência no menor tempo possível sem ultrapassar valores de saturação para o sinal de controle. Foi configurado o valor de 3,3 para a saturação do sinal de controle vista no bloco correspondente da figura 5.6. Assim, obteve-se os parâmetros do controlador para as Regiões 1 a 3.

Para a região 1, foram encontrados os seguintes parâmetros do controlador

$$k_p = 3,2149 \text{ e } k_i = 0,0157 \quad (5.6)$$

Com controle integral baixo, como esperado, devido à presença de um pólo tão próximo da origem na função de transferência dessa região.

Para a região 2, foram encontrados os seguintes parâmetros do controlador

$$k_p = 3,6980 \text{ e } k_i = 0,0067 \quad (5.7)$$

Com um ganho integral ainda menor que o da região anterior, já que possui um pólo ainda mais próximo da origem. É importante ressaltar que a resposta do sistema controlado é bastante lenta em relação aos demais. Isso ocorre devido à constante proporcional menor da sua função de transferência. Um aumento do ganho proporcional no controlador não ajudaria a tornar o sistema realimentado mais veloz, uma vez que a saturação do sinal de controle impede isso.

Para a região 3, foram encontrados os seguintes parâmetros do controlador

$$k_p = 1,5622 \text{ e } k_i = 0,4284 \quad (5.8)$$

Nessa região, em que a resposta do sistema é bem mais rápida, o ganho proporcional do PI pode ser menor. O ganho do integrador é maior, pois o pólo da função de transferência dessa região está distante da origem.

O gráfico da figura 5.7. mostra o comportamento do potencial simulado do eletrodo no sistema controlado. Cada região tem uma referência que a faz chegar

em 0.5V, que é a tensão que protege o circuito eletroquímico. Cada região parte do começo de sua faixa de valores.

Devido às constantes dos controladores PI, que foram escolhidas evitando a saturação do sinal, o desempenho dos controladores varia bastante, uma vez que as plantas das regiões possuem funções de transferência bem distintas.

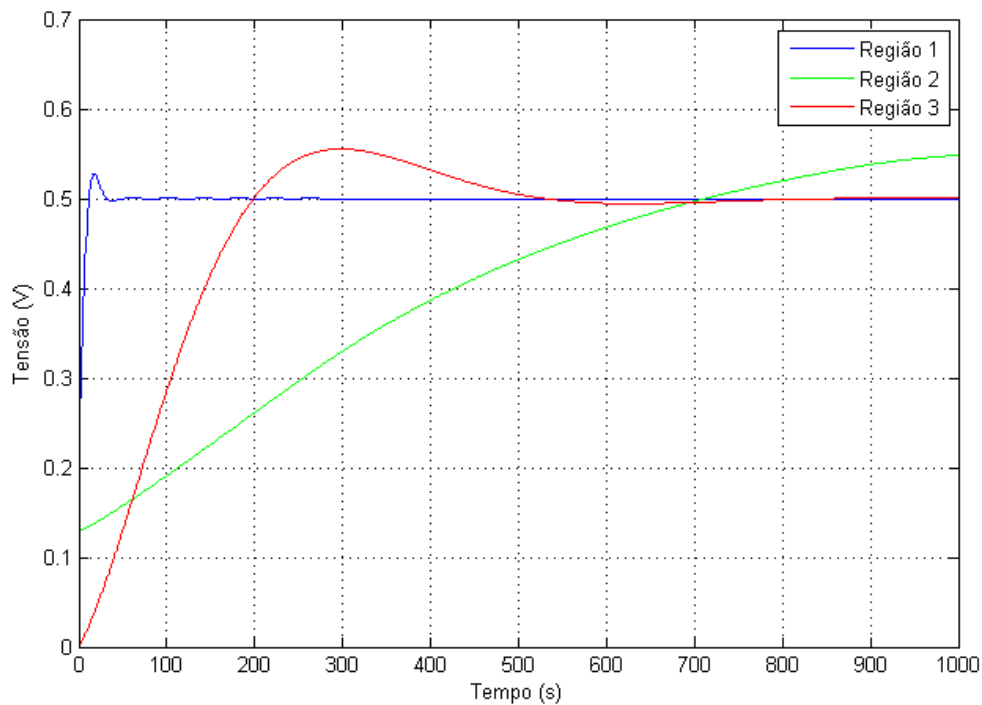


Figura 5.7: Gráfico das respostas dos sistemas realimentados para as diferentes regiões (Região 2 atinge o regime permanente não visível na imagem)

5.3 Resultados experimentais

Com a obtenção dos parâmetros do controlador para cada uma das regiões, implementou-se no PIC um controlador PI que muda seus parâmetros de acordo com a faixa de valores em que se encontra o potencial do eletrodo que está sendo lido por ele.

A implementação do controle discreto utilizou a equação de diferenças calculada

na seção 3.4

$$y(n) = (k_p + Q)u(n) + (Q - k_p)u(n - 1) + y(n - 1), \text{ em que } Q = \frac{k_p k_i}{2}. \quad (5.9)$$

Ligando a planta ao PIC com esse mecanismo de controle, obteve-se as respostas mostradas na figura 5.8.

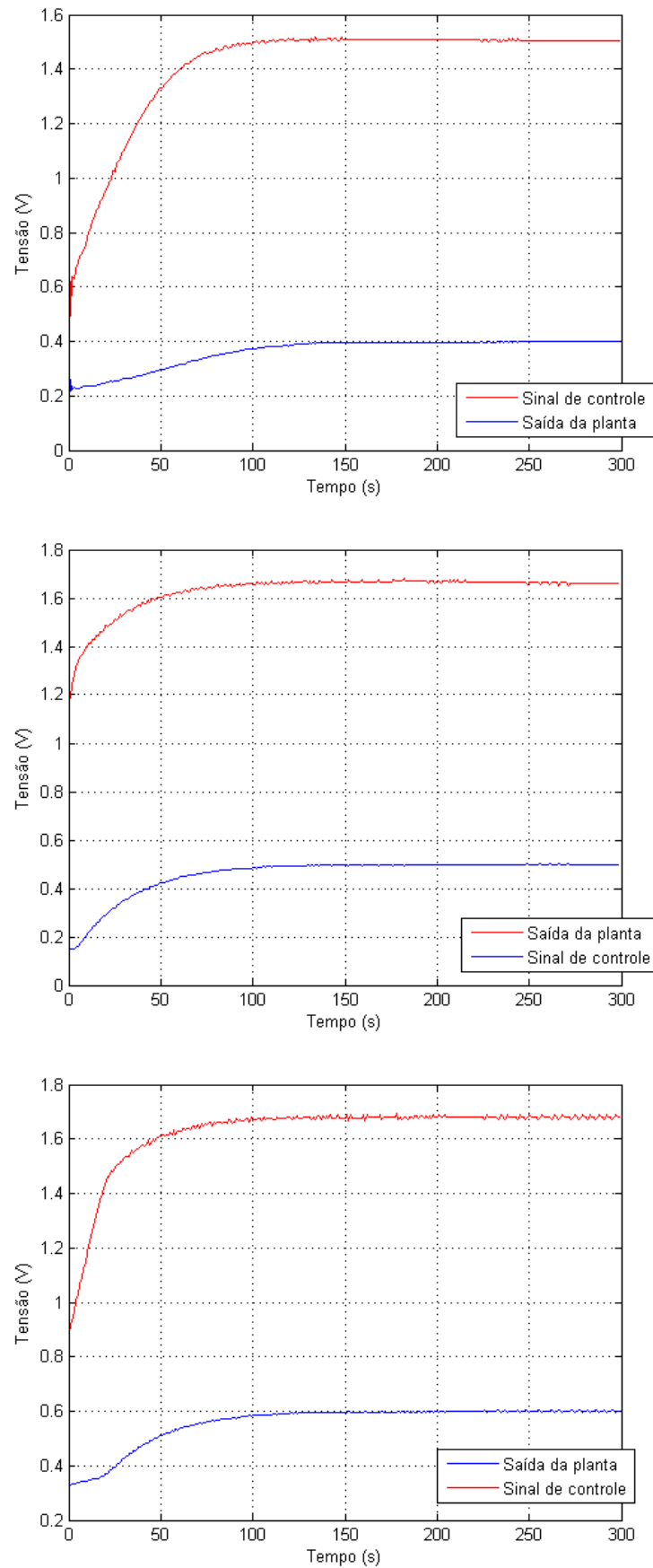


Figura 5.8: Gráfico das respostas do sistema real para os setpoints de 0.4V, 0.5V e 0.6V respectivamente

A resposta simulada e a experimental vistas nas figuras 5.7 e 5.8, respectivamente, não se comportam de forma igual. Essa diferença pode ser justificada pelas diferenças eletroquímicas da água utilizada para a estimação da planta, comparada àquela utilizada para retirada dos dados experimentais. Uma vez que a quantidade da mistura que simula água do mar era limitada, foi necessário reutilizá-la mais que o desejado. Isso pode ter acarretado mudança de suas características, já que íons H^+ são liberados com a injeção de corrente pela platina, alterando o pH da solução.

Apesar disso, observou-se que o sistema para o controle da reação de proteção é satisfatório, demorando menos de dois minutos para levar o potencial do eletrodo a um valor que proteja a chapa de aço.

Capítulo 6

Sistema de Monitoramento e Interface com Usuário

6.1 Programa no PIC

Para que o projeto tenha os recursos mencionados na seção 4.1, foi planejado um programa que tenha o seguinte funcionamento

1. O PIC lê um arquivo no cartão Micro SD contendo os set-points que serão processados, e os guarda em um lista;
2. O primeiro set-point começa a ser processado, e o sistema injeta corrente na planta para controlar o potencial do eletrodo de referência;
3. O controlador envia mensagens contínuas para os aplicativos de PC/Android com as novas leituras e a evolução do sistema. Além disso, as leituras são gravadas também no cartão SD;
4. Quando o sistema alcança o estado estacionário, o controlador grava no cartão SD a corrente que está passando pelo anodo de platina e começa a processar o próximo set-point da lista;
5. Ao fim do processamento de todos os set-points, o programa escreve no cartão uma tabela listando cada set-point processado e a corrente final lida em seu

estado estacionário;

6. A qualquer momento, o usuário pode, pelo aplicativo, forçar um set-point ou uma saída específica no PWM. Quando isso ocorre, o controlador entra em um modo nomeado DEBUG. Nesse modo, não há gravação de dados no cartão SD e os set-points da lista são ignorados;
7. Quando o aplicativo envia o comando para voltar o controlador ao modo NORMAL, o programa volta a processar o set-point que processava antes de ser interrompido.

Nesse projeto, foi usada a linguagem C e o compilador C18 para fazer o programa do sistema de controle no PIC.

Em geral, programas em PIC rodam em loop, executando repetidamente ações para solucionar os problemas para os quais foi projetado, e as ações mais críticas são executadas durante interrupções, fazendo com que o programa interrompa o que está fazendo para atender ao código da interrupção.

A lógica do programa utilizado nesse projeto foi colocar na interrupção as funcionalidades que precisam ser atendidas imediatamente em um momento específico. No caso, houve 3 condições escolhidas para gerar interrupções:

- Chegada de um byte pela serial - que pode acontecer a qualquer momento que o usuário mandar um comando para o sistema. Esse byte é guardado em um buffer;
- Estouro do timeout de recebimento de dado - o critério para o fim de uma mensagem entre o usuário e o PIC é um tempo de silêncio de mais de 50ms entre o envio de um byte e outro; quando há o timeout, uma flag é setada para avisar ao loop principal do programa que há uma nova mensagem para ser tratada;
- Estouro do timer com o período de 1s - quando esse estouro ocorre, é chamada a função do controle PI, que usa as últimas médias de leituras tiradas dos

conversores A/D para ajustar a saída do PWM e controlar a planta. As médias das leituras usadas são calculadas durante o loop principal do programa sempre que ele estiver ocioso, o que garante que a filtragem por média móvel tenha um N muito grande e tenha maior rejeição a perturbações, como visto na seção 3.5.1. Quando essa interrupção ocorre, as médias tiradas passam a ser os valores globais da leitura de tensão e corrente até o próximo estouro do timer. O mesmo vale para a saída do PWM.

As rotinas principais do programa estão esquematizadas nos fluxogramas da figura 6.1 à figura 6.4.

Programa principal

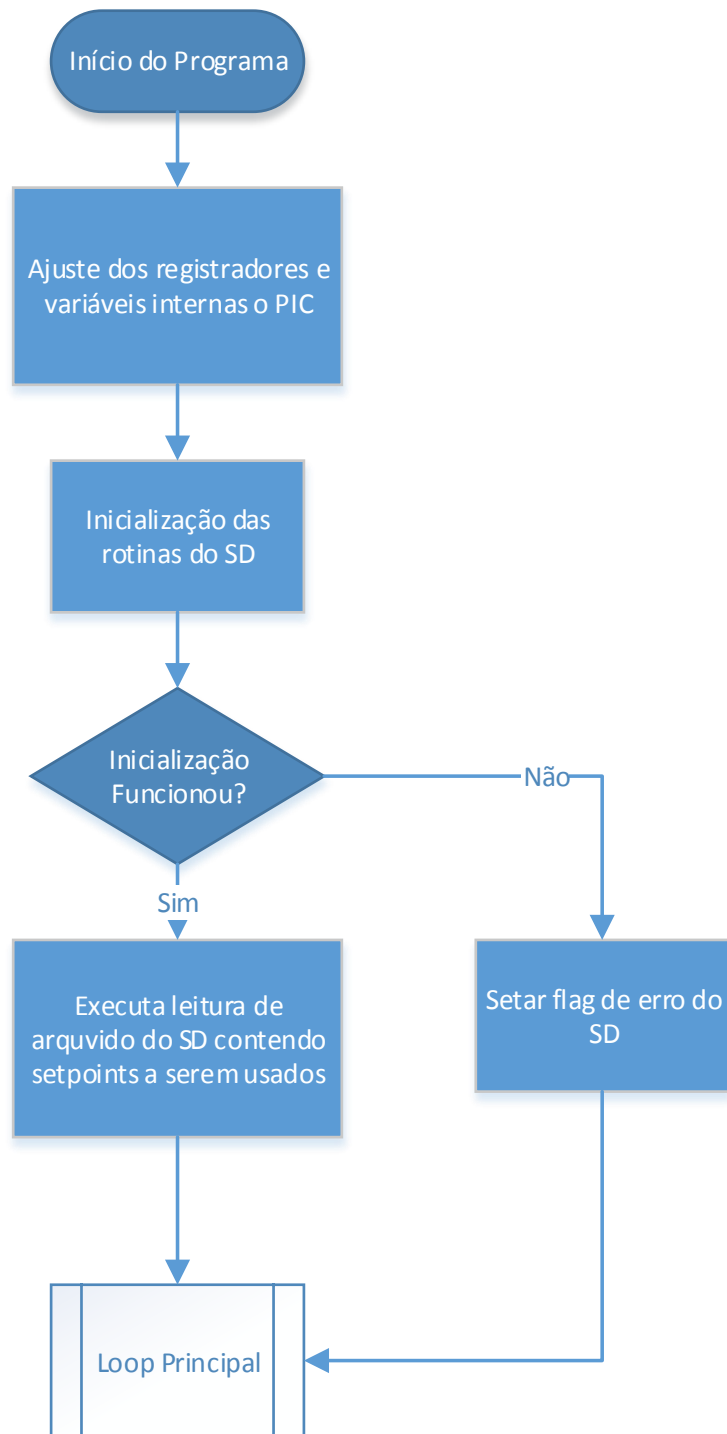


Figura 6.1: Fluxograma do programa principal do PIC

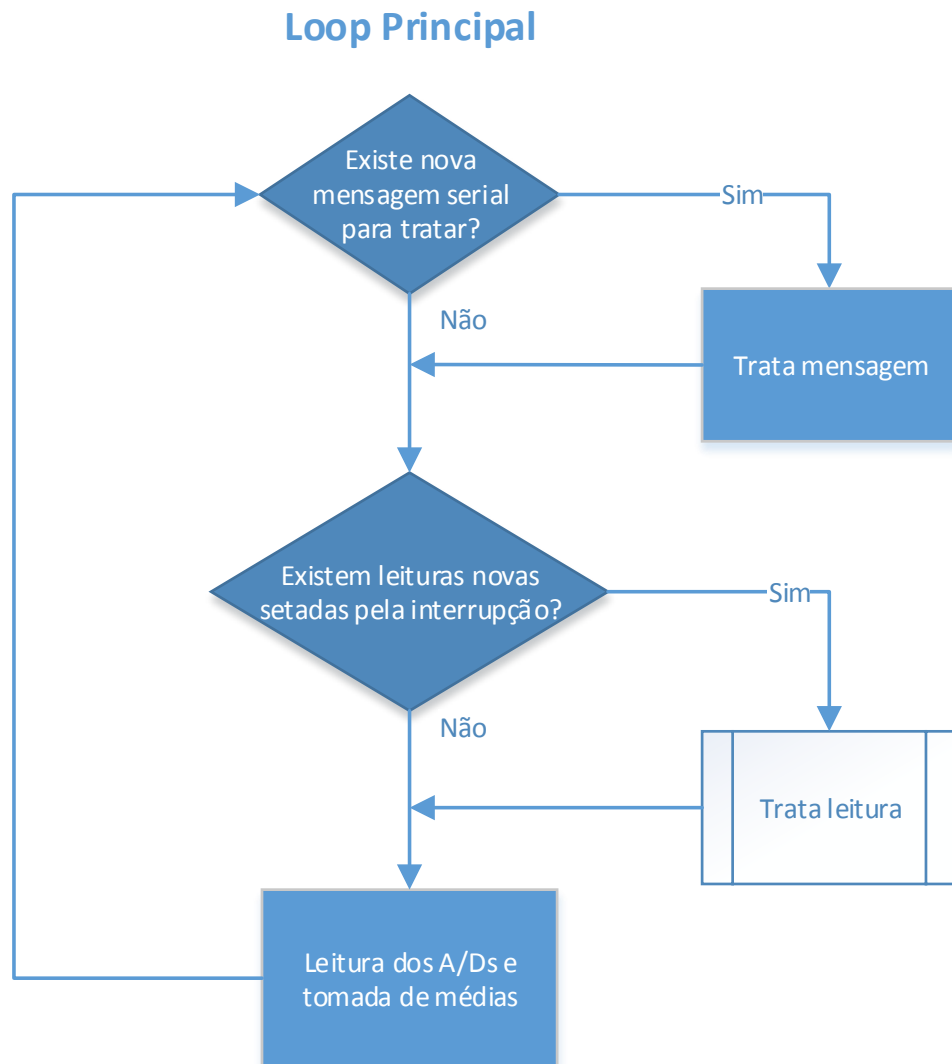


Figura 6.2: Loop principal

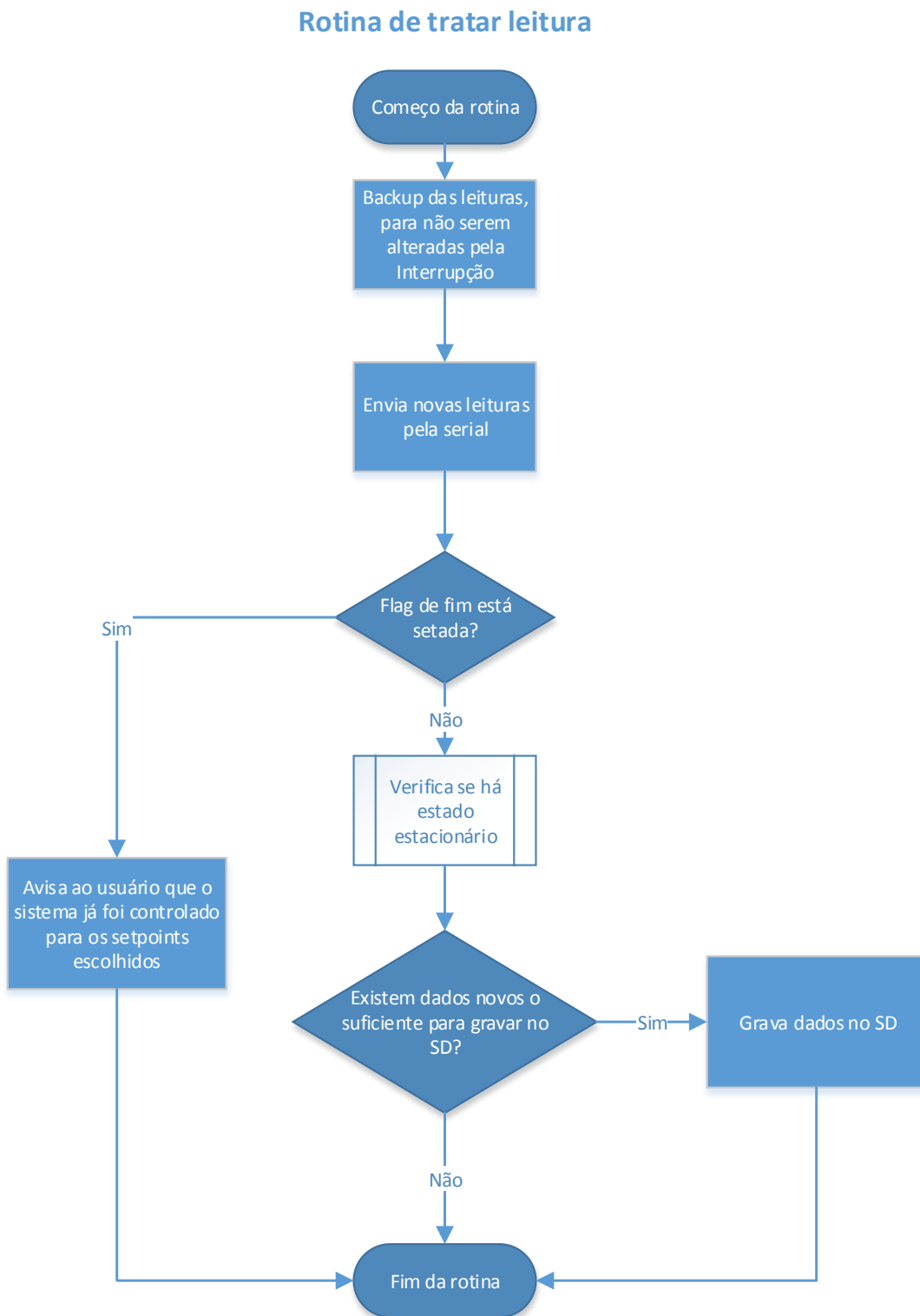


Figura 6.3: Rotina de tratar novas leituras dos A/Ds

Rotina verificar estado estacionário

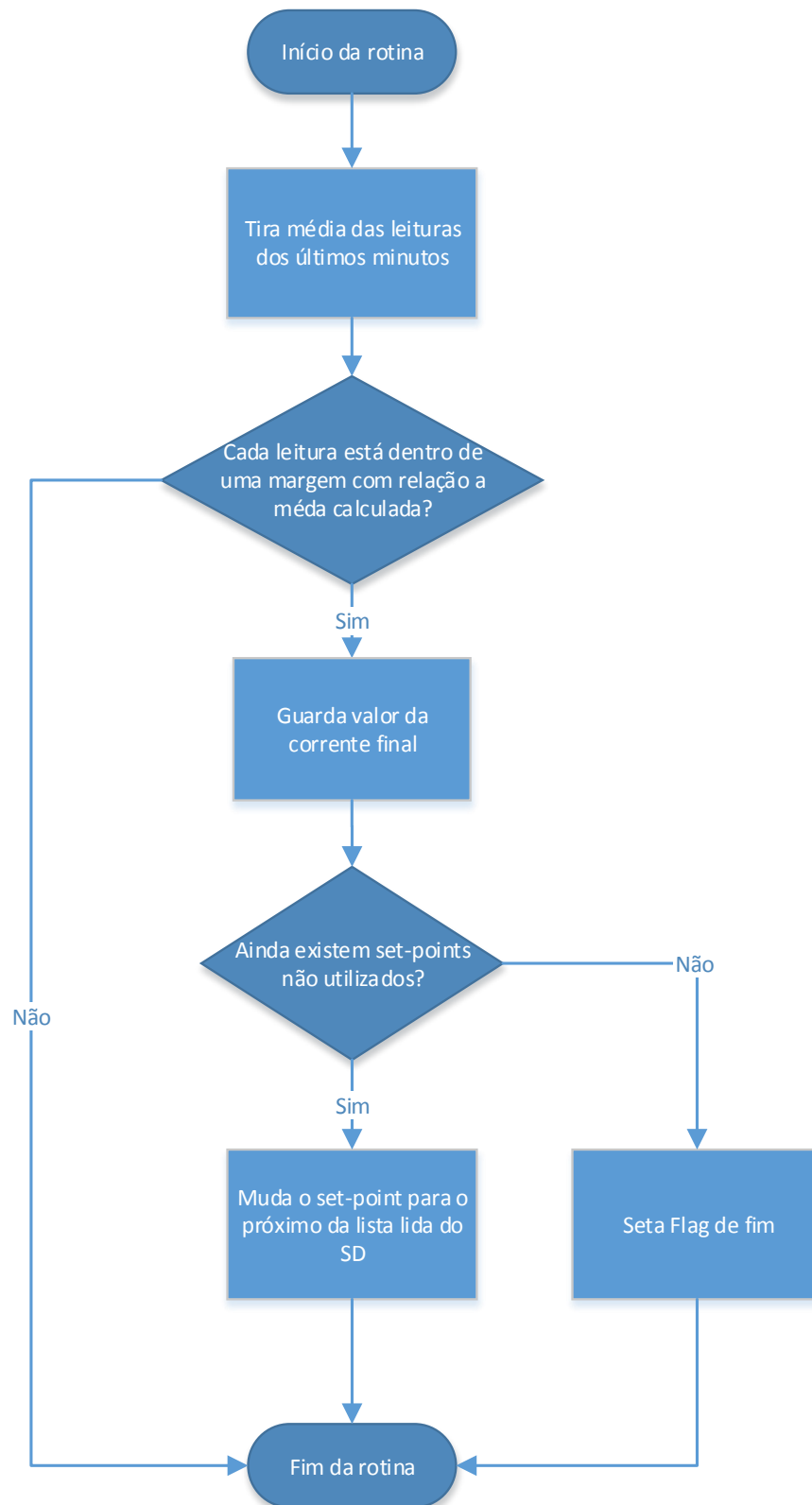


Figura 6.4: Rotina que checa se o sistema está em estado estacionário

6.2 Protocolo de comunicação

Para uma transmissão organizada e confiável das mensagens e comandos entre o PIC e os aplicativos em Android e PC, foi criado um protocolo próprio, baseado no protocolo Modbus [13], porém com algumas diferenças. Suas características são:

- Início e fim de mensagem denotados por timeout de $50ms$. Se o tempo entre o recebimento de um byte e outro ultrapassar esse valor, o dispositivo considera que a mensagem anterior terminou e o novo byte é o começo de uma outra mensagem;
- O primeiro byte da mensagem denota a função dela. Excluindo os dois últimos bytes, o resto da mensagem são parâmetros da função;
- Os dois últimos bytes da mensagem são usados para detecção de erros, essa detecção é feita por um código denominado CRC [13];
- A transmissão de primitivas com mais de um byte — como ints e shorts — é feita no formato Little Endian, ou seja, os bytes LOW são transmitidos antes dos HIGH. O protocolo foi feito dessa forma uma vez que o compilador usado para programar no PIC guarda os bytes dessa forma.

Nas seções seguintes são listadas as funções passadas por esse protocolo.

Dentro das mensagens mostradas da subseção 6.2.1 à subseção 6.2.10, a primeira linha define o tipo e tamanho de cada dado passado na coluna correspondente: um char possui um byte; um short, ou short int, possui 2 bytes; um int, ou long int, possui 4 bytes. Em todos os casos esses tipos de dado são unsigned, isto é, não apresentam bit de sinal. Os sufixos H e L significam os bytes HIGH — mais significativo — e LOW — menos significativo — das variáveis. As tensões lidas são passadas em mV e as correntes em μA .

6.2.1 Função 01 - Informação sobre Set-Points

Função para a passagem de informações de set-points do PIC para os aplicativos. O aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short	
01	CRCL	CRCH

- 01 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Short		Char	Char	N × Short		Short	
01	SPL	SPH	SPNUM	SPI	SPAR[N]L	SPAR[N]H	CRCL	CRCH

- 01 - Número da função utilizada;
- SP - Valor do set-point atual sendo usado pelo PIC;
- SPNUM - Número total de set-points que foram lidos do cartão SD;
- SPI - Índice, dentro do array de set-points, do set-point que está sendo usado no momento;
- SPAR[N] - Elemento de array de tamanho N com os valores de set-points lidos do cartão SD;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.2 Função 02 - Mudança do set-point

Função enviada pelo aplicativo do usuário para forçar um set-point ao sistema. Ao trocar o set-point, o controlador passa a trabalhar em um modo nomeado DEBUG, ignorando os set-points lidos do cartão SD e não gravando nenhum dado no

mesmo. Para que o sistema saia do modo DEBUG, é preciso que o aplicativo envie a função 04 como pedido.

Na função 02, o aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short		Short	
02	NSPL	NSPH	CRCL	CRCH

- 02 - Número da função utilizada;
- NSP - Valor do novo set-point a ser utilizado;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Short		Short		Short	
02	SPRL	SPRH	NSPL	NSPH	CRCL	CRCH

- 02 - Número da função utilizada;
- SPR - Valor do set-point recebido;
- NSP - Novo set-point adotado;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.3 Função 03 - Mudança do valor no PWM

Função enviada pelo aplicativo do usuário para forçar a saída do PWM do controlador em um valor específico. Assim como a função anterior, esta bota o sistema em modo DEBUG.

Nesta função, o aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short		Short	
03	NPWML	NPWMH	CRCL	CRCH

- 03 - Número da função utilizada;
- NSPWM - Valor do novo PWM a ser utilizado;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Short		Short		Short	
03	PWMRL	PWMRH	NPWML	NPWMH	CRCL	CRCH

- 03 - Número da função utilizada;
- PWMR - Valor do PWM recebido;
- NPWM - Novo PWM adotado;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.4 Função 04 - Mudança para modo NORMAL

Função enviada pelo aplicativo para passar o sistema para o modo NORMAL. É a função usada para fazer o sistema sair do modo DEBUG, e voltar a controlar e registrar dados usando os set-points do cartão SD como referência.

Nesta função, o aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short	
04	CRCL	CRCH

- 04 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Char	Short	
04	04	CRCL	CRCH

- 04 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.5 Função 05 - Reset

Função enviada pelo aplicativo para reiniciar o PIC, o que equivale a desligar e ligar sua alimentação.

Nesta função, o aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short	
05	CRCL	CRCH

- 05 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Char	Short	
05	05	CRCL	CRCH

- 05 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.6 Função 06 - Envio das leituras

Função enviada a cada segundo pelo PIC com as novas leituras dos dados medidos e a saída do sistema. Essa função é enviada sem precisar de requisição.

A mensagem tem o formato

Char	Long				Short		Short		Short	
06	ILL	ILH	IHL	IHH	VL	VH	PWML	PWMH	CRCL	CRCH

- 06 - Número da função utilizada;
- I - Leitura da corrente enviada para o anodo de platina;
- V - Leitura da tensão sobre o eletrodo de referência;
- PWM - Valor da saída do PWM;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.7 Função 07 - Mudança de set-point

Função enviada pelo PIC quando um set-point chega ao estado estacionário e o próximo, de dentro do array lido no cartão SD, passa a ser processado. Essa função é enviada sem precisar de requisição.

A mensagem tem o formato

Char	Char	Short		Long				Char	Short	
07	SPI	LSPL	LSPH	IFLL	IFLH	IFHL	IFHH	OK	CRCL	CRCH

- 07 - Número da função utilizada;
- SPI - Índice, dentro do array de set-points, do novo set-point;
- LSP - Valor do último set-point processado;
- IF - Leitura final de corrente no estado estacionário do último set-point processado;
- OK - Flag para indicar se o último set-point processado chegou ao estado estacionário ou se a mudança para o novo ocorreu porque o limite de tempo de processamento dele estorou;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.8 Função 08 - Fim do processamento

Função enviada pelo PIC, sinalizando que todos os set-points lidos do cartão SD já foram processados. Não necessita de requisição do aplicativo.

A mensagem tem o formato

Char	Short	
08	CRCL	CRCH

- 08 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.9 Função 09 - Correntes finais

Função para a passagem de informações sobre as correntes finais, medidas pelo PIC, para os aplicativos. O aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short	
09	CRCL	CRCH

- 09 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Char	Long				N × Long				Short	
09	SPI	OKLL	OKLH	OKHL	OKHH	I[N]LL	I[N]LH	I[N]HL	I[N]HH	CRCL	CRCH

- 09 - Número da função utilizada;
- SPI - Índice, dentro do array de set-points, do set-point sendo processado;
- OK - Long int cujos bits são flags que indicam se os set-points já processados alcançaram estado estacionário. Caso sim, a corrente final é um dado relevante;

- $I[N]$ - Elemento de array de tamanho N com os valores das correntes finais medidas do circuito;
- CRC - Valor do checksum.

6.2.10 Função 10 - Modo de operação

Função para a passagem de informações, para o aplicativo, do modo de operação atual do sistema. Os modos podem ser DEBUG e NORMAL.

Nesta função, o aplicativo faz uma requisição com a mensagem

Char	Short	
10	CRCL	CRCH

- 10 - Número da função utilizada;
- CRC - Valor do checksum.

E a resposta dada pelo micro-controlador é

Char	Char	Char	Short	
10	MOD	DT	CRCL	CRCH

- 10 - Número da função utilizada;
- MOD - Indica se o modo de operação é NORMAL ou DEBUG;
- DT - Indica, caso o modo de operação seja DEBUG, qual é o tipo de parâmetro forçado, como set-point ou PWM;
- CRC - Valor do checksum.

6.3 O aplicativo para Android

O aplicativo de monitoramento do sistema foi feito para Android de forma a se aproveitar de sua capacidade de comunicação Bluetooth e da grande base de usuários que possui.

O código do aplicativo foi feito em Java, utilizando a ferramenta Android Studio.

6.3.1 Funcionamento e Layout

Ao entrar no aplicativo, é requisitado ao usuário que se ligue o Bluetooth para ser possível a comunicação com o controlador. Caso o usuário permita o uso do Bluetooth, a conexão com o controlador será feita automaticamente para dispositivos Android já pareados com ele. Se o controlador não estiver pareado, uma janela de escolha de dispositivo Bluetooth se abrirá, e o dispositivo "Catodica" deve ser escolhido.

A tela inicial do programa pode ser vista na figura 6.5. As três abas no topo dividem fragmentos diferentes do programa:

- Leitura de dados - Nessa aba, é possível ver, em tempo real, as últimas leituras feitas do Sistema. As informações mostradas são Eletrodo (potencial na saída da planta), Controle (saída do PWM), Corrente no anodo e Set-point.
- Tabela de correntes finais - Nessa tabela, vista na figura 6.6 são relacionados os set-points lidos do cartão SD com as correntes de estado estacionário relativas a cada um. O set-point sendo processado fica destacado. Quando o processamento de um dos set-points não alcança estado estacionário antes de um tempo determinado, o controlador muda para o próximo. Os set-points em que isso acontece também ficam destacados na tabela e a corrente final relativa a eles mostra erro.
- Gráfico das leituras - Nessa aba, vista na figura 6.7, é possível acompanhar por um gráfico, em tempo real, a evolução do Eletrodo (potencial na saída da planta), do Controle (saída do PWM) e da Corrente no anodo. É possível mostrar cada um deles junto ou separado dos outros, marcando em checkboxes quais devem ser renderizados.

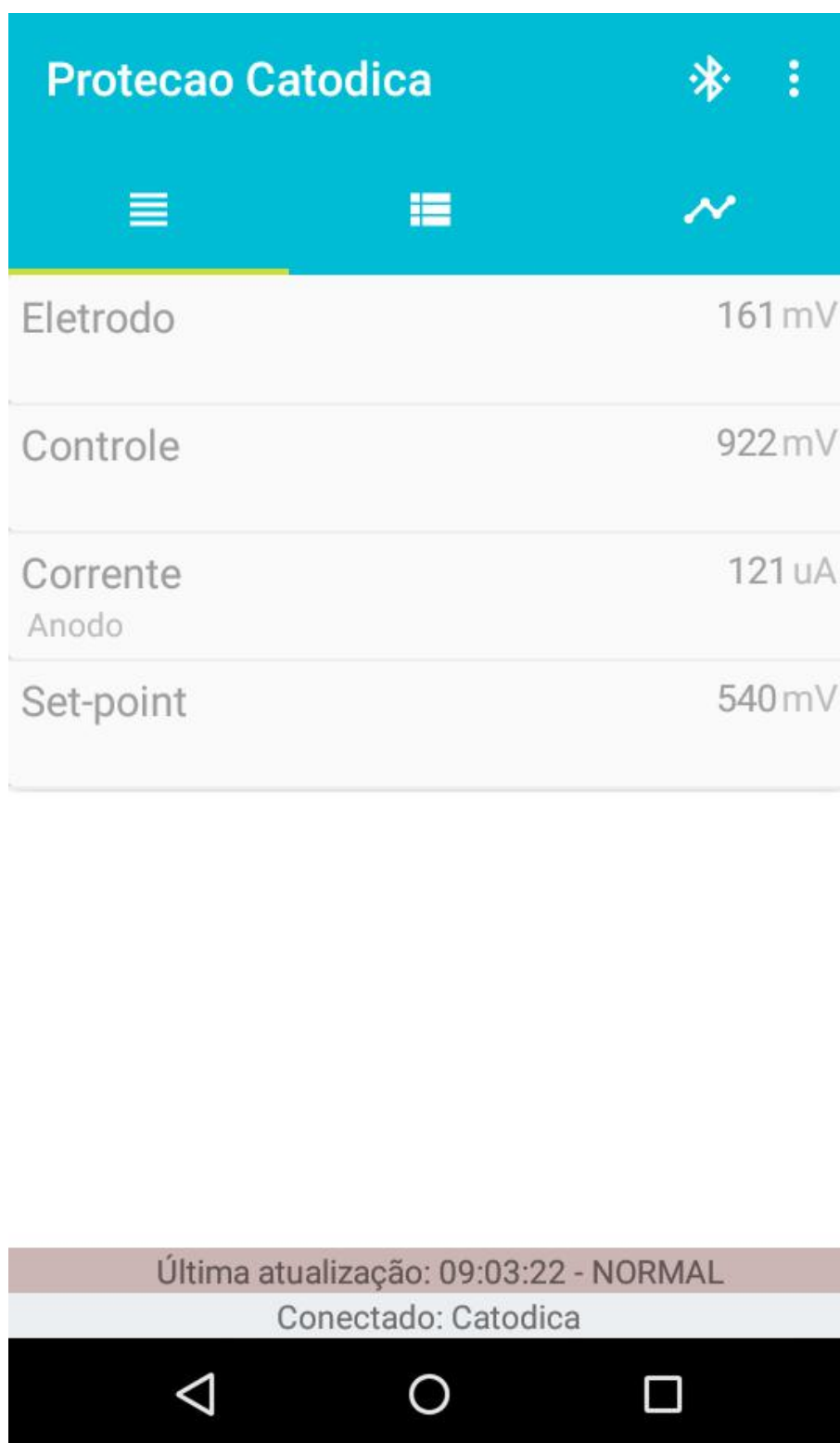
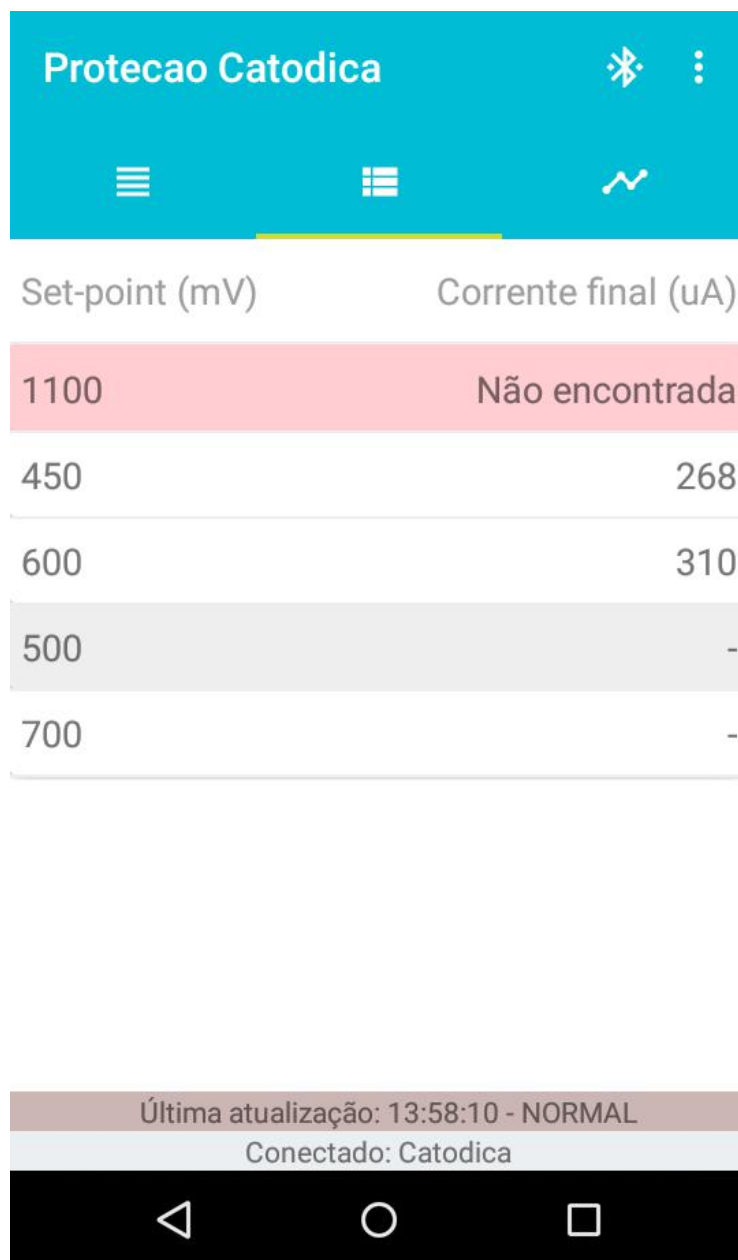


Figura 6.5: Aba de leitura de dados



The screenshot shows the 'Protecao Catodica' application interface. At the top, there is a blue header with the title 'Protecao Catodica' and a Bluetooth icon. Below the header is a navigation bar with three icons: a hamburger menu, a list icon, and a waveform icon. The main content is a table with two columns: 'Set-point (mV)' and 'Corrente final (uA)'. The table has five rows of data. The first row is highlighted in pink and shows '1100' and 'Não encontrada'. The second row shows '450' and '268'. The third row shows '600' and '310'. The fourth row is highlighted in grey and shows '500' and '-'. The fifth row shows '700' and '-'. At the bottom of the screen, there is a status bar with the text 'Última atualização: 13:58:10 - NORMAL' and 'Conectado: Catodica'. The Android navigation bar is visible at the very bottom.

Set-point (mV)	Corrente final (uA)
1100	Não encontrada
450	268
600	310
500	-
700	-

Última atualização: 13:58:10 - NORMAL
Conectado: Catodica

Figura 6.6: Aba da tabela de correntes

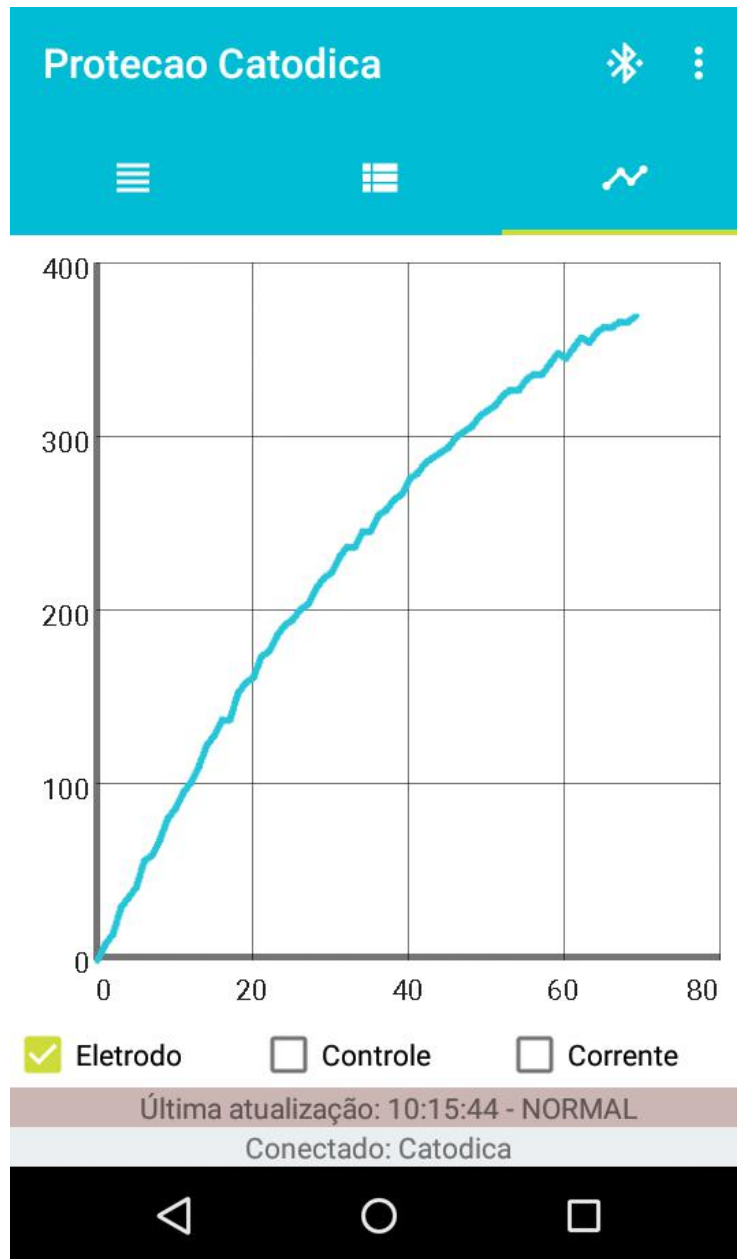


Figura 6.7: Aba do Gráfico das leituras

Em qualquer uma das abas do programa, é possível observar duas barras pequenas na parte inferior da tela, vistas na figura 6.8. São elas

- Barra de Status da Conexão - Informa se o dispositivo Android está conectado, e com qual dispositivo Bluetooth;
- Barra de Funcionamento - Informa o horário da última atualização, e se o sistema está funcionando em modo NORMAL ou DEBUG.

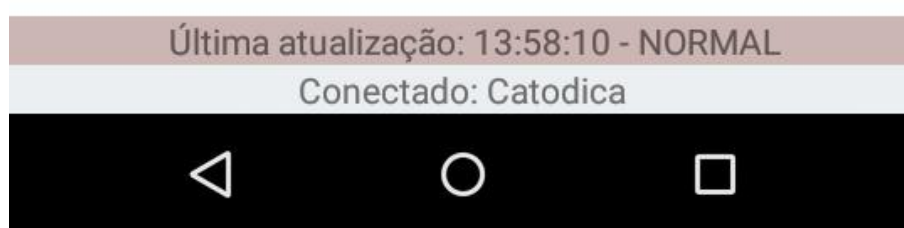


Figura 6.8: Barras de informações

Acima das barras do topo, está o menu de opções, mostrado na figura 6.9.

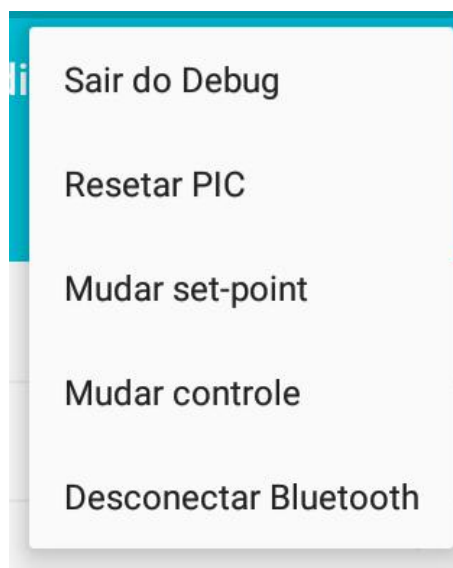


Figura 6.9: Menu do aplicativo

As opções desse menu são:

- Conectar com dispositivo (Logo Bluetooth) - Item do menu para conexão com dispositivo Bluetooth. O ícone se torna branco quando o dispositivo está conectado;
- Sair do Debug - Retorna ao modo NORMAL do programa. Utiliza a função 04, vista na seção 6.2.4;
- Resetar PIC - Reseta o PIC. Utiliza a função 05, vista na seção 6.2.5;
- Mudar set-point - Força o controlador a usar o set-point escolhido pelo usuário. Esse comando coloca o controlador em modo DEBUG, utilizando a função 02, vista na seção 6.2.2;
- Mudar controle - Força uma tensão, escolhida pelo usuário, na saída do PWM do Controlador. Esse comando coloca o controlador em modo DEBUG, utilizando a função 03, vista na seção 6.2.3;
- Desconectar Bluetooth - Encerra conexão, se houver, com o dispositivo Bluetooth.

6.4 Aplicativo para Computadores

Para permitir o uso do sistema de monitoramento em computadores, uma versão do aplicativo foi feita para Windows, utilizando a linguagem C#.

A programação para C# possui algumas semelhanças com a programação para Android usando Java, principalmente por serem ambas linguagens com um nível de abstração maior que o C, e por serem voltada a eventos. Portanto, a lógica interna do código dos dois aplicativos é bem semelhante.

6.4.1 Funcionamento e Layout

Para a conexão do usuário com o dispositivo Bluetooth, é necessário que seu computador tenha suporte a esse tipo de conexão, nativamente ou por meio de

algum periférico. Quando o usuário adiciona o dispositivo Bluetooth "Catodica" usado no projeto, ele é reconhecido pelo windows como uma porta serial COM.

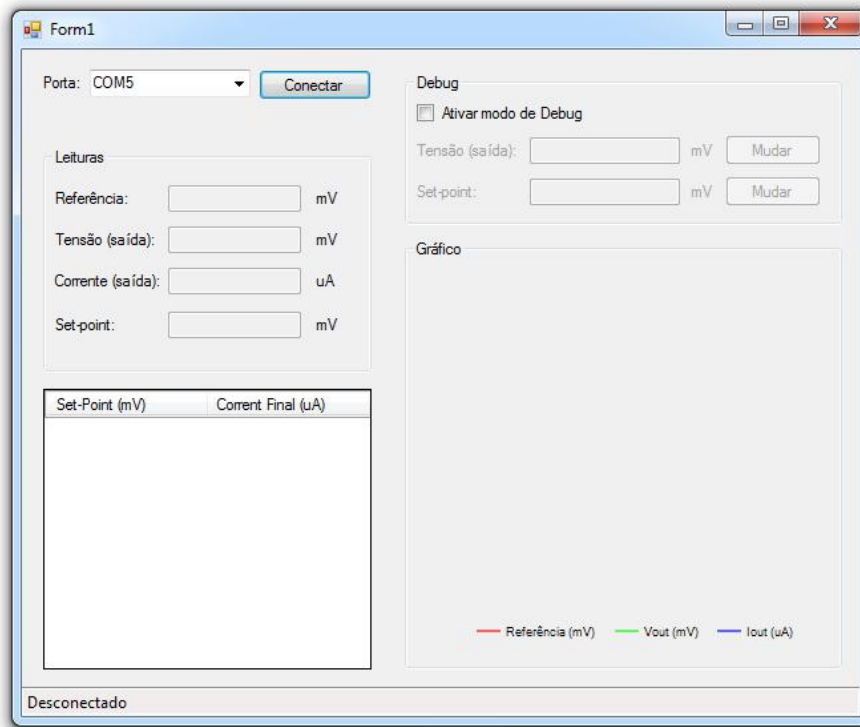


Figura 6.10: Janela do aplicativo para Windows

Na tela do programa, existe a opção de escolher a porta serial ligada ao nosso controlador. A porta escolhida pelo usuário deve ser aquela que o Windows atribuiu ao Bluetooth.

A tela do programa apresenta as mesmas divisões do programa de Android, que foram explicados na seção 6.3.1. A diferença é apenas que para usar as opções do modo DEBUG, é preciso ativar a checkbox da seção Debug. Para sair do modo Debug, basta desativar a checkbox.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

As seguintes metas traçadas na etapa de projeto foram atendidas pelo sistema implementado:

- O sistema montado foi capaz de ler as medidas elétricas do circuito com a planta, e não apresentou grandes variações com ruído para as condições normais de trabalho;
- O Micro-controlador conseguiu se comunicar corretamente com o cartão SD, tendo sido capaz de ler as informações dos set-points dele e gravar nele as leituras do circuito;
- O controlador conseguiu comunicar-se com os aplicativos através do Bluetooth, usando o protocolo criado;
- Os aplicativos para Android e computadores foram capazes de acompanhar em tempo real a evolução do sistema;
- O controlador foi capaz de controlar a tensão sobre o eletrodo de referência na faixa de valores que garantam a proteção da liga metálica utilizada.

Como estudos futuros, ficam as seguintes propostas de melhorias no sistema:

- Mudança da eletrônica do circuito para permitir que a faixa de leitura das

correntes e tensões seja ajustável, assim como a faixa de valores de tensão que o controlador pode colocar sobre uma planta.

- Adição de mais funções no protocolo, que permitam a leitura remota de dados do cartão SD, ajustar tempo de amostragem do circuito, ajustar os parâmetros do controlador etc.

Referências

- [1] BLUETOOTH. *RFCOMM With TS 07.10*, 2006.
- [2] BREBBIA, C.A. NIKUM, S. Applications of boundary elements in corrosion engineering. *Topics in Boundary Element Research* (1990).
- [3] DINIZ, P. N. S. *Digital Signal Processing*, 2nd ed. ed. Cambridge University Press, 2010.
- [4] DUTRA, A. C. NUNES, L. *Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão*. Editora Interciência, 2006.
- [5] FERREIRA, A. Modelagem de sistemas de controle para sistemas de proteção catódica por corrente impressa em embarcações utilizando método de elementos de contorno. *Programa de Educação Continuada - Automação Industrial* (2009).
- [6] FRANKLIN, G.F. POWELL, J. *Sistema de Controle para Engenharia*, 6^a ed. ed. Bookman Editora, 2013.
- [7] GENTIL, V. *Corrosão*, 4^a ed. ed. LTC Editora, 1996.
- [8] HOLEMS, D.G. LIPO, T. *Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practice*, 1st ed. ed. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [9] INSTRUMENTS, T. *LM6132/LM6134 Dual and Quad Low Power 10 MHz Rail-to-Rail I/O Operational Amplifiers*.
- [10] INSTRUMENTS, T. *Microcontroller PWM to 12bit Analog Out*. p.4.

-
- [11] MICROCHIP. *PIC18F2525/2620/4525/4620 DataSheet*. p.229.
- [12] MICROCHIP. *Using PWM to Generate Analog Output*. AN538.
- [13] MODICON. *Modicon Modbus Reference Guide*.
- [14] MOTOROLA. *SPI Block Guide v03.06*, 2000.
- [15] NISE, N. *Control Systems Engineering*, 6th ed. ed. Wiley, 2010.
- [16] REVIE R.W. UHLIG, H. *Corrosion and Corrosion Control*, 4th ed. ed. John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- [17] SACOR, E. *O Conceito de Corrosão*. 2009.
- [18] SCHWEITZER, P. *Corrosion and Corrosion Protection Handbook*, 2nd ed. ed. M. Dekker, Inc., 1989.
- [19] SEDRA, A.S SMITH, K. *Microeletronic Circuits*, 6th ed. ed. Oxford University Press, 2009.
- [20] SMITH, S. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed. ed. California Technical Publishing, 1999.
- [21] VERLE, M. *PIC Microcontrollers – Programming in Assembly*. MikroElektronika, 2008.

Apêndice A

Esquemático do Circuito do Sistema

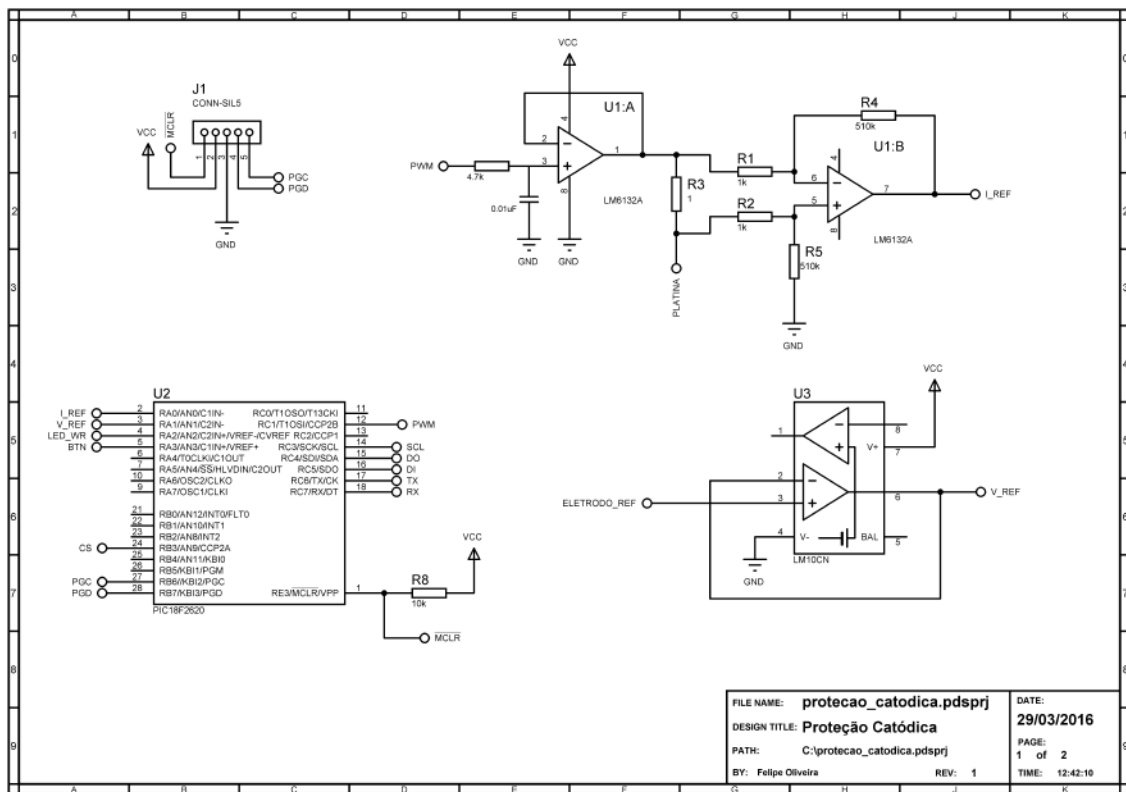


Figura A.1: Esquemático do Circuito do Sistema

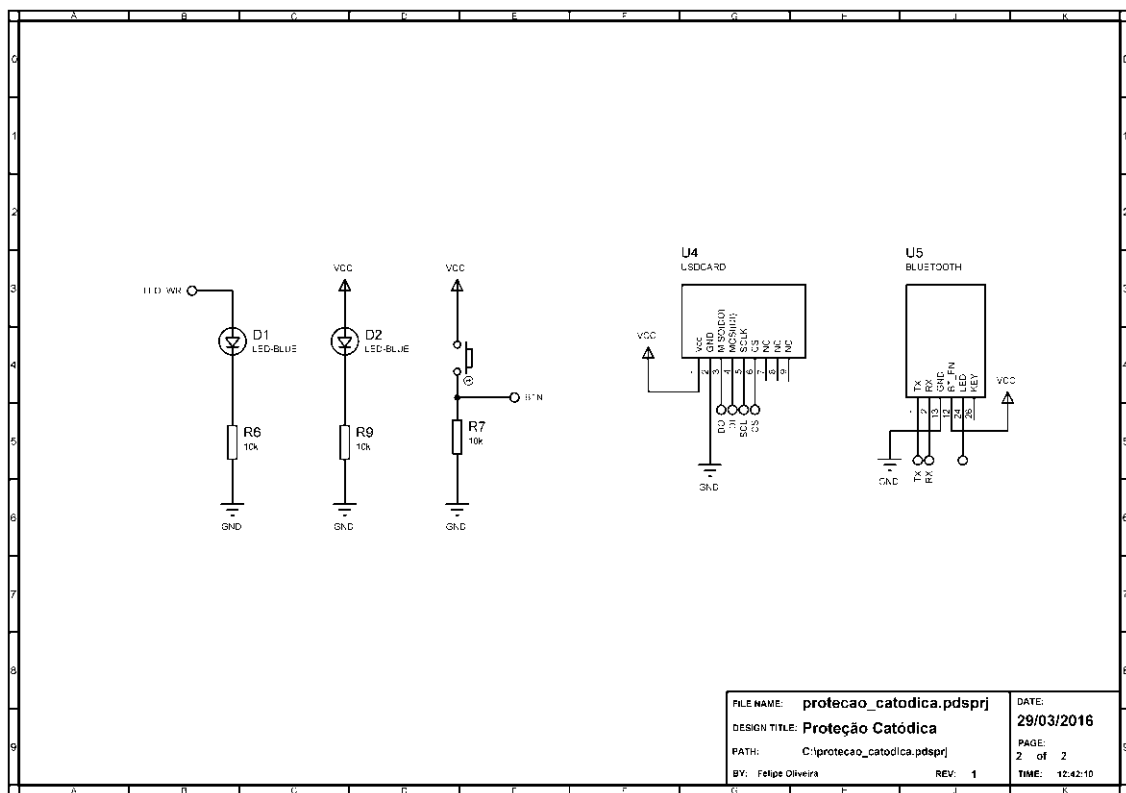


Figura A.2: Esquemático do Circuito do Sistema