

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA ELÉTRICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

VINÍCIUS HENRIQUE DIAS DE PAULA

**DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE VIA MICROCONTROLADOR
DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE NÍVEL E TEMPERATURA E
ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE CONTROLE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

VINÍCIUS HENRIQUE DIAS DE PAULA

**DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE VIA MICROCONTROLADOR
DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE NÍVEL E TEMPERATURA E
ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE CONTROLE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento Acadêmico da Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro em Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Marcos Aguilhari

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius Henrique Dias de Paula

Desenvolvimento de interface via microcontrolador de uma planta industrial de nível e temperatura e análise comparativa de técnicas de controle

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 02/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Carolina Ribeiro Rodrigues - (Membro)

Dedico este trabalho a minha já falecida avó materna D.^a Maria Rita Dias, no qual guardo em meu peito grandes saudades. Mulher simples e humilde que conquistou tudo em sua vida com suor do próprio rosto e além da humildade me repassou valores como fé e compaixão pelo próximo que carregarei para o resto da vida. Talvez a única tristeza neste momento é não ter sua presença ao meu lado!

AGRADECIMENTOS

Apesar de citar alguns nomes nesta parte do trabalho, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma passaram uma mensagem de apoio durante minha graduação, pois o simples "Bom Dia!" dado pela senhora que limpava a calçada todos os dias de manhã na esquina de casa nunca será esquecido, pois servia como inspiração para iniciar um novo dia após uma noite mal dormida devido ao estudos.

Gostaria agora de separar um espaço dos meus agradecimentos para meus familiares, mais uma vez não irei citar todos aqui devido a quantidade de elementos que é composta minha família, mas guardo um enorme carinho pelo meus pais, tios, avós, bisavós, primos, padrinhos Marcos e Neide, ..., pois todos em algum momento desta minha caminhada me deram uma mensagem de apoio.

Em primeiro lugar, devo agradecer meus pais, Nelson e Marisa, pois foram eles que acreditaram e me incentivaram em todos os momentos para que realizasse meu sonho de me tornar Engenheiro. Até um fato curioso que talvez nem todos saibam, foi que quando fui aprovado na Universidade já estava decidido a não realizar minha inscrição, pois não queria de forma alguma me mudar para uma cidade tão distante da minha, porém no dia da matrícula meu pai já estava com as malas prontas e não me deu muitas escolhas. Mas hoje o agradeço profundamente por essa atitude, pois não só voltei com um título, e sim tive um crescimento pessoal que me fez enxergar o mundo com outros olhos.

Também não posso esquecer da minha amiga e irmã preferida, Tainá ou a "Pretinha", neste momento queria dizer que as saudades que tive dela foram muito maiores as brigas que tivemos durante nossa infância, considerando que foram muitas! Agora é ela quem iniciou uma faculdade e esta morando longe e todo o apoio que me deu ofereço em dobro, espero que realize todos os seus sonhos e sempre que precisar poderá contar comigo!

Outra pessoa que não posso deixar de agradecer é minha avó paterna D.^a Marisa José, pois sempre me recebeu com um abraço e um enorme sorriso no rosto quando migrava de volta para casa, além de seus deliciosos almoços que me faziam pensar em desistir do curso e continuar por ali mesmo!

O último familiar que gostaria de citar aqui é meu avô Antônio Dias, vulgarmente conhecido em Minas como "Sontonho" ou "Tonhão", homem sábio e vivido, que certo dia em

que me sentia um pouco cansado devido a longa viagem entre Cornélio e Guaxupé e percebendo talvez meu desânimo, me disse a seguinte frase "Meu filho, você me parece muito entristecido, escute o conselho de seu avô, ontem foi ontem, hoje é hoje e amanhã será outro dia!", assim parei por um instante e analisei profundamente sua frase e conclui que ele estava totalmente correto, porém qual é o conselho de fato nunca saberemos! Enfim as reuniões de família nunca são as mesmas sem sua presença!

Acho importante lembrar de todos os professores e também dos técnicos administrativos da UTFPR, em especial ao pessoal do CIPECA, que me abrigou durante um bom tempo na minha graduação. De tantos nomes que me passam pela cabeça agora, um não posso deixar de citar o Prof^o Cristiano, que além dos conhecimentos repassados em sala de aula e no privilégio de sua orientação, é para mim uma referência tanto no âmbito pessoal quanto profissional, gostaria de agradecer a paciência e o tempo gasto para sanar nossas dúvidas.

Por fim, irei agradecer aos meus amigos, pois foram tantos os momentos divertidos e incríveis que passamos juntos, que a saudade de casa e os problemas enfrentados na Universidade eram praticamente esquecidos e embora seja muito gratificante chegar ao fim desta etapa, saber que nossas vidas tomarão caminhos diferentes será com certeza muito duro.

Para que não haja brigas entre meus colegas irei começar meus agradecimentos por ordem alfabética, assim a primeira a ser lembrada será Amanda Spagolla ou também conhecida por alguns como a "Deusa do Autocad!" Confesso que no começo do curso pensei que não fosse me aproximar da Amanda, uma vez que tenho o estilo mais de garoto de cidade do interior e ela sempre curtiu rock pesado, como por exemplo Fresno e Cine, acabou que se tornou uma das melhores amigas que já tive, enfim agradeço os momentos divertidos que tivemos juntos e principalmente os lanches, que me alegravam nos finais de semana de estudo nas dependências da UTFPR!

Neste parágrafo o agradecimento será duplo, mas isto não significa que a gratidão seja menor, apenas achei injusto separá-los aqui, uma vez que não desgrudavam na faculdade. Queria agradecer ao Marco e ao ThÍago pela ótima companhia nesses últimos anos, já que foram inúmeras gargalhadas ao lado de vocês!

Voltando para a ordem alfabética, gostaria de agradecer ao Pedro pela enorme amizade, prova disso foi que convivemos praticamente durante o curso inteiro como colegas de quarto e não me lembro de nenhuma briga ou discussão, somente me recordo das reflexões sem sentido que tínhamos, que garantia grandes risadas no final do dia! Enfim, assim como disse pessoalmente no dia em que retirei meus pertences da nossa república, o Pedro foi pra mim um grande irmão nesses últimos anos!

Agora chegou o momento de agradecer talvez a pessoa mais popular que já cheguei a conhecer, aquele que tinha entre seus contatos personalidades como Betinha (Rainha Elizabeth), Vlad (Presidente Vladimir Putin), Bill (Ex Presidente William Jefferson Clinton), entre outros. Agradeço ao meu grande amigo Thiago Gabriel de Almeida Honorato Duarte da Silva Pereira Gonçalves ..., por todas as conversas que tivemos, no qual a maioria delas se tornavam piadas! Não me lembro realmente de um momento totalmente sério que passamos juntos, assim o convívio e os trabalhos se tornavam muito mais prazerosos ao lado desse cara! Pessoas como essa nos ajudam a enxergar a vida com mais leveza e bondade! Valew mesmo McLovin!

Uma pessoa que embora não tenha sido colega de faculdade, mas que teve presente em toda minha graduação foi a chatinha da Walquiria, "Wal" ou "Quira", aproveito pra confessar que quando a vi pela primeira vez não imaginei que nossa amizade permaneceria por tanto tempo! Mensagens que recebi dela como "Bom dia!!", "Se cuida viu!!", "Me conta depois!", "Boa sorte!", e mais outras incontáveis, me enchiam de felicidade em dias em que nem tudo corria tão bem, pois acredito que pequenos gestos como estes demonstram um sentimento sincero de preocupação! E devido a isso, é uma pessoa que lembrarei com um enorme carinho para o resto da vida!

Inúmeros nomes me passam pela cabeça neste momento, mas minha criatividade neste momento já se acabou, assim irei agradecer de uma forma geral aos meus amigos Wagner (Sequela), Thainara (Thai), Tayane (Tay), Hellen, Thamiris, Bruna, Bruno (Dominato), Abib, Giovanni, Herman, enfim a toda a primeira turma de Engenharia de Controle e Automação, pois todos fizeram parte de uma etapa muito importante da minha vida, no qual sentirei muitas saudades!

”E mesmo que meus passos sejam em falso, e mesmo que os meus caminhos sejam os errados, e mesmo que meu jeito de levar a vida te incomode.. eu sei quem sou, e sei pelo que devo lutar! Se você acha que meu orgulho é grande, é porque nunca viu o tamanho da minha fé!”(Tião Carreiro)

RESUMO

de Paula, Vinícius. Desenvolvimento de interface via microcontrolador de uma planta industrial de nível e temperatura e análise comparativa de técnicas de controle. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de uma interface entre o software MATLAB/SIMULINK com uma planta didática, para permitir o uso de diferentes técnicas de controle, utilizando estruturas semelhantes mostradas em sala de aula e sem a necessidade do usuário ter um conhecimento avançado no hardware utilizado. Para validação do trabalho proposto, foram implementadas diferentes técnicas de controle utilizando a interface construída, no qual podemos citar os controladores por realimentação de estados, robusto, PID e *Sliding Mode*.

Palavras-chave: MATLAB/SIMULINK, Microcontrolador, Controle Robusto, Realimentação de Estados, PID, *Sliding Mode*

ABSTRACT

de Paula, Vinícius. Interface development via microcontroller of a level and temperature industrial plant and comparative analysis of control techniques. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

In this, the development of an interface between MATLAB/SIMULINK software and a didactic plant is proposed. Such interface allows the implementation of different control techniques, and the user may implement similar structures shown in the classroom without the necessity of having an advanced knowledge in the hardware use. To validate the proposed work, different control techniques were used, using the built interface, in which we can mention the state feedback, robust, PID and Sliding Mode controllers.

Keywords: MATLAB/SIMULINK, Microcontroller, Robust Control, State Feedback, PID, Sliding Mode

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 1 | – Arquitetura Harvard. | 22 |
| FIGURA 2 | – Microcontrolador PIC 18F4550. | 24 |
| FIGURA 3 | – Descrição simplificada de um sistema de controle. | 25 |
| FIGURA 4 | – Diagrama de um sistema em malha aberta. | 26 |
| FIGURA 5 | – Diagrama de um sistema em malha fechada. | 26 |
| FIGURA 6 | – Perturbações em realimentação. | 32 |
| FIGURA 7 | – Diagrama de Bode e a norma H_∞ | 33 |
| FIGURA 8 | – Controle PID de uma planta. | 36 |
| FIGURA 9 | – Diagrama de blocos para controle com realimentação de estados. | 38 |
| FIGURA 10 | – Planta industrial didática construída pela Festo. | 39 |
| FIGURA 11 | – Diagrama resumido com sensores e atuadores da planta didática festo. . | 41 |
| FIGURA 12 | – Fluxograma para a comunicação entre planta didática e computador. ... | 42 |
| FIGURA 13 | – Módulo de condicionamento de sinais reaproveitado. | 43 |
| FIGURA 14 | – Circuito utilizado para condicionar os sinais dos sensores de nível, vazão e pressão. | 44 |
| FIGURA 15 | – Circuito de condicionamento para as bombas e para a resistência. | 46 |
| FIGURA 16 | – Ligação a dois fios que está sendo utilizada para o PT100. | 47 |
| FIGURA 17 | – Amplificador operacional de diferença (SUBTRATOR). | 48 |
| FIGURA 18 | – Amplificador operacional não inversor. | 49 |
| FIGURA 19 | – Amplificador operacional não inversor. | 49 |
| FIGURA 20 | – Placa de condicionamento de sinais. | 50 |
| FIGURA 21 | – Layout da placa desenvolvida para realizar aquisição dos dados. | 51 |
| FIGURA 22 | – Blocos de comunicação entre simulink e microcontrolador. | 52 |
| FIGURA 23 | – Malha de controle de nível de uma planta industrial. | 53 |
| FIGURA 24 | – Comparação entre o fluxo de saída simulado e real. | 55 |
| FIGURA 25 | – Vazão real e aproximada na bomba de acordo com a entrada. | 57 |
| FIGURA 26 | – Malha de nível com entrada $E_{in} = 170$ | 58 |
| FIGURA 27 | – Malha de nível com entrada $E_{in} = 190$ | 58 |
| FIGURA 28 | – Malha de temperatura com entrada $E_{in} = 242$ | 59 |
| FIGURA 29 | – Estrutura de simulação para determinação dos ganhos k_p e k_i | 62 |
| FIGURA 30 | – Estrutura de controle PI para a Planta de nível. | 63 |
| FIGURA 31 | – Estrutura de controle <i>Sliding Mode</i> para a Planta de nível. | 65 |
| FIGURA 32 | – Pontos de linearização para determinação do controlador robusto. | 69 |
| FIGURA 33 | – Estrutura para controle misto para a Planta de nível. | 70 |
| FIGURA 34 | – Estrutura para controle PI da malha de temperatura. | 71 |
| FIGURA 35 | – Estrutura para controle por realimentação de estados da malha de temperatura. | 72 |
| FIGURA 36 | – Interface de manobra. | 73 |
| FIGURA 37 | – Resposta do sistema para controlador PI. | 74 |
| FIGURA 38 | – Sinal de controle para controlador PI. | 75 |
| FIGURA 39 | – Resposta do sistema para controlador Robusto. | 76 |
| FIGURA 40 | – Sinal de controle para controlador Robusto. | 76 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 41 | – Resposta do sistema para controlador <i>Sliding Mode</i> | 77 |
| FIGURA 42 | – Sinal de controle para controlador <i>Sliding Mode</i> | 78 |
| FIGURA 43 | – Resposta do sistema para controlador PI. | 78 |
| FIGURA 44 | – Sinal de controle para controlador PI. | 79 |
| FIGURA 45 | – Resposta do sistema para realimentação de estados. | 80 |
| FIGURA 46 | – Sinal de controle para realimentação de estados. | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| TABELA 1 | – Pinos de controle dos multiplexadores. | 45 |
| TABELA 2 | – Tabela com as relações entre valor de entrada e vazão. | 56 |
| TABELA 3 | – Tabela com os pontos de equilíbrio para o sistema para os fluxo de entrada f_1 e f_2 | 66 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | PROBLEMA DE PESQUISA | 18 |
| 3 | JUSTIFICATIVA | 19 |
| 4 | OBJETIVOS | 21 |
| 4.1 | OBJETIVOS GERAIS | 21 |
| 4.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 5 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 22 |
| 5.1 | MICROCONTROLADOR PIC 18F4550 | 22 |
| 5.2 | SISTEMAS DE CONTROLE | 24 |
| 5.2.1 | Representação no espaço de estados | 26 |
| 5.2.2 | Linearização de Sistemas | 27 |
| 5.3 | REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS | 28 |
| 5.4 | ALGORITMOS GENÉTICOS | 29 |
| 5.5 | CONTROLADORES | 30 |
| 5.5.1 | <i>Sliding Mode Control</i> | 30 |
| 5.5.2 | Controle Robusto | 32 |
| 5.5.2.1 | Síntese do Controlador Robusto | 32 |
| 5.5.3 | Controladores PID | 36 |
| 5.5.4 | Estrutura de Controle para Controlador Robusto e Realimentação de Estados | 37 |
| 6 | DESENVOLVIMENTO | 39 |
| 6.1 | PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA | 39 |
| 6.2 | CONDICIONAMENTO DE SINAIS | 42 |
| 6.2.1 | Sensores | 43 |
| 6.2.2 | Atuadores | 44 |
| 6.2.3 | Sensor de Temperatura | 46 |
| 6.2.4 | <i>Layout</i> da Placa de condicionamento de sinais | 49 |
| 6.2.5 | <i>Layout</i> da Placa para a aquisição dos dados | 50 |
| 6.3 | COMUNICAÇÃO VIA MATLAB/SIMULINK | 52 |
| 7 | IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS | 53 |
| 7.1 | IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE NÍVEL | 53 |
| 7.2 | IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE TEMPERATURA | 58 |
| 8 | CONTROLE E RESULTADOS | 61 |
| 8.1 | CONTROLE MALHA DE NÍVEL | 61 |
| 8.1.1 | Controle PI | 61 |
| 8.1.2 | Controle <i>Sliding Mode</i> | 63 |
| 8.1.3 | Controle Robusto | 65 |
| 8.2 | CONTROLE MALHA DE TEMPERATURA | 70 |
| 8.2.1 | Controle PI | 70 |
| 8.2.2 | Controle por Realimentação de estados | 71 |
| 8.3 | INTERFACE PARA MANOBRA ENTRE AS MALHAS DE CONTROLE | 72 |
| 8.4 | RESULTADOS MALHA DE NÍVEL | 74 |
| 8.5 | RESULTADOS MALHA DE TEMPERATURA | 78 |

| | |
|--|-----------|
| 9 CONCLUSÃO | 82 |
| REFERÊNCIAS | 85 |
| Apêndice A – CÓDIGO PARA CONFIGURAÇÃO DO TOOLBOX DO ALGORITMO GENÉTICO DO MATLAB | 87 |
| Apêndice B – FUNÇÃO OBJETIVO UTILIZADA NO TOOLBOX DO ALGORITMO GENÉTICO NO MATLAB | 88 |
| Apêndice C – FUNÇÃO PARA O ERRO RMS | 89 |
| Apêndice D – SIMULAÇÃO DO CONTROLE <i>SLIDING MODE</i> PARA A PLANTA DE NÍVEL. | 90 |
| Apêndice E – CÓDIGO PARA DETERMINAÇÃO DOS GANHOS K_X E K_Q UTILIZANDO CONTROLE MISTO. | 91 |
| Anexo A – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA VERSUS TEMPERATURA DE UM SENSOR PT100 | 95 |

1 INTRODUÇÃO

O estudo das formas de como os sistemas podem ser representados e o projeto das ações que fazem com que tais sistemas se comportem de maneira pré determinada é conhecido como controle. Por outro lado as formas de implementar fisicamente as ações para tornar um sistema ou processos automáticos, é definido como automação (AGUIRRE et al., 2007). O controle automático tem impulsionado a engenharia e a ciência, tornando-se assim vital para os modernos processos industriais e de produção (OGATA, 2010). Desse modo, não se pode separar o desenvolvimento científico, tecnológico e industrial da área de Controle e Automação (AGUIRRE et al., 2007).

Dentro de um trabalho envolvendo o Controle e Automação, a análise dos sinais e o projeto das ações de controle para um sistema devem ser levadas em consideração, pois estas podem ser implementadas tanto em tempo contínuo quanto em tempo discreto. Dizer que um sistema está sendo controlado a tempo contínuo, significa que os sinais deste sistema estão definidos dentro de uma faixa contínua de tempo, assim, para qualquer ponto dentro da faixa estabelecida, é necessário o valor exato deste sinal naquele instante (AGUIRRE et al., 2007). Controladores implementados desta maneira, como o PID, trabalham muito bem, de forma que estes seguem técnicas de controle já bem estabelecidas dentro da área do controle (DORF; BISHOP, 2013). Contudo, a construção física de tais controladores consiste de circuitos constituídos por componentes eletrônicos, como resistores e amplificadores operacionais. Assim, muitas das vezes os ganhos encontrados para tais controladores são fixos, de maneira que quando se faz necessário a mudanças nos valores dos ganhos implicam em reprojeter o circuito.

Quando a análise dos sinais é feito no meio digital implica em dizer que as entradas e saídas de um sinal estão em tempo discreto (AGUIRRE et al., 2007), ou seja, as grandezas físicas de um sistema são lidas por um hardware em um determinado intervalo de tempo, chamado de período de amostragem, com uma determinada resolução, que é a quantidade de bits com que o valor real é representado no meio digital. Nos últimos anos o uso dos controladores digitais tem aumentado muito, de modo que o controle via computador tem viabilizado avanços na tecnologia como ações inteligentes nos movimentos em robôs industriais, otimização no

consumo de combustível em automóveis, entre outros (OGATA, 1995). Uma das maiores vantagens em sistemas de controle digital é sua flexibilidade, uma vez que as rotinas de controle são feitas via código que podem ser facilmente modificados.

No presente trabalho, são considerados sistemas que emulam o controle de processos, que são aqueles em que uma variável é manipulada com o intuito de se obter a saída desejada para aquele sistema. O controle de processos pode ser ilustrado por um trocador de calor, processo bastante comum dentro da indústria. Neste caso, é desejado que a temperatura de um certo fluido seja mantida em um determinado valor, e uma maneira de realizar este controle é modificar a quantidade de vapor inserida no sistema. A forma de manipular tal grandeza depende da leitura da temperatura do fluido realizada. (SMITH; CORRIPIO, 2012).

Atualmente, a maioria dos controladores para o controle de processos na indústria são baseados no controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), contudo este controle não leva em consideração as não-linearidades que um sistema pode ter (OGATA, 2010). Assim, é interessante considerar o uso de técnicas de controle baseadas em sistemas não lineares ou ainda considerar essas não linearidades como incertezas do sistema e trabalhar então com técnicas de controle robusto.

Muitos pesquisadores de diversas áreas, como robótica, processos de controle, engenharia biomédica, entre outros, têm mostrado um grande interesse no desenvolvimento e aplicação das metodologias dos controladores não lineares. Este interesse pode ser justificado pelo fato de que os métodos de controle lineares funcionam bem apenas para uma pequena faixa de operação em um sistema não linear, de modo que fora dessa faixa a performance do controle pode ser muito ruim ou mesmo instável. Além disso, os controladores não lineares são mais tolerantes quanto a mudanças nos parâmetros do sistema, diferentemente dos lineares que podem levar a instabilidade do sistema quando ocorre uma eventual mudança de algum parâmetro do modelo (SLOTINE, 1991).

O controle robusto também é outra área em constante evolução, no qual vários trabalhos de pesquisa estão sendo desenvolvidos, isso devido ao fato de que uma elevada gama de problemas envolvendo a teoria de controle podem ser resolvidas utilizando desigualdades matriciais, que é a base do desenvolvimento de projetos utilizando controle robusto (BOYD et al., 1994). Tal controle é bastante útil quando um determinado sistema possui em seu modelo incertezas, por exemplo em processos que possuem dinâmica não linear e a análise dessas não linearidades são muito complexas. Neste caso, as metodologias do controle robusto permitem que estas características sejam representadas como erros de modelagem e o sistema como um todo pode ser aproximado por equações lineares. Assim se as desigualdades matriciais encontrarem

um controlador para o problema dado, então o controle será capaz de estabilizar a resposta do sistema até mesmo para as não linearidades que não foram consideradas pela aproximação do modelo linear (GREEN; LIMEBEER, 2012).

Essa crescente procura nas linhas de pesquisa envolvendo as técnicas mencionadas de controle robusto e não-lineares tem como uma justificativa o fato de apresentarem desempenho superior em simulações, porém não são implementadas na prática pela maior dificuldade e complexidade dos controladores em relação ao PID. Por isso a criação de interfaces de controle de mais alto nível é um passo importante para a disseminação destas técnicas em ambientes industriais.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como os ajustes de controladores industriais muitas vezes são feitos em campo, em muitos dos casos são utilizados aqueles que são configurados pela análise da resposta do sistema sem o completo conhecimento prévio de seu modelo matemático.

Contudo, se o modelo matemático do sistema é conhecido, é possível aplicar técnicas de controle que sejam mais apropriadas para aquela malha de controle, de maneira que a resposta do sistema controlado seja satisfatório para uma faixa de operação maior do que um controlador industrial trabalharia, como o PID por exemplo. Para realizar a modelagem de um determinado sistema é interessante que os dados do comportamento de uma planta para diferentes entradas sejam enviados a um computador, pois softwares como o MATLAB facilitam a análise destes dados e são úteis na validação do modelo encontrado.

A comunicação entre sistema físico e computador não é feita diretamente. Os sinais analógicos, como tensão ou corrente, devem ser digitalizados e após esta conversão é necessário que tais valores sejam enviados para o computador por meio de um protocolo de comunicação. Uma alternativa para realizar esta interface entre mundo físico e digital é por meio dos chamados microcontroladores, que em alguns modelos já possuem tanto conversores de analógico para digital, quanto protocolos de comunicação.

Os valores de tensão e corrente dos sensores e atuadores nas malhas de controle de sistemas reais são na maioria das vezes incompatíveis com as entradas e saídas dos microcontroladores, assim estes sinais devem ser condicionados antes de serem lidos e processados.

Feita a modelagem e com a planta conectada ao software MATLAB é possível então testar técnicas de controle e avaliar seus resultados. O MATLAB/SIMULINK é uma ferramenta muito útil para desenvolver tais leis de controle, já que é bastante simples de ser utilizado, de modo que pessoas que desconheçam o funcionamento da planta física, rapidamente se adaptariam e seriam capazes de modificar ou construir novas estruturas de controle.

3 JUSTIFICATIVA

No laboratório 14 do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CI-PECA), encontra-se uma planta industrial desenvolvida pela Festo, cuja suas malhas eram originalmente controladas por um CLP. Esta planta contém quatro malhas de controle: malhas de vazão, nível, temperatura e pressão.

Atualmente, existem trabalhos que permitem a comunicação desta planta com outros dispositivos, como o módulo CompactRio, cujas interfaces demandam um tempo de treinamento razoável para seu aprendizado. Sendo assim, propõe-se neste trabalho a criação de uma interface com o MATLAB/SIMULINK.

Existem no mercado diversas placas de aquisição que realizam a tarefa de transformar sinais elétricos provenientes da malha de controle em dados, enviando estes para o computador por meio de um protocolo de comunicação, contudo estes dispositivos são caros. Logo, o desenvolvimento de uma interface de baixo custo entre a planta e um computador permitiria a construção de novos módulos futuramente. Além de que tal interfaceamento será mais simples, de modo que o tempo de aprendizado para o domínio desta ferramenta, seria muito mais baixa do que para a aprendizagem do funcionamento de um dispositivo como o CompactRio por exemplo, viabilizando assim o estudo de diferentes técnicas de controle em processos industriais, via computador.

Embora existam diversas técnicas de controle já presentes na literatura e outras sendo desenvolvidas, o controle PID ainda é utilizado em mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente e isso se justifica principalmente pelo fato de os ganhos serem ajustados em campo e o PID ter uma resposta satisfatória quando não se conhece bem o modelo do sistema (OGATA, 2010).

Contudo o PID é um tipo de controlador desenvolvido para sistemas lineares e, embora muitos sistemas sejam representados por equações lineares, na maior parte dos casos a relação entre as grandezas do sistema não é exatamente linear (OGATA, 2010). O processo de representar sistemas não lineares de maneira linear é chamado de linearização, e é mostrada mais

detalhadamente na Seção 5.2.2. É interessante mencionar que a linearização é feita sobre um determinado ponto, chamado de ponto de equilíbrio, assim esta representação será próxima ao sistema real somente em uma região próxima a este ponto. Assim, se um controlador linear for projetado para um sistema linearizado, o controle não garantirá os requisitos de projeto para regiões distantes ao ponto de equilíbrio utilizado.

Uma maneira de garantir que o controle considere as não linearidades do sistema é utilizar uma técnica de controle não linear. Neste trabalho é utilizado o *Sliding Mode Control* (SLOTINE, 1991) que, além de apresentar uma resposta satisfatória, é de fácil implementação, podendo ser traduzido em algumas linhas de código em um microcontrolador por exemplo, para sistemas de primeira ordem, no qual alguns processos industriais podem ser enquadrados.

Os controladores industriais atualmente também não levam em conta erros de modelagem ou mesmo parâmetros incertos que podem existir em plantas reais, estas incertezas podem se tratar por exemplo do coeficiente de uma mola que varia de acordo com o tempo. Neste caso será útil outra técnica de controle, chamada de controle robusto, que consiste em computar controladores que garantam a estabilidade do sistema mesmo na presença de incertezas. Neste trabalho a incerteza a ser tratada será a não linearidade da vazão de uma bomba centrífuga, este comportamento será modelado de forma que o controle retorne um ganho de realimentação que garanta a estabilidade do sistema mesmo para diferentes faixas de operação da bomba.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma interface entre uma malha de controle de nível e temperatura de uma planta industrial didática com o software MATLAB/SIMULINK. Também será feita a modelagem de ambas as malhas e, a partir das equações encontradas, serão aplicadas técnicas de controle não linear e robusto com a finalidade de analisar os resultados e verificar a viabilidade de utilizar tais técnicas em processos industriais.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e construir sistemas de condicionamentos de sinais (tensão, corrente).
- Estudar e construir sistemas de aquisição de dados, via microcontrolador.
- Estudar e construir protocolos de comunicação via microcontrolador.
- Desenvolver telas de comunicação via MATLAB/SIMULINK para manobras das válvulas e controle das malhas de uma planta industrial.
- Estudar técnicas de modelagem para malhas de nível e temperatura.
- Encontrar e validar equações diferenciais que representem o comportamento do sistema físico.
- Implementar diferentes técnicas de controle por meio da modelagem dos sistemas.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 MICROCONTROLADOR PIC 18F4550

Microcontroladores são dispositivos que estão presentes em muito equipamentos digitais, tais como celulares, impressoras, entre outros. Isso se dá principalmente devido às suas reduzidas dimensões e por serem providos de muitos periféricos, como diferentes protocolos de comunicação, portas analógicas e digitais, temporizadores, entre outros (MIYADAIRA, 2009).

A constituição de um microcontrolador é dada basicamente por uma Unidade Central de Processamento (CPU), memória (dados e programas) e periféricos. O fluxo de dados entre as memórias com a CPU pode ser feito de acordo com as duas principais arquiteturas existentes para microcontroladores, que são Harvard e Von-Neuman. Na arquitetura Harvard existe um barramento entre a memória de dados e a CPU e outro para a memória de programa, já na arquitetura Von-Neuman somente um barramento de dados realiza a comunicação da memória de dados e programa (MIYADAIRA, 2009). O microcontrolador PIC 18F4550 possui arquitetura do tipo Harvard (MICROCHIP, 2009). A Figura 1 mostra um diagrama resumido de como é feita a transmissão de dados neste dispositivo.

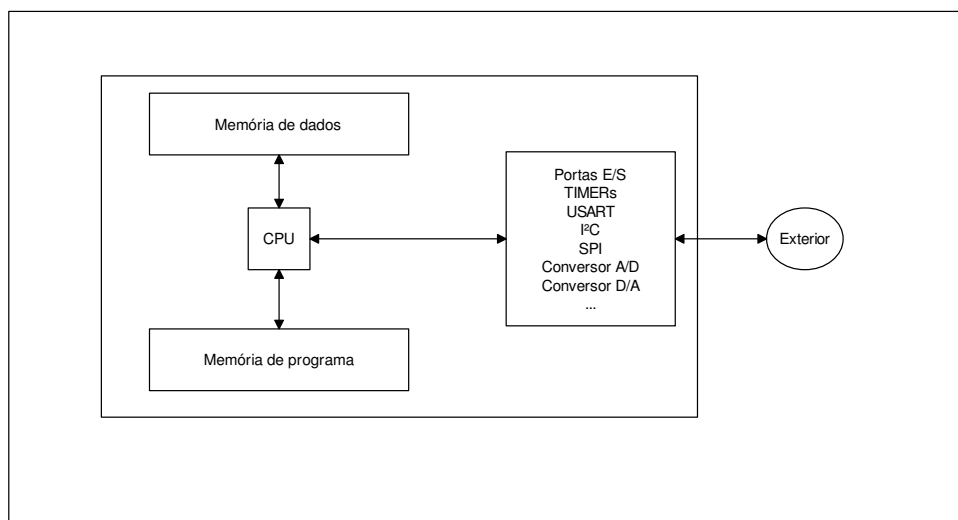


Figura 1: Arquitetura Harvard.
Fonte: Adaptado de (MIYADAIRA, 2009).

O PIC 18F4550 possui 40 pinos e cada um deles pode realizar uma ou mais tarefas, dependendo da configuração e do pino do microcontrolador. Dentre os principais periféricos presentes neste PIC é possível citar:

- 35 portas digitais configuráveis como entrada e saída;
- 13 portas de entradas analógicas;
- 2 pinos com módulo CCP (Capture/Compare/PWM);
 - Capture: Medição de tempo entre eventos;
 - Compare: Comparação entre valores registrados no Timer 1 e registrador CCPR;
 - PWM (Modulação por Largura de Pulso): geração de sinais com frequência variáveis;
- 4 temporizadores;
 - Timer0: Temporizador de 8 ou 16 bits;
 - Timer1: Temporizador de 16 bits;
 - Timer2: Temporizador de 8 bits;
 - Temporizador de 16 bits;
- 20 fontes de interrupção, podendo estar associadas à interrupções externas ou de algum periférico;
- Protocolo de comunicação serial (RS232, I²C, SPI);
- Protocolo de comunicação USB 2.0.

A Figura 2 mostra os pinos do microcontrolador PIC 18F4550 em seu encapsulamento do tipo DIP (*Dual In-line Package*) (SEDRA; SMITH, 2000) e cada pino possui uma breve descrição sobre quais são suas funções.

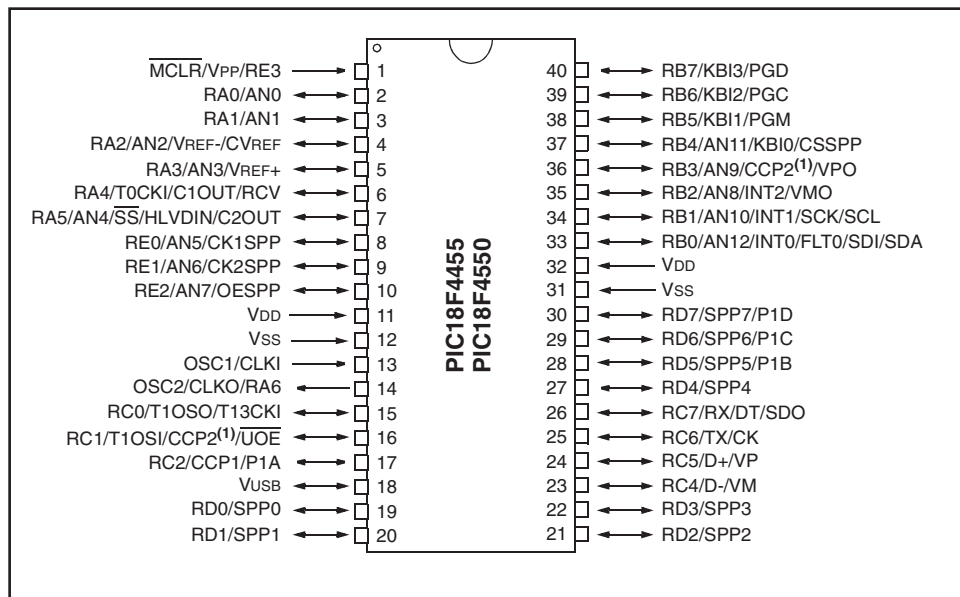


Figura 2: Microcontrolador PIC 18F4550.
Fonte: (MICROCHIP, 2009).

5.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Segundo Ogata (2010), um sistema pode ser considerado como um aglomerado de componentes que trabalham em conjunto com a finalidade de atingir um determinado objetivo. Assim, um sistema pode ser formado por uma planta, que é um equipamento ou alguns componentes de um equipamento, que tem o objetivo de realizar uma determinada operação e esta operação pode ser chamada de processo quando existe um controle atuando sobre ela.

Dessa forma, um sistema de controle consiste de processos e plantas que são projetados com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho esperado, de acordo com uma entrada específica (NISE, 2010).

Em sistemas de controle é interessante que dois termos estejam bem definidos. O primeiro é o de variável controlada, que é a grandeza que é medida e controlada, e a outra é o sinal de controle ou variável manipulada, que consiste na grandeza que é modificada pelo controlador de maneira que afete o valor da variável controlada. Geralmente a saída do sistema é o valor da variável controlada (OGATA, 2010). A Figura 3 mostra uma simplificação de um sistema de controle.

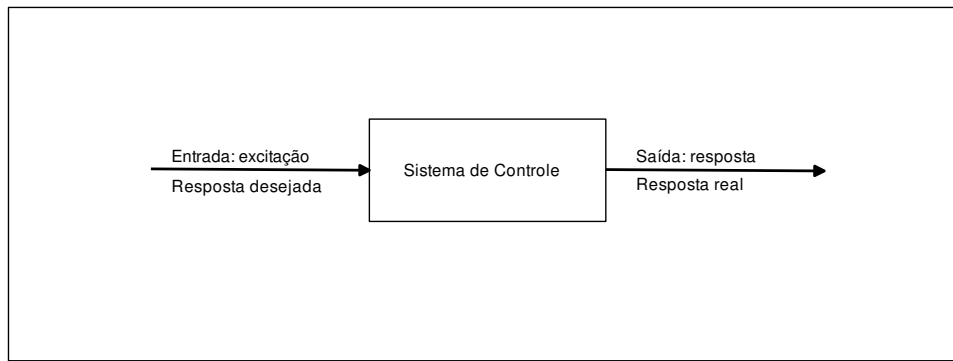


Figura 3: Descrição simplificada de um sistema de controle.

Fonte: Adaptado de (NISE, 2010).

Existem diversos tipos de sistemas de controle, dentro deles é possível citar alguns que são bastante comuns, como por exemplo os sistemas considerados neste trabalho:

- **Sistema de Controle de Temperatura:** Neste sistema a variável controlada é a temperatura, e a variável manipulada é a quantidade de calor introduzida no sistema que é feito por meio de uma fonte de calor, como uma resistência elétrica.
- **Sistema de Controle de Nível:** Neste sistema a variável controlada é o valor da altura do nível em um reservatório, e o sinal de controle é feito sobre o fluxo de entrada do fluido contido no reservatório.

Os sistemas de controle possuem duas principais configurações, sendo o primeiro conhecido como sistema de controle de malha aberta. Segundo Ogata (2010), nestes tipos de malha o sinal de saída não interfere no controle do sistema, ou seja, a grandeza da variável controlada não está sendo medida e nem comparada com o sinal de entrada. Um exemplo deste tipo de configuração é a máquina de lavar roupas, no qual os processos de lavagem são todos feitos com base em um tempo pré-programado e em nenhum momento a saída, que seria o quão bem lavada a roupa está, é medida. Em alguns casos o sistema em malha aberta não é recomendado, pois ele não é capaz de realizar compensações quando perturbações são inseridas no sistema. Um outro exemplo que demonstra esta característica é a torradeira elétrica, cujo processo também é baseado em intervalos de tempo já pré-definidos, assim o sistema não consegue realizar correções quando por exemplo diferentes tipos de pães são adicionados a máquina, de forma que o resultado nem sempre é o esperado (NISE, 2010). A Figura 4 mostra o diagrama de um sistema em malha aberta.

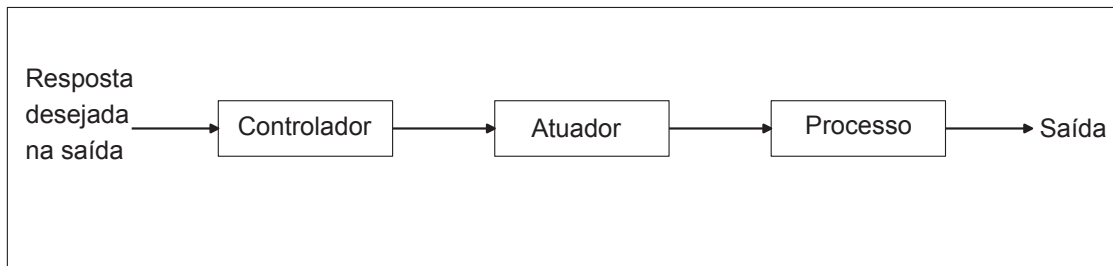


Figura 4: Diagrama de um sistema em malha aberta.

Fonte: Adaptado de (DORF; BISHOP, 2013).

A outra configuração para sistemas é denominada sistema de controle de malha fechada, neste caso existe um sinal de erro, que é dado pela diferença entre o sinal de entrada e o de realimentação. Esta realimentação pode ser a própria saída ou alguma função associada a ela, como suas derivadas e/ou integrais. O sinal de erro é responsável por realimentar o controlador, que por sua vez tentará reduzir o erro e ajustar a saída para o valor de saída desejado (OGATA, 2010). A Figura 5 mostra um diagrama de um sistema em malha fechada.

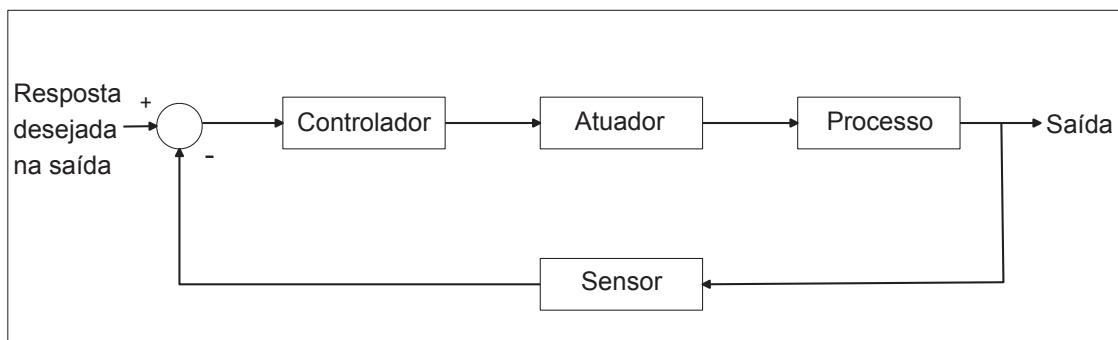


Figura 5: Diagrama de um sistema em malha fechada.

Fonte: Adaptado de (DORF; BISHOP, 2013).

5.2.1 REPRESENTAÇÃO NO ESPAÇO DE ESTADOS

Sistemas lineares podem ser representados de diferentes maneiras, seja por meio de equações diferenciais, função de transferência, espaço de estados, entre outros.

A representação no espaço de estados levam em consideração as variáveis de estado, que em um sistema dinâmico são aquelas que constituem o menor conjunto de variáveis, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, necessário para determinar completamente o estado do sistema, dada uma entrada para qualquer instante $t \geq t_0$ (OGATA, 2010), sendo n a ordem do sistema.

As equações no espaço de estados envolvem três tipos de variáveis, que são as de entrada, saída e as de estado. A representação por meio destas equações não é única, contudo o

número de variáveis de estado não muda em qualquer que seja a representação (OGATA, 2010). Assim um sistema pode ser representado pelas Equações (1) e (2),

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \mathbf{C}(t)x(t) + \mathbf{D}(t)u(t) \quad (2)$$

sendo $\mathbf{A}(t)$ definida como matriz de estado, $\mathbf{B}(t)$, como matriz de entrada, $\mathbf{C}(t)$, como matriz de saída, $\mathbf{D}(t)$, como transmissão direta, $u(t)$, como a entrada de controle, e $y(t)$ a saída medida.

5.2.2 LINEARIZAÇÃO DE SISTEMAS

Na Seção 5.5 são apresentadas as técnicas de controle utilizadas neste trabalho, dentre elas apenas o *Sliding Mode Control* é baseado em sistemas não lineares, assim para utilizar as demais técnicas em sistemas com dinâmicas não lineares, se faz necessária obter uma representação linearizada de tal sistema.

Considere então que $y(t) = L\{u(t)\}$, sendo L . um operador que representa a dinâmica do sistema. Um sistema é dito não linear quando não atende o Princípio da Superposição (AGUIRRE et al., 2007), no qual diz que, dado uma entrada do tipo $u(t) = \alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t)$, a igualdade

$$L\{\alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t)\} = \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t) \quad (3)$$

tem de ser válida para todo $t \in \mathbb{R}$ e quaisquer que sejam os escalares α_1 e α_2 . Simplificadamente um sistema é dito linear quando a combinação linear de duas entradas e a combinação das saídas resultantes com a aplicação isolada de cada entrada, resultam no mesmo comportamento.

Assim, quando o sistema não é linear, uma maneira de analisar seu comportamento dentro de uma determinada faixa de operação é conhecida como linearização (SLOTINE, 1991). Para obter a representação linearizada do sistema é necessário obter quais são seus pontos de equilíbrio. Um ponto de equilíbrio é definido pela Equação (4).

$$x = x_{eq} \Leftrightarrow \dot{x}_{eq} = 0 \quad (4)$$

Considerando então um sistema não linear com uma entrada de controle $u(t)$ definido como

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (5)$$

considerando que $f(x, u)$ é diferenciável em todo estado de tempo e ainda que $f(x_{eq}, u_{eq}) = 0$,

é possível escrever

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_{eq}, u=u_{eq}} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_{eq}, u=u_{eq}} \quad (7)$$

sendo que \mathbf{A} é a matriz jacobiana de f em relação a x e \mathbf{B} a matriz jacobiana em relação a u para $(x = x_{eq}, u = u_{eq})$ (SLOTINE, 1991).

Feita a linearização o sistema pode ser reescrito da forma apresentada na Equação (1). Contudo nesta representação o comportamento do sistema real será próximo ao sistema linearizado apenas para pontos próximos aos pontos de equilíbrio.

5.3 REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS

Considere um sistema do tipo mostrado pela Equação (1). Se o sistema for estabilizável (BONATTI et al., 2013), existirá um ganho de realimentação de estados K , tal que $u(t) = Kx(t)$ estabilize o sistema. A aplicação de $u(t)$ em (1) resulta em

$$\dot{x}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK})x(t) \quad (8)$$

Existem diferentes técnicas para encontrar este ganho de realimentação K , como a fórmula de Ackermann e por meio de matrizes de transformação (OGATA, 2010).

Uma maneira de determinar um ganho de realimentação é baseada no teorema de Lyapunov (BONATTI et al., 2013). Para tanto, seja o sistema linear e invariante no tempo dado por

$$\dot{x} = \mathbf{A}x \quad (9)$$

sendo $x \in \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$. A estabilidade assintótica do sistema será garantida se houver uma matriz simétrica P tal que

$$\mathbf{P} > 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{A}'\mathbf{P} + \mathbf{PA} < 0 \quad (11)$$

Para que as condições de análise (10) e (11) se transformem em condições de síntese, é necessário substituir na LMI (Desigualdade Matricial Linear) (11) \mathbf{A} por $(\mathbf{A} + \mathbf{BK})$. Assim, o teorema de Lyapunov pode ser reescrito pelas LMIs (12) e (13).

$$\mathbf{P} > 0 \quad (12)$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{BK})'\mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} + \mathbf{BK}) < 0 \quad (13)$$

Fazendo algumas manipulações matemáticas na desigualdade (13)

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}' + \mathbf{P}^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{B}' + \mathbf{A}\mathbf{P}^{-1} + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{P}^{-1} < 0 \quad (14)$$

e renomeando $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{W}$ e $\mathbf{Z} = \mathbf{K}\mathbf{W}$, tem-se

$$\mathbf{W}\mathbf{A}' + \mathbf{Z}'\mathbf{B}' + \mathbf{A}\mathbf{W} + \mathbf{B}\mathbf{Z} < 0 \quad (15)$$

Assim, se existirem matrizes $\mathbf{W} = \mathbf{W}' > 0$ e \mathbf{Z} que satisfaçam (15), o ganho $\mathbf{K} = \mathbf{Z}\mathbf{W}^{-1}$ é um ganho estabilizante de realimentação de estados.

5.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

Existem técnicas clássicas para determinação de ganhos de controladores PID, como por exemplo os métodos de Cohen e Coon e Ziegler e Nichols (OGATA, 2010). Porém, uma técnica que tem atraído pesquisas de diversas áreas são os chamados Algoritmos Genéticos (AG), que são métodos de busca inspirados nos mecanismos de evolução de seres vivos. Basicamente o que ele faz é introduzir ao sistema várias soluções e utiliza das informações obtidas para obter soluções cada vez melhores (LINDEN, 2008). Neste trabalho sua função é averiguar diferentes valores de ganhos para um dado controlador e verificar dentre os valores testados quais obtiveram as melhores respostas, de acordo com uma função de avaliação definida pelo projetista.

Em outras palavras, populações de indivíduos são criados e submetidos a operadores genéticos pelos algoritmos genéticos. Estes operadores são a seleção, cruzamento e mutação, responsáveis por gerar um processo de evolução natural que criará indivíduos que caracterizem uma boa solução para o problema e a função objetivo fica encarregada de avaliar a qualidade de cada indivíduo como solução podendo até encontrar a melhor possível (LINDEN, 2008).

Em um primeiro momento é criada uma população inicial com n indivíduos, que se encaixam como possíveis soluções para o problema, além de que estes indivíduos devem ser criados de forma aleatória para que exista uma boa distribuição das soluções no espaço de busca. Tal espaço em geral é definido por meio de um limite inferior e superior (HAUPT, 2004).

A avaliação dos indivíduos é feita por meio de um função objetivo que deve ser escolhida de tal forma a levar em consideração todo o conhecimento que se possui sobre o problema, de maneira a alcançar a resolução do problema. (HAUPT, 2004).

Para gerar novos indivíduos são realizados cruzamentos, no qual são escolhidos os melhores para serem os pais, contudo é interessante manter mesmo que em menor quantidade indivíduos que não apresentem bons resultados, pois assim como acontece na natureza estes são importantes para gerarem novas populações diferentes (HAUPT, 2004).

O último operador a ser aplicado é a mutação, que após gerado os filhos, introduz informações nos indivíduos que talvez não fossem repassadas apenas com o cruzamento. Tal operador é importante para que soluções ainda melhores sejam encontradas (HAUPT, 2004).

Por fim o algoritmo será finalizado quando atingir um número máximo de iterações ou quando as soluções convergirem para um ponto no qual não se alteram mais (HAUPT, 2004).

5.5 CONTROLADORES

Existem diferentes técnicas para se projetar um controlador, dentre elas é possível citar o método do lugar geométrico das raízes, método da resposta em frequência, sistemas de controle robusto, controle não-linear, entre outros. Este trabalho envolve algumas dessas técnicas, que são o controle robusto, controle *Sliding Mode*, PID sintonizado via algoritmo genético e realimentação de estados sintonizado via algoritmo genético. Essa escolha foi feita devido ao fato de que as plantas consideradas neste trabalho possuem características não-lineares, justificando o uso das técnicas não-lineares e robusto. O controlador PID foi também escolhido por ser o controlador mais utilizado atualmente na indústria. Por fim, será também implementada a técnica de realimentação de estados com ganhos sintonizados via algoritmo genético.

5.5.1 *SLIDING MODE CONTROL*

O *Sliding Mode Control* (controle a modos deslizantes) é uma técnica razoavelmente simples utilizada em sistemas não-lineares. Entre suas vantagens pode ser mencionada a praticidade com que esta ferramenta pode ser utilizada em problemas reais, de uma forma um tanto quanto robusta (KHALIL, 2002).

Nessa técnica de controle as trajetórias do sistema são forçadas a convergirem para uma superfície deslizante em um tempo finito. Uma vez na superfície, o controle garante que as trajetórias convirjam para o ponto de equilíbrio (KHALIL, 2002). Para que isso ocorra, a superfície $s(t)$ deve ser um conjunto positivamente invariante, conforme definido a seguir

Definição 1 *Conjunto Invariante*

Um conjunto M é invariante se,

$$x(0) \in M \Rightarrow x(t) \in M, \forall t \in \mathbb{R}.$$

Ou seja, M é um conjunto invariante se, e somente se, toda trajetória que começa em M permanece em M para todo $t \in \mathbb{R}$.

Definição 2 *Conjunto Positivamente Invariante*

Um conjunto M é positivamente invariante se, e somente se

$$x(0) \in M \Rightarrow x(t) \in M, \forall t \geq 0.$$

Ou seja, M é um conjunto positivamente invariante se toda trajetória que começa em M permanece em M para todo $t \geq 0$.

Segundo Slotine (1991), a superfície deslizante $s(t)$ pode ser definida no espaço de estados \mathbb{R}^n por meio de uma equação escalar $s(t)$, em que

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (16)$$

sendo que λ é definido por uma constante estritamente positiva, n é a ordem do sistema e a parcela $e(t)$ representa o monitoramento do erro, dado por

$$e(t) = y(t) - r(t) \quad (17)$$

sendo $y(t)$ a saída e $r(t)$ o sinal de referência do sistema.

Este é um trabalho feito sobre sistemas de primeira ordem, logo considerando este tipo de sistema a Equação (16) é simplificada para a Equação (18).

$$s(t) = e(t) = y(t) - r(t) \quad (18)$$

Assim, para um sistema não-linear com uma equação diferencial estável, a superfície $s(t)$ irá convergir para a origem quando t tender ao infinito, fazendo com que a saída siga a referência. Todas as trajetórias do sistema devem convergir para a superfície e nela permanecerem para todo tempo futuro, sendo que $s(t)$ é uma função indicadora, de modo que quando $s(t) = 0$ a trajetória está sobre a superfície.

5.5.2 CONTROLE ROBUSTO

Por meio de técnicas de controle convencionais, como o método do lugar geométrico das raízes, PID entre outros, é possível projetar controladores que atendam especificações como tempo de assentamento, máxima porcentagem de *overshoot* e erro em regime permanente. Porém, tais técnicas podem não apresentar resultados satisfatórios quando não se tem conhecimento preciso do sistema, assim, o Controle Robusto busca atender essa necessidade, de maneira que tal controlador busca encontrar uma lei de controle que garanta a estabilidade do sistema, mesmo para estas incertezas no modelo.

5.5.2.1 SÍNTESE DO CONTROLADOR ROBUSTO

As técnicas de controle robusto consistem em descrever as incertezas do sistema como perturbações que atuam em realimentação sobre os sistemas de controle, e em seguida garantir a estabilidade do sistema mesmo com a presença de incertezas. Dessa forma, os sistemas que antes eram caracterizados por uma função de transferência $H(s)$, agora são descritos como sistemas perturbados, no qual as incertezas são modeladas como $\Delta(s)$ (AGUIRRE et al., 2007). O diagrama de blocos da Figura 6 ilustra como é modelado um sistema perturbado.

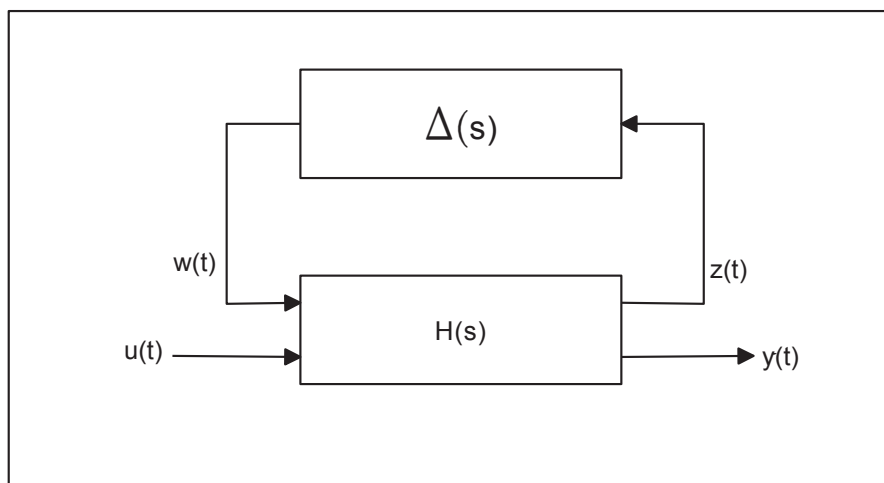


Figura 6: Perturbações em realimentação.
Fonte: Adaptado de (AGUIRRE et al., 2007).

A representação em espaço de estados para o sistema perturbado se diferencia um pouco do modelo convencional apresentado em (1) e (2), pois agora o comportamento incerto do sistema deve ser levado em consideração, assim uma melhor representação para este sistema

é dado por (19), (20) e (21).

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{B}_1(t)w(t) \quad (19)$$

$$y(t) = \mathbf{C}(t)x(t) + \mathbf{D}(t)u(t) + \mathbf{D}_1(t)w(t) \quad (20)$$

$$z(t) = \mathbf{C}_z(t)x(t) + \mathbf{D}_{zw}(t)w(t) + \mathbf{D}_{zu}(t)u(t) \quad (21)$$

Sendo $z(t)$ a saída controlada do sistema e $w(t)$ a entrada exógena relacionada as incertezas do modelo (AGULHARI, 2013).

Nesta abordagem existem dois controles bastante difundidos na literatura que regem a determinação da lei de controle para o sistema, eles são baseados nas normas H_∞ e H_2

Norma 1 (H_∞) A norma H_∞ de um sistema estável com entrada e saídas unitárias é o maior fator de amplificação possível da resposta em estado permanente à excitação senoidal, (OGATA, 2010).

Considere então um sistema dado por $H(s)$. Sua norma H_∞ , $\|H\|_\infty$, resulta no valor máximo de $|H(j\omega)|$. A Figura 7 ilustra qual seria a norma H_∞ para $H(s)$.

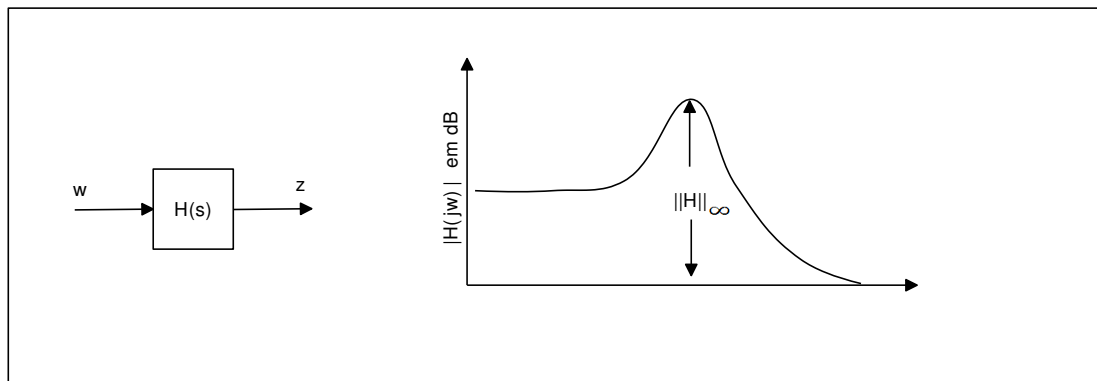


Figura 7: Diagrama de Bode e a norma H_∞ .

Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010).

Assim, no sistema da Figura 6, quando $H(s)$ tiver norma $H_\infty = \gamma$ e for internamente estável, o sistema perturbado permanecerá estável se a norma H_∞ de $\Delta(s)$ for menor do que $1/\gamma$, tal afirmação é definida pelo teorema do pequeno ganho.

Teorema 1 (Pequeno ganho) *Suponha que $H(s)$ seja um sistema internamente estável e seja $H(s)$ a função de transferência entre a entrada $w(t)$ e a saída $z(t)$. Então, o sistema perturbado é internamente estável para todo $\Delta(s)$ que satisfaça uma entre as condições (22) e (23):*

$$\|\Delta(s)\|_\infty \leq \frac{1}{\gamma} \text{ se, e somente se, } \|H(s)\|_\infty < \gamma \quad (22)$$

$$\|\Delta(s)\|_\infty < \frac{1}{\gamma} \text{ se, e somente se, } \|H(s)\|_\infty \leq \gamma \quad (23)$$

Por meio do Teorema 1 é interessante destacar que quando encontra-se o menor valor de γ , ou seja, quando γ é minimizado, é possível descobrir qual é o maior valor da norma H_∞ que as incertezas $\Delta(s)$ podem assumir sem prejudicar a estabilidade do sistema.

Com a necessidade de uma síntese de modelagem de sistemas que englobasse as incertezas do sistema, foi desenvolvido o controle H_∞ , cujo princípio básico é determinar um controlador que garanta a estabilidade mesmo quando os parâmetros incertos atingem o maior valor da sua norma H_∞ , ou seja o pior cenário que as incertezas podem atingir (GREEN; LIME-BEER, 2012). Dentre as características do H_∞ é possível destacar algumas.

- Capacidade de eliminar os erros na modelagem da planta e distúrbios desconhecidos.
- Representa uma extensão natural para a existência da teoria de realimentação.
- Apresenta uma otimização significativa.
- É capaz de resolver problemas multivariáveis.

Um ganho de realimentação que estabilize o sistema existirá quando houver matrizes $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}'_i > 0$, \mathbf{G} , \mathbf{Z} e \mathbf{H}_i e um escalar ξ_i que satisfaça a LMI (24), deste modo $K_{H_\infty} = \mathbf{Z}\mathbf{G}^{-1}$ (BOYD et al., 1994).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{G} + \mathbf{G}'\mathbf{A}' + \mathbf{B}\mathbf{Z} + \mathbf{Z}'\mathbf{B}' & * & * & * \\ \mathbf{P}_i - \mathbf{G} + \xi_i(\mathbf{A}\mathbf{G} + \mathbf{B}\mathbf{Z})' & -\xi_i(\mathbf{G} + \mathbf{G}') & * & * \\ \mathbf{C}_{zi}\mathbf{G} + \mathbf{D}_{zui}\mathbf{Z} & \xi_i(\mathbf{C}_{zi}\mathbf{G} + \mathbf{D}_{zui}\mathbf{Z}) & -\mu\mathbf{I}_i & * \\ -\mathbf{H}'_i\mathbf{B}'_i & 0 & -\mathbf{H}'_i\mathbf{D}'_{zwi} & \mathbf{I}_i + \mathbf{H}_i + \mathbf{H}'_i \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

Na LMI descrita por (24) as matrizes \mathbf{C}_{zi} , \mathbf{D}_{zui} e \mathbf{D}_{zwi} são equivalentes as matrizes \mathbf{C}_z , \mathbf{D}_{zu} e \mathbf{D}_{zw} mostradas na Equação (21), mas considerando a norma H_∞ .

É importante ressaltar que o escalar μ definido em (24) representa o valor de γ^2 , este artifício é utilizado para que se possa minimizar o valor de $\gamma = \sqrt{\mu}$, assim quando este valor é minimizado e existir um ganho K , tal controlador irá garantir a estabilidade para a maior norma H_∞ das incertezas do sistema.

Já o controle H_2 é utilizado quando deseja-se levar em consideração a energia média de um sistema, assim quando encontrado um ganho de realimentação que minimize esta norma, significa que o esforço de controle também é diminuído.

Norma 2 (H_2) A norma de um sistema estritamente próprio, ou seja, quando $\mathbf{D}_{zw} = 0$, denotado como $\|H(s)\|_2$ é definida em sistemas SISO como:

$$\|H(s)\|_2^2 = \int_0^\infty |h(t)|^2 dt \quad (25)$$

Um ganho de realimentação, $K_{H_2} = \mathbf{ZG}^{-1}$ que minimize a norma H_2 e garanta a estabilidade do sistema, será encontrado quando existirem matrizes $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}'_2 > 0$, $\mathbf{X} = \mathbf{X}'$, \mathbf{G} , \mathbf{Z} e \mathbf{H}_2 e um escalar ξ_2 que satisfaça as condições (26) e (27), além de minimizar o traço de \mathbf{X} , que é o limitante superior da norma H_2 (BOYD et al., 1994).

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{X} & \mathbf{C}_{z2}\mathbf{G} + \mathbf{D}_{zu2}\mathbf{Z} \\ * & \mathbf{P}_2 - \mathbf{G} - \mathbf{G}' \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{AG} + \mathbf{BZ} + \mathbf{G}'\mathbf{A}' + \mathbf{Z}'\mathbf{B}' & \mathbf{P}_2 - \mathbf{G}' + \xi_2(\mathbf{AG} + \mathbf{BZ}) & \mathbf{B}_2\mathbf{H}_2 \\ * & -\xi_2(-\mathbf{G} - \mathbf{G}') & 0 \\ * & * & \mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 - \mathbf{H}'_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (27)$$

As matrizes \mathbf{C}_{z2} e \mathbf{D}_{zu2} estão relacionadas com o desempenho do controle, sendo a matriz \mathbf{C}_{z2} relacionada com o tempo de assentamento das variáveis de estado do sistema controlado e a matriz \mathbf{D}_{zu2} relacionada com a prioridade da energia de controle. Sendo que estas matrizes são equivalentes as matrizes \mathbf{C}_z e \mathbf{D}_{zu} mostradas em (21), porém neste caso modeladas considerando a norma H_2 .

Também existe uma vertente conhecida como controle misto H_2/H_∞ , este controle tem a vantagem de ter como característica tanto a otimização do desempenho do sistema, quanto garantir a robustez (AGUIRRE et al., 2007).

Sendo assim somente existirá o ganho de realimentação, $K = \mathbf{ZG}^{-1}$ quando existirem matrizes $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}'_i > 0$, $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}'_2 > 0$, $\mathbf{X} = \mathbf{X}'$, \mathbf{G} , \mathbf{Z} , \mathbf{H}_i e \mathbf{H}_2 e escalares ξ_2 e ξ_i que satisfaçam as condições 24, 26 e 27, ou seja, impostas pelo controle H-inf e pelo controle H2.

No controle misto é importante dizer que é minimizado apenas o traço de X de modo que é atribuído um valor constante a γ , garantindo assim um ganho estável para a norma H_∞ relacionada a este γ .

5.5.3 CONTROLADORES PID

Ainda hoje, com o grande avanço tecnológico e a quantidade de técnicas para controladores em expansão, que inclusive foram consideradas algumas delas neste trabalho, os controladores que mais são utilizados na indústria é o PID, chegando a representar até metade dos casos (OGATA, 2010). Tal característica pode ser justificada pelo fato de que este controlador possui um bom desempenho à maioria dos sistemas de controle e sua simplicidade de aplicação, devido ao fato de que não é necessário conhecer o modelo matemático da planta para determinar os ganhos para o controlador (DORF; BISHOP, 2013).

Este controlador conta com três ganhos, sendo eles: o ganho proporcional, o ganho integrativo e o ganho derivativo, dados respectivamente como, K_p , K_i e K_d . A função de transferência que representa este controlador é dada pela Equação (28) (DORF; BISHOP, 2013).

$$G_{pid}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (28)$$

A Figura 8 mostra como o controle PID é aplicado em uma planta. Quando o modelo matemático do sistema é conhecido, é possível aplicar técnicas para determinação dos ganhos do controlador que irão modificar as especificações do regime transitório e do regime permanente de malha fechada. Contudo, quando a obtenção deste modelo é um processo muito complexo, é possível utilizar abordagens analíticas para determinação dos parâmetros. Entre os métodos de sintonia mais utilizados para tal, pode-se citar a técnica de Ziegler e Nichols para sintonia de controladores PID que é muito difundido na literatura clássica para determinação dos ganhos do controlador (OGATA, 2010).

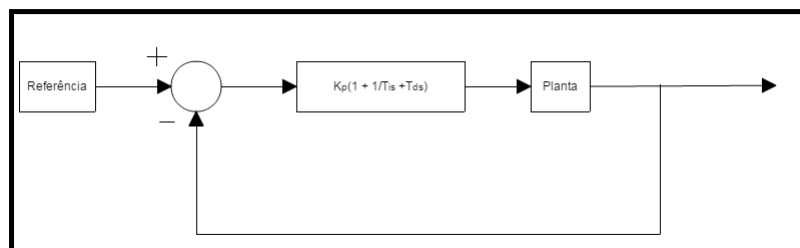


Figura 8: Controle PID de uma planta.
Fonte: Adaptado de (OGATA, 2010).

Neste trabalho a sintonia dos controladores PID foi realizada utilizando o Algoritmo Genético, devido a este motivo a metodologia das técnicas clássicas para obtenção dos parâmetros do controlador PID não serão apresentados neste tópico.

5.5.4 ESTRUTURA DE CONTROLE PARA CONTROLADOR ROBUSTO E REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS

A síntese para determinação do controlador utilizando a teoria do controle robusto consiste de uma etapa complexa, uma vez que é necessário desenvolver algoritmos que em conjunto com *solvers* matemáticos encontrem ganhos que satisfaçam as condições mostradas na seção 5.5.2.1. Contudo a estrutura para o controle para o Controlador Robusto é a mesma utilizada na Realimentação de Estados, se mostrando então bastante simples e fácil de ser aplicado em sistemas reais.

Considerando um sistema descrito pela Equação (1) e um ganho de realimentação K , tal que $u(t) = Kx(t)$, de modo que o sistema possa ser reescrito conforme a Equação (8). Sendo $K = [K_x \ K_q]$, no qual K_x é um ganho de realimentação proporcional e K_q um termo integrativo adicionado para fazer com que a saída do sistema estabilize em um determinado sinal de referência. Deste modo $u(t) = [K_x \ K_q]x(t)$, o que gera um sistema aumentado descrito pelas Equações (29) e (30).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_x & \mathbf{K}_q \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{q}(t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{q}(t) \end{bmatrix} \quad (30)$$

As Equações (29) e (30) podem ser representadas por meio de diagrama de blocos, como mostrado pela Figura 9. Como sistemas reais estão sujeitos a saturações, foi adicionado na estrutura de controle um bloco *anti-windup*, este tratamento consiste em subtrair o sinal de controle $u(t)$ pelo sinal de controle saturado $u_{sat}(t)$ e esta diferença é ponderada por um ganho E e o resultado é subtraído da diferença entre a referência $r(t)$ e a saída do sistema $y(t)$.

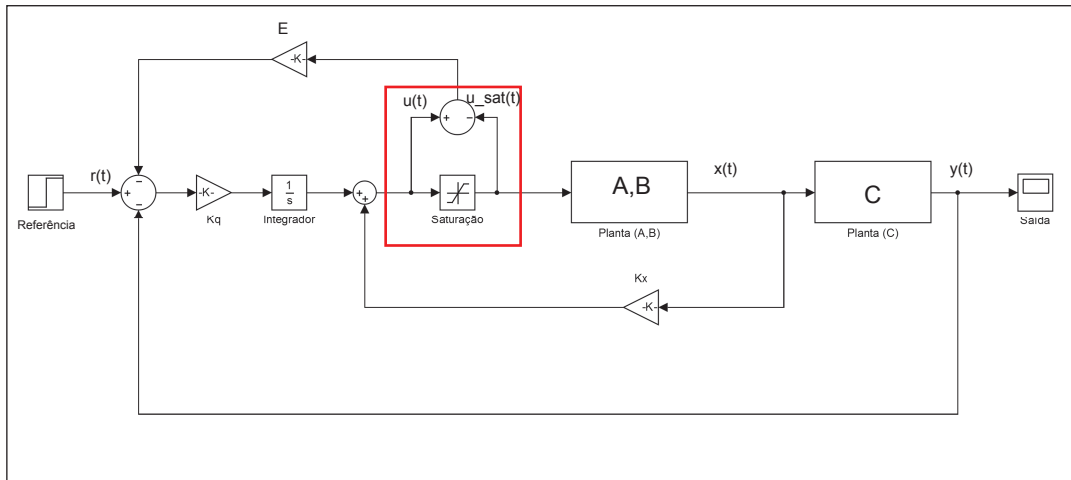


Figura 9: Diagrama de blocos para controle com realimentação de estados.
Fonte: Autoria própria.

6 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, é apresentada a metodologia a ser seguida no trabalho que consiste resumidamente em mostrar quais são as malhas de controle de uma planta industrial didática e por quais componentes, sensores e atuadores, esta é formada. Também, será explanada a maneira como foi feito o condicionamento dos sinais para serem compatíveis com o microcontrolador utilizado, apresentando como é feita a leitura pelos sensores e as placas de circuito impresso desenvolvidas ao longo do trabalho.

6.1 PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA

A planta industrial didática utilizada neste trabalho é constituída por quatro malhas de controle: Temperatura, Pressão, Nível e Vazão. Cada uma das malhas possui uma bomba centrífuga, um reservatório de 300 mm de altura e duas válvulas solenóide que controlam o fluxo de entrada e saída do fluido de sua respectiva malha. A Figura 10 mostra a planta industrial.

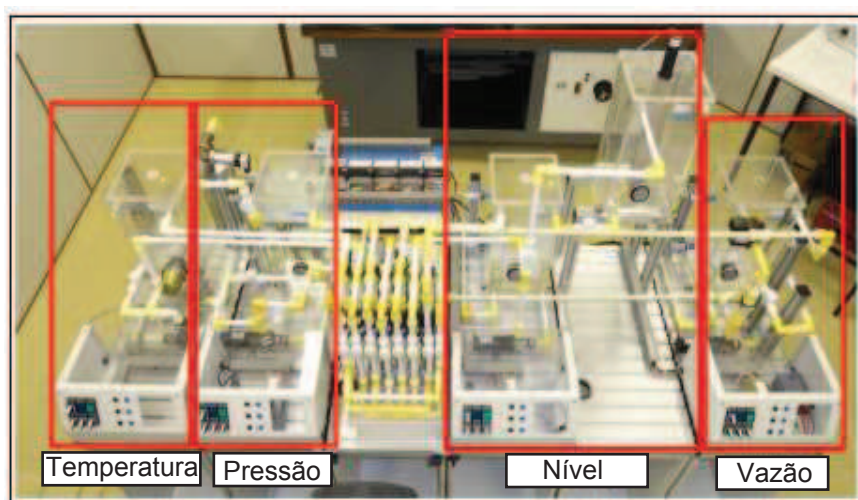


Figura 10: Planta industrial didática construída pela Festo.
Fonte: (ALMEIDA, 2012).

Cada malha da planta possui também outros componentes que devem ser levados em consideração, relatados a seguir (ALMEIDA, 2012).

Malha de Temperatura

- Resistência de Aquecimento, 1000W, com entrada de 0 a 10 VDC;
- Sensor de Temperatura do tipo PT 100.

Malha de Pressão

- Sensor de Pressão piezoelétrico de 0 a 100 mbar, com saída de 0 a 10 VDC.

Malha de Nível

- Sensor de Nível ultrassônico de 50 a 270 mm com saída de 0 a 10 VDC.

Malha de Vazão

- Válvula proporcional, com entrada de 0 a 10 VDC, 8W;
- Sensor de Vazão de 0,5 a 15 l/min, infravermelho, saída de 0 a 10 VDC.

A Figura 11 é um esquemático resumido de como é o funcionamento da planta industrial e mostra quais são os atuadores e sensores de cada malha considerados neste trabalho.

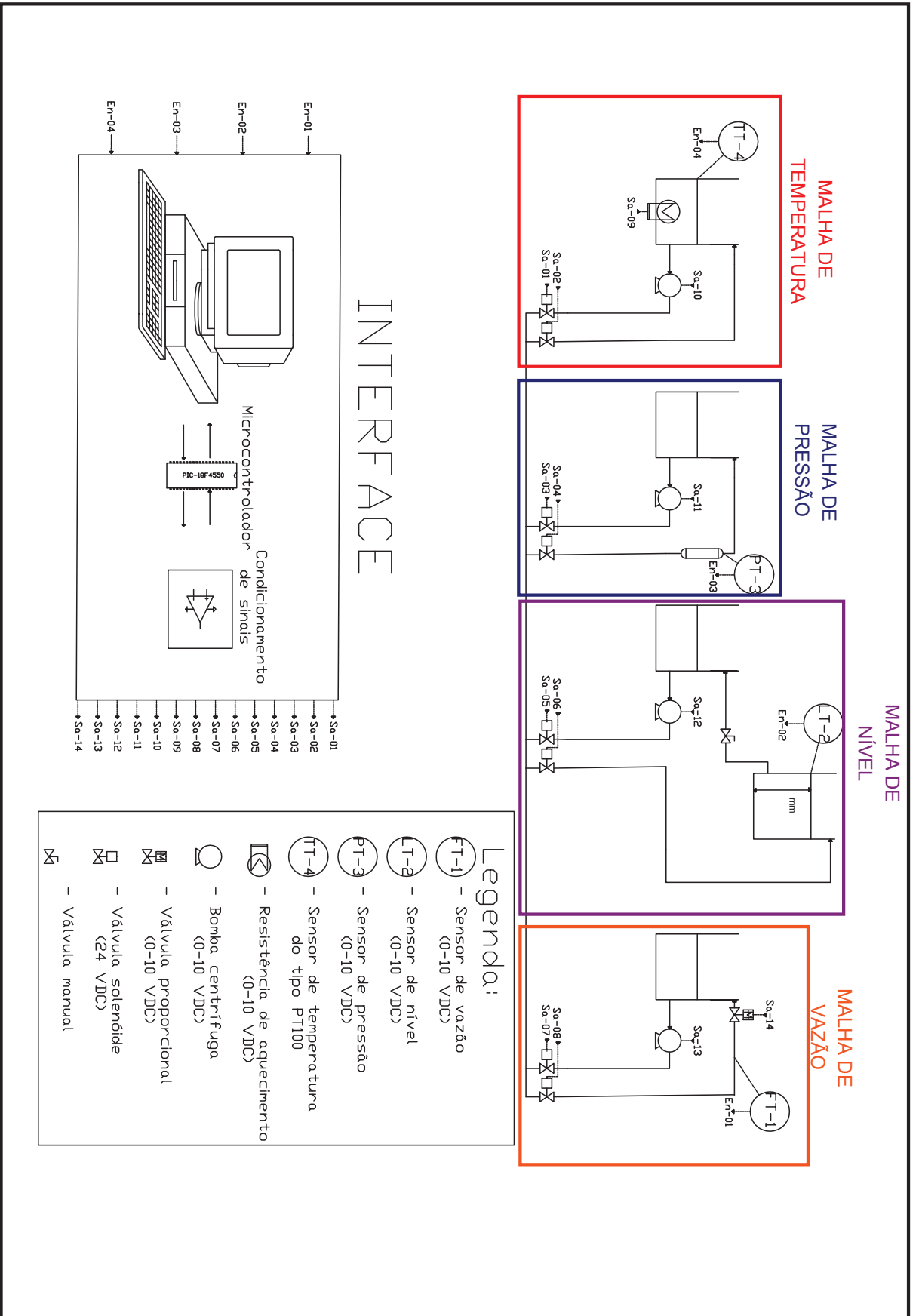


Figura 11: Diagrama resumido com sensores e atuadores da planta didática festo.
 Fonte: Autoria própria.

6.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Um dos focos do projeto é desenvolver uma interface entre a planta industrial e computador. Sendo assim, é necessário projetar um hardware que seja capaz de realizar leituras de sinais analógicos e as envie para o software que irá realizar o processamento. Contudo, os valores de tensão e corrente aceitos pelo hardware muitas vezes não são compatíveis com as especificações dos atuadores e sensores mostrados na Seção 6.1.

A leitura e envio do sinais provenientes da planta é realizada, neste projeto, pelo microcontrolador PIC 18F4550, desenvolvido pela MICROCHIP. Este dispositivo possui corrente máxima em cada pino de I/O igual a 25 mA, e em todas as portas a corrente deve ser de no máximo 200 mA. Além disso, o PIC trabalha com uma faixa de tensão entre 0 a 5 VDC (MICROCHIP, 2009). Essas características mostram que é necessário o condicionamento dos sinais antes de serem lidos pelo microcontrolador. O fluxograma da Figura 12 mostra como deve acontecer a comunicação entre os dispositivos.

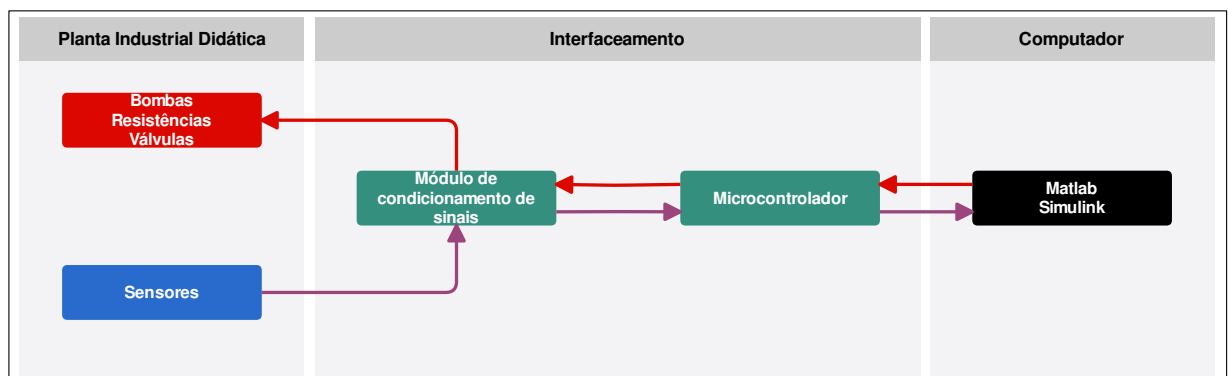


Figura 12: Fluxograma para a comunicação entre planta didática e computador.
Fonte: Autoria própria.

Em trabalhos anteriores, como em (JUNIOR, 2013), foi desenvolvido um módulo de condicionamento de sinais com a finalidade de permitir a comunicação da planta industrial com o software MATLAB via uma placa de aquisição de dados da National Instruments, USB - 6221. Tal módulo pode ser visto na Figura 13. Esta placa foi reutilizada neste projeto uma vez que já possui a conexão com todos os atuadores e sensores da planta, além de ter *buffers* de corrente que permitem o acionamento das válvulas e bombas pelos pinos de I/O do PIC. Ainda, as malhas de controle já estão todas multiplexadas, facilitando a escolha de qual sistema trabalhar.

Contudo, tal módulo foi desenvolvido para trabalhar com tensões entre 0 e 10 VDC. Desta maneira algumas modificações são necessárias para que a planta seja então totalmente

compatível com o PIC.

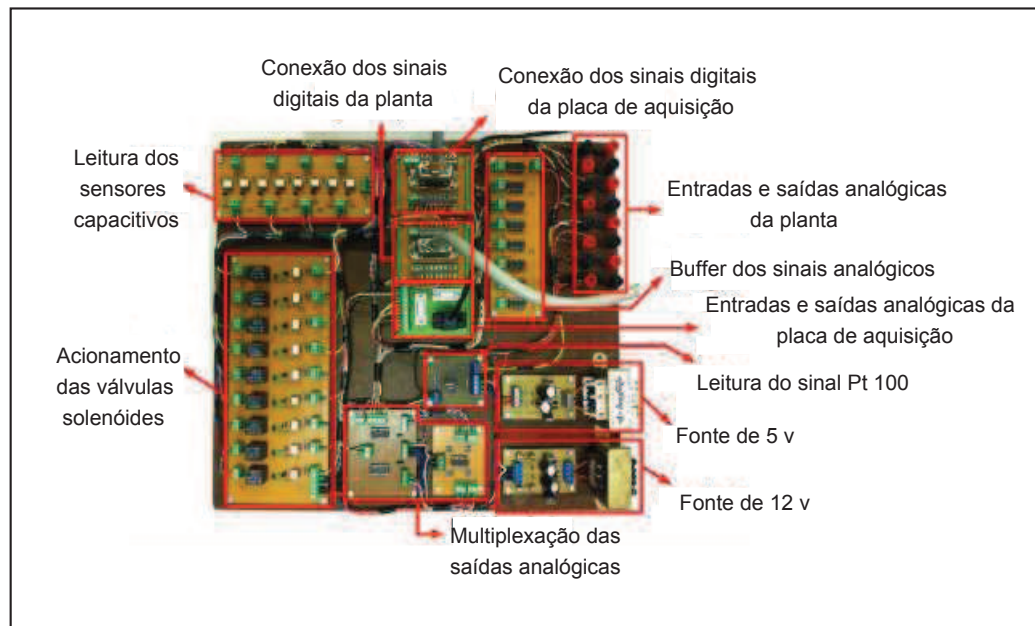


Figura 13: Módulo de condicionamento de sinais reaproveitado.
Fonte: (JUNIOR, 2013).

É possível ver os sensores e atuadores, mostrados anteriormente na Figura 11, presentes na Planta Didática Festo, que estão interligados a interface proposta neste trabalho. Devido ao reaproveitamento do módulo da Figura 13, as válvulas solenóides de entrada e saída de cada malha, já estão compatíveis com a faixa de trabalho do microcontrolador.

6.2.1 SENSORES

Os sensores de nível, vazão e pressão trabalham todos com uma faixa de operação variando entre 0 a 10 VDC. Para deixá-los compatíveis com as entradas analógicas do microcontrolador, é necessário fazer um divisor de tensão com dois resistores com o mesmo valor de resistência. A Figura 14 mostra como os divisores de tensão para cada sensor foram construídos e em quais entradas analógicas o sinal condicionado está conectado.

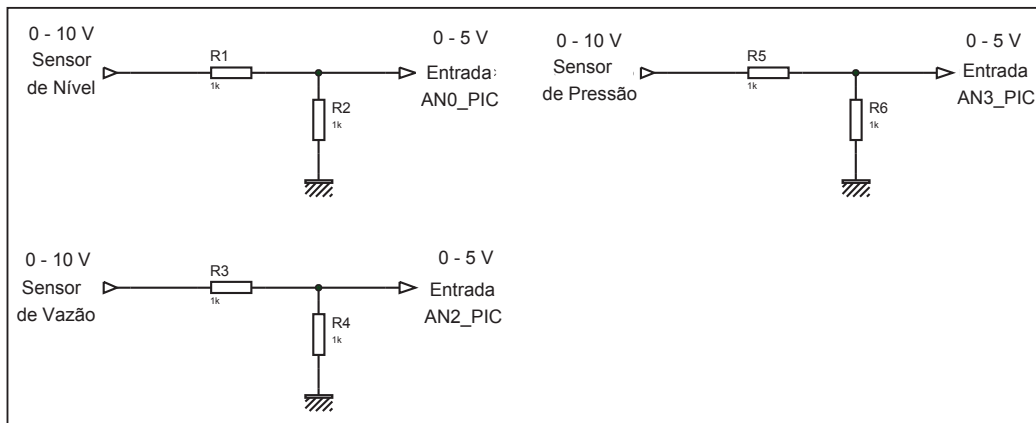


Figura 14: Circuito utilizado para condicionar os sinais dos sensores de nível, vazão e pressão.
Fonte: Autoria própria.

Foram escolhidos resistores com valores de resistência iguais a $R = 1000 \Omega$, pois de acordo com a Equação (31) a corrente máxima que irá circular pelo circuito será de $I = 5 \text{ mA}$, valor este que respeita as limitações das portas do microcontrolador.

$$I = \frac{V_{max}}{2R} = \frac{10}{2000} = 0,005 \text{ A} \quad (31)$$

6.2.2 ATUADORES

Como mostrado na Figura 11, cada malha de controle possui uma bomba centrífuga, no qual podem trabalhar com um valor de tensão entre 0 a 10 *VDC*, de forma que o fluxo da vazão é proporcional ao valor da entrada de tensão, com exceção a bomba da malha de temperatura, no qual trabalha com apenas dois níveis de estado, ligada ou desligada.

Os outros dois atuadores em toda a planta, também mostrados na Figura 11, são a resistência da malha de temperatura e a válvula proporcional da malha de vazão, que também recebem valores de tensões variáveis entre 0 e 10 *VDC*.

Todos estes atuadores são componentes que drenam uma corrente superior ao que o microcontrolador é capaz de fornecer. Para resolver este problema, o módulo de condicionamento de sinais já possui *buffers* de corrente para o acionamento de tais dispositivos (JUNIOR, 2013).

Para obter diferentes valores de tensões foi utilizada a modulação PWM (Modulação por Largura de Pulso) (MIYADAIRA, 2009). O microcontrolador PIC 18F4550 possui dois pinos (RC1 e RC2) disponíveis para realizarem esta função, no entanto existem cinco atuadores que devem ser controlados. Uma maneira de contornar este problema é multiplexar as saídas do microcontrolador de maneira que, quando uma malha é selecionada, a saída de PWM do

PIC é redirecionado para o atuador daquela malha. Assim é necessário utilizar o circuito de multiplexação desenvolvido para o módulo de condicionamento de sinais da Figura 13. Neste módulo existem quatro pinos de controle, a resistência de aquecimento e a válvula proporcional são escolhidos por meio dos pinos *A1* e *B1*, já *A2* e *B2* selecionam qual malha será utilizada e consequentemente a sua respectiva bomba (JUNIOR, 2013).

Tabela 1: Pinos de controle dos multiplexadores.

| PINOS DE CONTROLE | | MALHA SELECIONADA | PINOS DE CONTROLE | | EQUIPAMENTO SELECIONADO |
|-------------------|----|-------------------|-------------------|----|----------------------------|
| A2 | B2 | | A1 | B1 | |
| 0 | 0 | TEMPERATURA | 0 | 0 | RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO |
| 1 | 0 | PRESSÃO | 1 | 0 | - |
| 0 | 1 | NÍVEL | 0 | 1 | - |
| 1 | 1 | VAZÃO | 1 | 1 | VÁLVULA PROPORCIONAL |

Fonte: (JUNIOR, 2013)

A Tabela 1 mostra como é feita a seleção das malhas e equipamentos de acordo com os valores dos pinos de controle. Assim, foi destinada uma saída digital do microcontrolador para cada pino de controle. Os pinos *RD0* e *RD1* são referentes respectivamente a *A2* e *B2* e as saídas *RD4* e *RD5* referentes a *A1* e *B1*.

Com o auxílio dos multiplexadores já presentes, é possível fazer com que o PIC comande os atuadores da planta, porém ainda existe o problema de que a saída do PWM do microcontrolador é limitada a modular uma tensão de 5 *VDC*. Deste modo é necessário construir um circuito que amplie o sinal de PWM para uma tensão compatível com os atuadores.

Para resolver este problema foi utilizado um circuito similar ao mostrado na Figura 15, no qual é constituído por dois optoacopladores, TIL - 111, que realizam a função de isolar as saídas do microcontrolador, dois transistores, BC-337, que são responsáveis em fazer o chaveamento da passagem de corrente pelos atuadores, alguns resistores e duas fontes de 10 *VDC*.

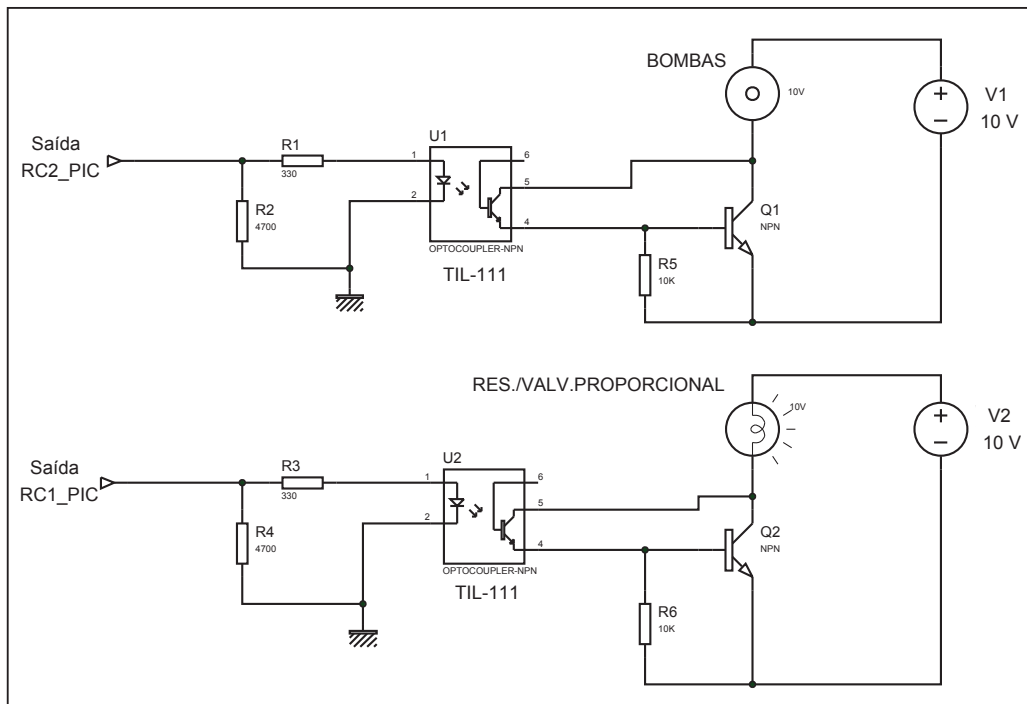


Figura 15: Circuito de condicionamento para as bombas e para a resistência.
Fonte: Autoria própria.

6.2.3 SENSOR DE TEMPERATURA

A malha de temperatura, além de possuir uma resistência de aquecimento, também conta com um sensor de temperatura Pt100. O funcionamento desses sensores se baseia na variação da resistência de acordo com a temperatura e o elemento sensor pode ser construído com platina de alta pureza (SIGHIERI; NISHINARI, 1973).

Uma maneira de realizar a medição da temperatura do Pt100 é por meio da ligação a dois fios. Nesta ligação os terminais da termorresistência são conectados a uma resistência de maneira que variações na resistência do Pt100 implicam em variações na tensão sobre este. Deste modo, é possível realizar a leitura por meio de um microcontrolador. A Figura 16 mostra como é feita a leitura da temperatura pela variação da resistência do Pt100 utilizando a ligação a dois fios.

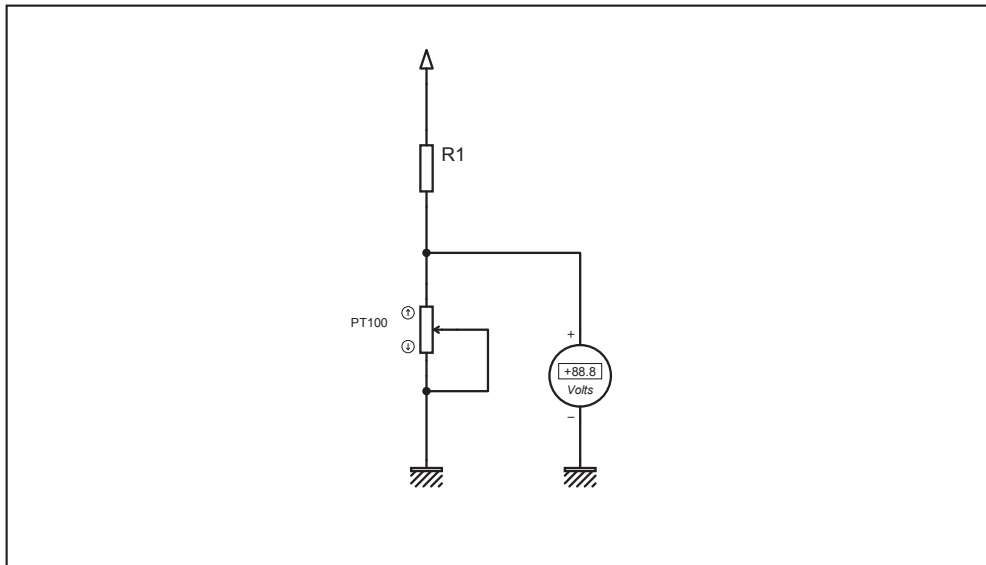


Figura 16: Ligação a dois fios.
Fonte: Autoria própria.

Contudo, nesta configuração, o sinal da leitura da temperatura feito pelo microcontrolador é muito ruidosa, isso se deve principalmente ao fato da faixa de operação do Pt100 ser bastante ampla, assim pequenas variações na resistência causam distúrbios na leitura feita pelo microcontrolador.

Uma maneira de condicionar o sinal de tensão referente à temperatura no PT100 é utilizar amplificadores operacionais, em um módulo projetado em dois estágios. No primeiro estágio é utilizado um amplificador operacional de diferença (SUBTRATOR) e o segundo estágio funciona como um amplificador de sinal.

Pela tabela contida no Anexo A é possível notar que a resistência do Pt100 é de $R = 100 \Omega$ quando a temperatura é de 0°C e de $R = 119,40 \Omega$ quando a temperatura é de 50°C . Assim, considerando que o resistor do circuito apresentado pela Figura 16 possua um valor de $R_1 = 2200 \Omega$ e a tensão de alimentação do circuito seja de $V = 24 \text{ VDC}$, a leitura da tensão sobre o Pt100 é de aproximadamente $V = 1,06 \text{ VDC}$ para a temperatura de 0°C e de $V = 1,25 \text{ VDC}$ para 50°C . A função do amp-op subtrator é deslocar esta faixa de tensão de saída do PT100 para algo em torno de $V = 0 \text{ VDC}$ para 0°C e $V = 0,25 \text{ VDC}$ para 50°C .

A configuração de diferença de um amplificador operacional pode ser vista na Figura 17. Segundo (SEDRA; SMITH, 2000) a saída V_o pode ser expressa pela Equação (32).

$$V_o = \frac{R_b}{R_a}(V_b - V_a) \quad (32)$$

Quando na Figura 17 a relação entres os resistores é unitária, a saída do amplificador

operacional é a própria diferença entre as tensões de entrada, neste trabalho foi convencionado os valores dos resistores para $R_a = R_b = R_c = R_d = 10\text{ K}\Omega$.

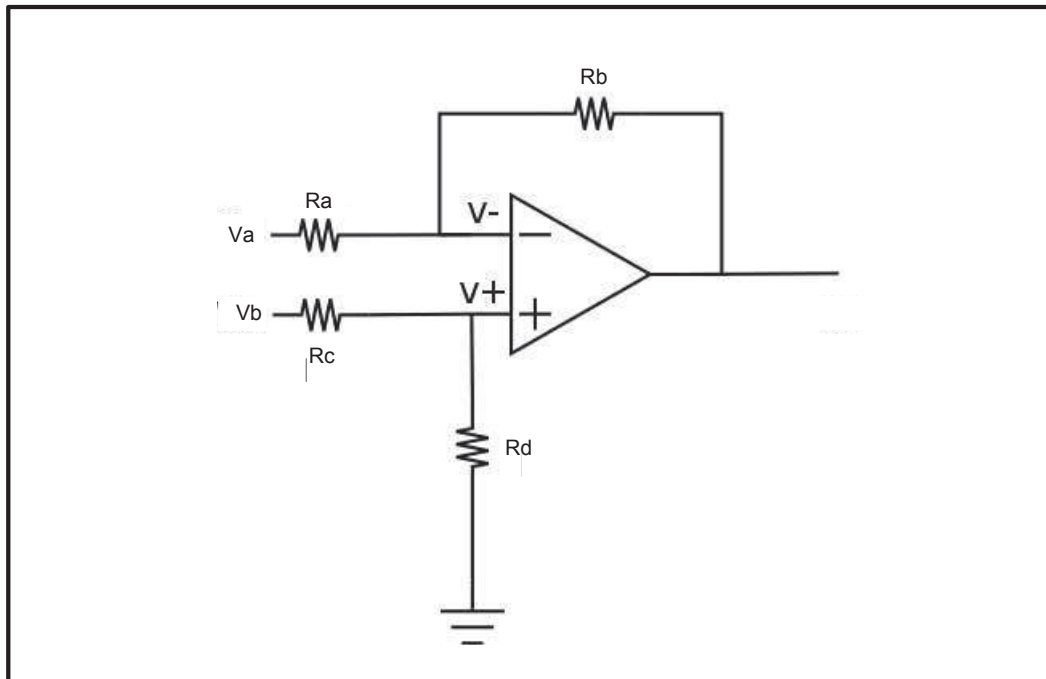


Figura 17: Amplificador operacional de diferença (SUBTRATOR).
Fonte: Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2000).

A tensão de entrada V_b é a tensão sobre o PT100 e a V_a é proveniente de um circuito divisor de tensão, com uma alimentação de $V = 24\text{ VDC}$ e dois resistores em série $R_2 = 2200\ \Omega$ e $R_3 = 100\ \Omega$, conforme mostrado pela Figura 19.

Em seguida, é necessário amplificar o sinal de $V = 0\text{ VDC}$ em 0°C e $V = 0,25\text{ VDC}$ para 50°C para $V = 0\text{ VDC}$ em 0°C e $V = 5\text{ VDC}$ para 50°C , que corresponde em aplicar um ganho $G = 20$. Neste trabalho é utilizado outro amplificador operacional com configuração não inversora, mostrado na Figura 18. De acordo com (SEDRA; SMITH, 2000) a saída V_o para este circuito pode ser escrito pela Equação (33).

$$V_o = \left(1 + \frac{RE}{RF}\right) V_{in} \quad (33)$$

Como resistores comerciais não apresentam todos os valores possíveis de resistência, foram escolhidos os valores de $RE = 2200\ \Omega$ e $RF = 100\ \Omega$, que foram os componentes disponíveis que mais se aproximaram do ganho necessário.

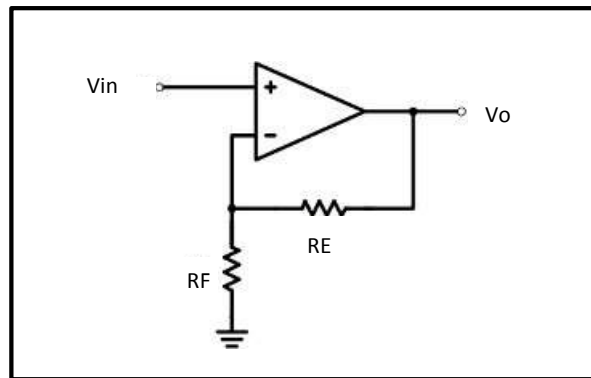


Figura 18: Amplificador operacional não inversor.
Fonte: Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2000).

A Figura 19 mostra o circuito completo utilizado para o condicionamento do sinal de saída do Pt100, com ênfase para os dois estágios utilizados.

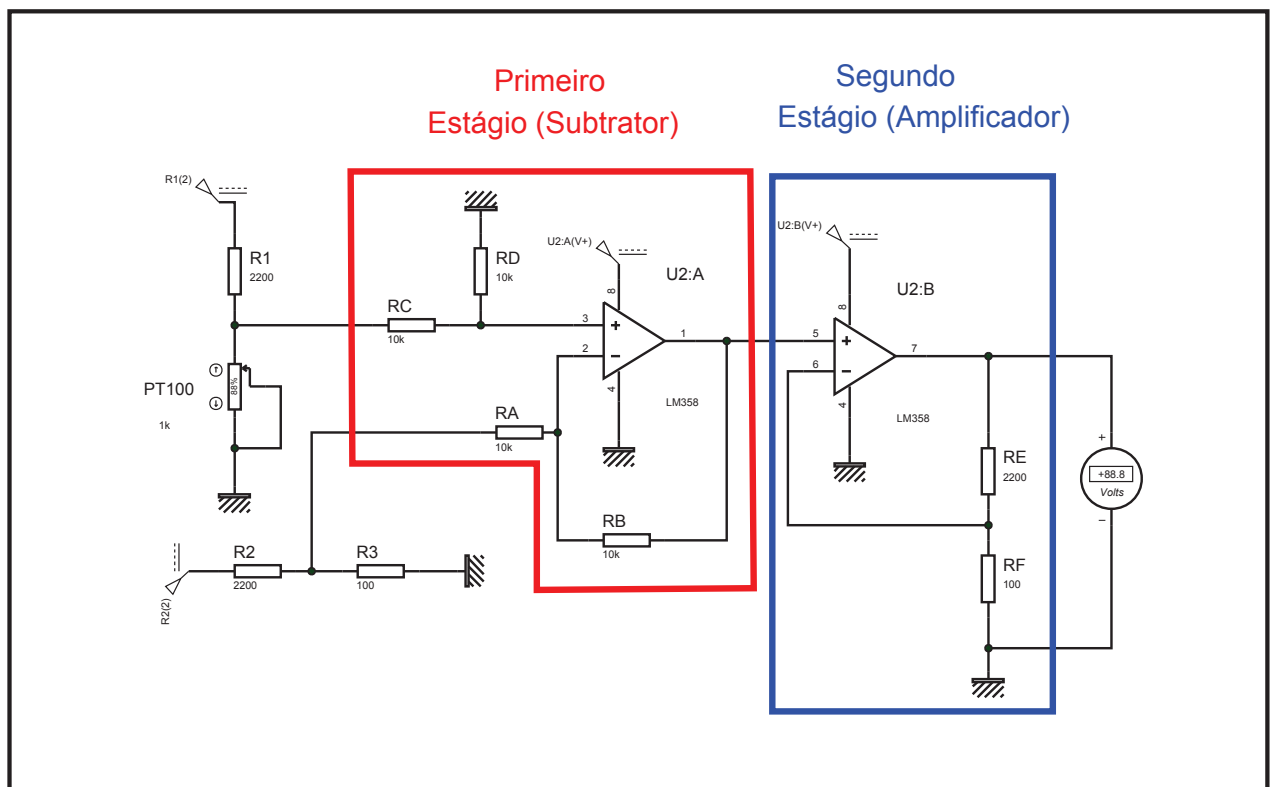


Figura 19: Amplificador operacional não inversor.
Fonte: Autoria própria.

6.2.4 LAYOUT DA PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Após analisados quais dispositivos necessitariam de condicionamento foi desenvolvida uma placa de circuito impresso. Este protótipo possui seis circuitos de divisores de tensão,

sendo que quatro deles estão de fato conectados aos sensores e os outros dois estão como reserva. Nesta placa também estão contidos dois circuitos de acionamento, sendo que um é responsável por comandar as bombas da planta e o outro a resistência ou a válvula proporcional. O *layout* da placa de condicionamento de sinais pode ser visto na Figura 20.

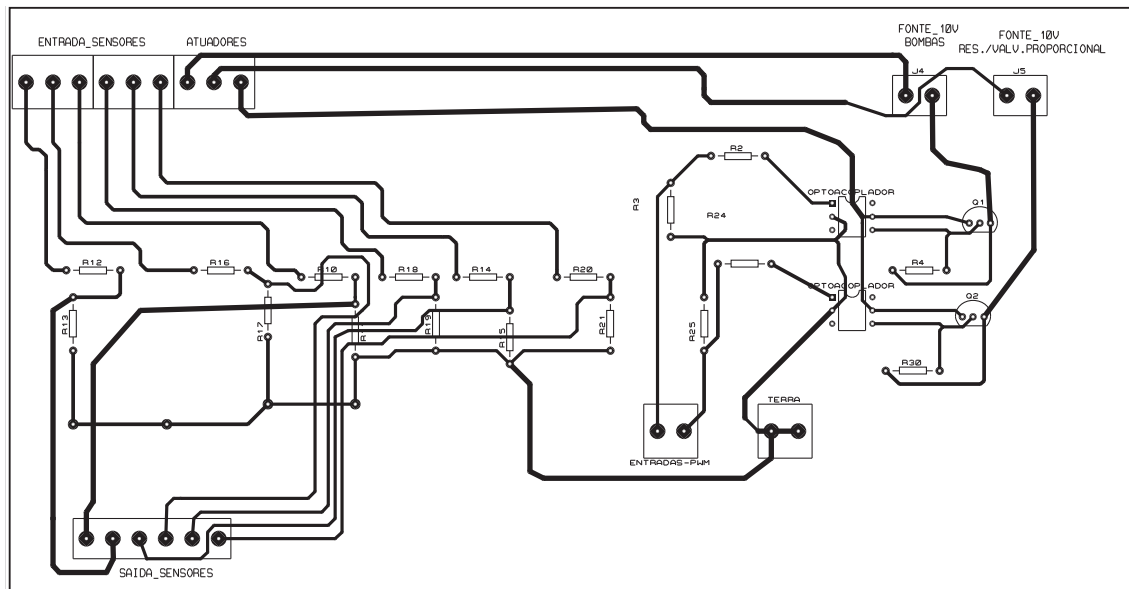


Figura 20: Placa de condicionamento de sinais.
Fonte: Autoria própria.

6.2.5 LAYOUT DA PLACA PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS

Foi projetado uma placa de circuito impresso para realizar a leitura dos sinais da planta, o projeto é baseado em um microcontrolador PIC 18F4550, mostrada na Figura 21.

Além do microcontrolador o circuito é constituído por:

- *Bornes* do tipo fêmea;
 - Realizam a conexão entre os sinais da planta e o microcontrolador;
- Conector DB9 fêmea;
 - Conector necessário para a comunicação serial utilizada;
- Circuito Integrado MAX232;
 - Componente necessário para converter os níveis de tensão do microcontrolador para o protocolo RS232 serial compatível com o computador;
- Conector USB fêmea tipo B 4 pinos;
 - Conector adicionado para futuras aplicações USB;

- Conector RJ45;
 - Conector utilizado para fazer gravações *in-circuit*;
- Cristal Oscilador 20MHZ;
 - Componente utilizado para gerar sinal de *clock* para o microcontrolador;
- Botoeira;
 - Utilizado para realizar o processo de *reset* ao microcontrolador;
- Chaves DIP *switch*;
 - Utilizadas para conectar ou desconectar as interfaces de programação e USB.

O restante dos componentes são basicamente resistores e capacitores necessários para o correto funcionamento dos itens listados anteriormente. O *layout* do circuito projetado pode ser visto na Figura 21.

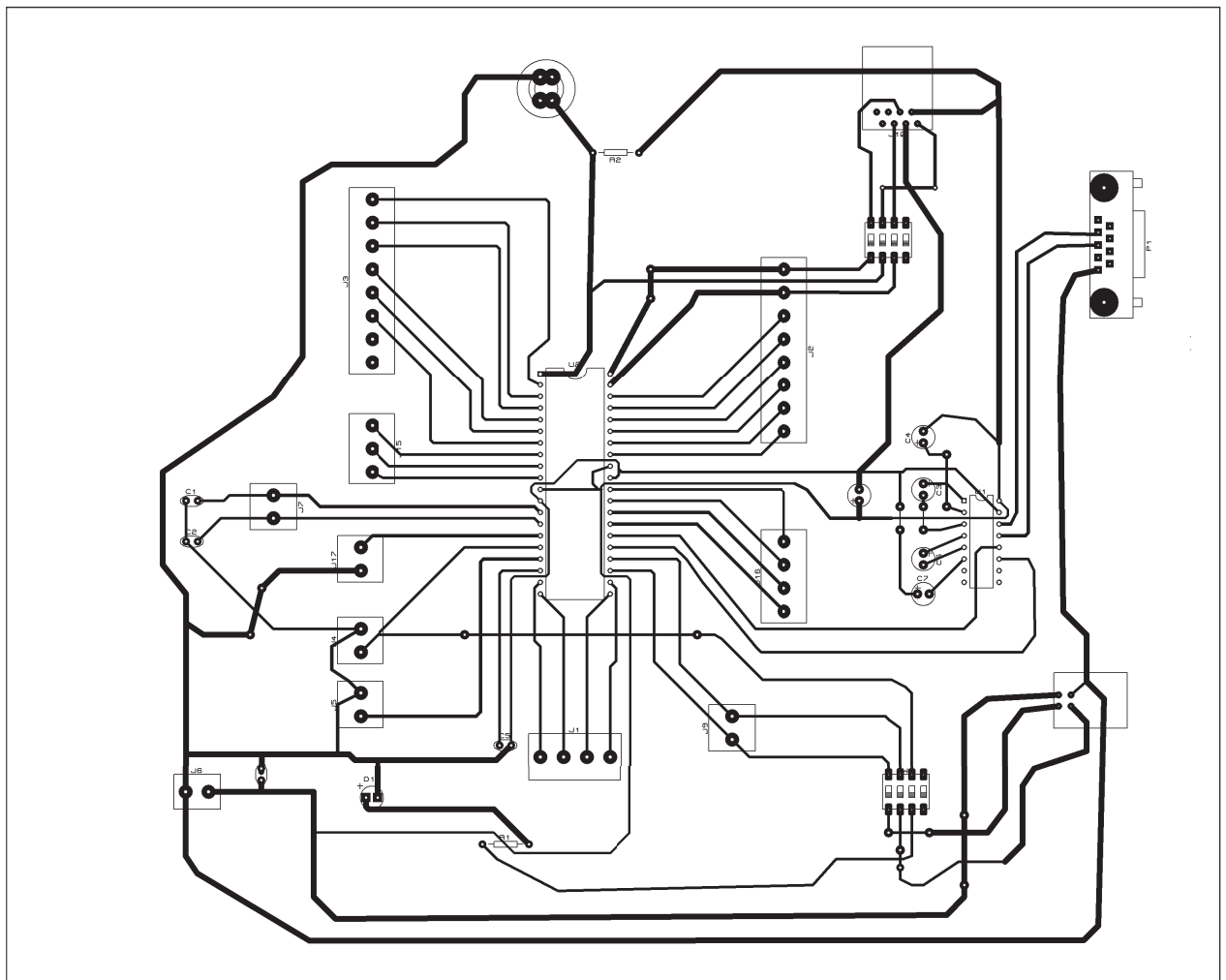


Figura 21: Layout da placa desenvolvida para realizar aquisição dos dados.
Fonte: Autoria própria.

6.3 COMUNICAÇÃO VIA MATLAB/SIMULINK

O MATLAB/SIMULINK possui blocos de comunicação serial. O *Query instrument* é responsável por receber os dados, que são enviados em dois blocos de 8 bits, estes dados devem ser convertidos para um número real, que neste trabalho é valor de tensão lido pelas entradas analógicas do microcontrolador e esta tensão é referente as variáveis das malhas de controles, como nível e temperatura por exemplo.

Para enviar os dados é utilizado o bloco *To instrument*. Neste caso o microcontrolador recebe dados que são representados por 8 bits, pois não há a necessidade de representar valores muito expressivos.

A velocidade de transferência de dados utilizado é de 9600 *bps*, taxa suficiente para realizar o controle das malhas da planta industrial didática.

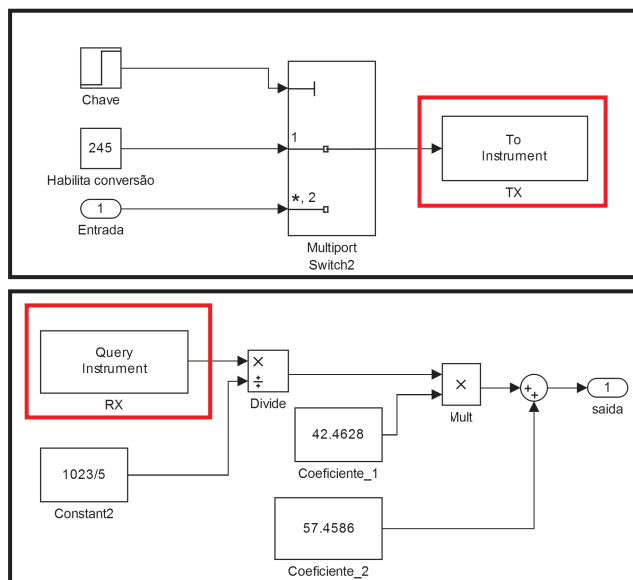


Figura 22: Blocos de comunicação entre Simulink e microcontrolador.
Fonte: Autoria própria.

7 IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS

O modelo do sistema se faz necessário para que sejam aplicados os controladores na metodologia utilizada neste trabalho, assim neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para identificação das malhas de nível e temperatura do sistema real.

7.1 IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE NÍVEL

Considere a malha de controle de nível ilustrado pela Figura 23. Este sistema é composto por dois tanques, onde o líquido do tanque A é transferido ao tanque B por meio de uma bomba centrífuga e o fluxo entre o tanque B e o tanque A é regulado por uma válvula.

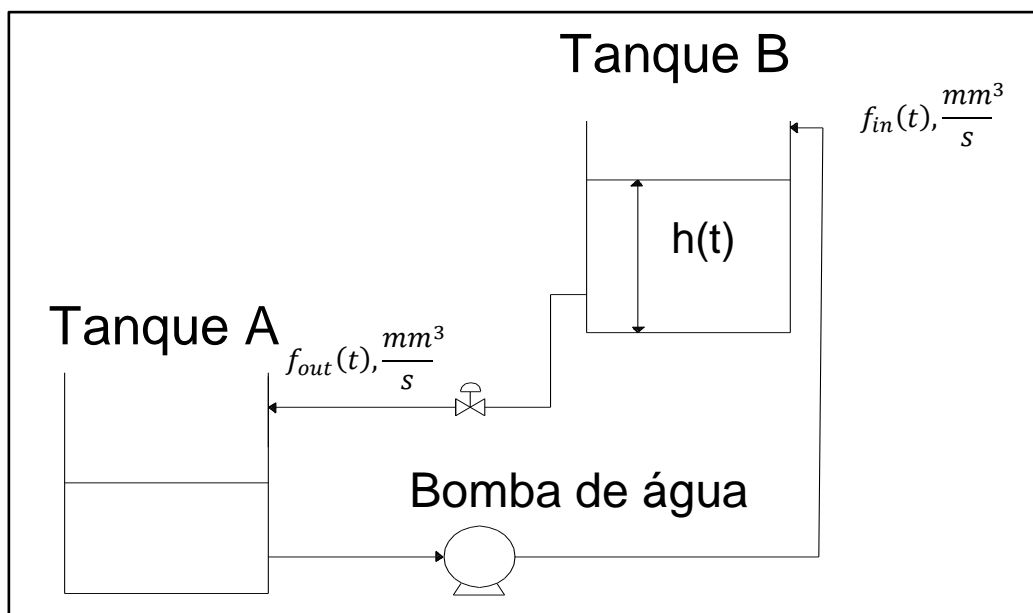


Figura 23: Malha de controle de nível de uma planta industrial.
Fonte: Autoria própria.

Ao aplicar o princípio do balanço de massas no tanque B, verifica-se que a proporção de massa de entrada no tanque subtraído da proporção de massa de saída do tanque é equivalente à proporção de variação da massa (SMITH; CORRIPIO, 2012). Tal relação é representada por

meio da Equação (34).

$$\rho f_{in}(t) - \rho f_{out}(t) = \frac{dm_1(t)}{dt} \quad (34)$$

Sendo,

ρ = densidade do líquido, $\frac{Kg}{mm^3}$;

$f_{in}(t)$ = fluxo de entrada no tanque B, $\frac{mm^3}{s}$;

$f_{out}(t)$ = fluxo de saída do tanque B através de uma válvula, $\frac{mm^3}{s}$;

$m_1(t)$ = massa de líquido acumulada no tanque B, kg .

A massa acumulada do líquido dentro do tanque B é dada pela Equação 35.

$$m_1(t) = \rho Ah(t) \quad (35)$$

Sendo,

A = Área da seção transversal do tanque B, 40832 mm^2 ;

$h(t)$ = Nível de líquido no tanque B, mm .

O fluxo de saída do líquido $f_{out}(t)$ é expressado pela Equação (36).

$$f_{out}(t) = \hat{C}_v \sqrt{\frac{\rho gh(t)}{G_f}} \quad (36)$$

Sendo,

g = Aceleração da gravidade, $9,8 \frac{m}{s^2}$;

G_f = densidade relativa do líquido, adimensional;

\hat{C}_v = Coeficiente da válvula, $\frac{m^3}{s-kPa}$.

Pela Equação (36) é possível notar que todas as grandezas, com exceção do nível, são constantes. Logo, o fluxo de saída pode ser reescrito como mostrado na Equação (37).

$$f_{out}(t) = \hat{C}_v \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}} \sqrt{h(t)} = C_v \sqrt{h(t)} \quad (37)$$

O processo de identificação do fluxo de saída é feito por meio da comparação entre a resposta dos sistemas real e o simulado. Assim com o auxílio do comando ODE 45 presente no software MATLAB é possível obter a resposta simulada do sistema descrito pela Equação (37), de modo que a constante da válvula C_v é ajustada até que o comportamento dos sistemas

real e simulado estejam semelhantes.

Afim de comparar o comportamento do sistema simulado com o sistema real, foi feito um ensaio onde adicionou-se água até o nível de $h = 200 \text{ mm}$ com a válvula totalmente fechada. Após esta etapa a válvula foi aberta por completa até o esvaziamento do tanque.

Após a realização de diversas simulações variando-se o valor da constante da válvula, determinou-se que para $C_v = 1198 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ o comportamento do sistema simulado se aproxima bastante do que acontece na realidade. A comparação entre sistemas real e simulado pode ser visto na Figura 24.

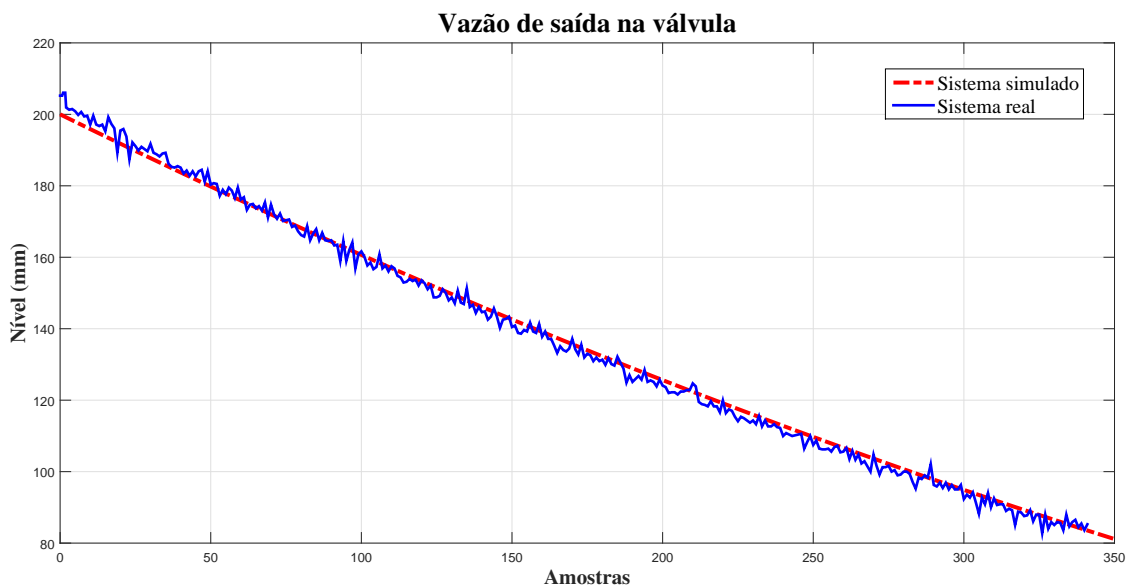


Figura 24: Comparação entre o fluxo de saída simulado e real.
Fonte: Autoria própria.

Reescrevendo então as Equações (34), (35) e (37), obtém-se que a variação do nível no tanque B é dado pela Equação (38).

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A}(f_{in}(t) - 1198\sqrt{h(t)}) \quad (38)$$

Quando o sistema alcança algum ponto de equilíbrio, ou seja, quando a variação do nível no tanque B é nula, $\dot{h}(t) = 0$, é possível estipular qual o fluxo de entrada utilizando a Equação (39).

$$f_{in}(t) = 1198\sqrt{h(t)} \quad (39)$$

Ao aplicar diferentes valores constantes de tensão na bomba centrífuga o sistema tenderá a diferentes pontos de equilíbrio. Com isso, diferentes valores de vazão para cada entrada de tensão serão computados. Admitindo que a bomba possui comportamento linear é possível

descrever uma reta que relaciona o valor de entrada com sua respectiva vazão.

O valor de entrada para a bomba centrífuga é um valor de tensão entre 0 e 10 VDC, contudo o MATLAB/SIMULINK envia esta entrada como uma sequência de bytes via serial para o microcontrolador e este converte estes bytes em um sinal PWM que está alimentando a bomba. Assim em um byte é feito uma divisão entre duas faixas, no qual a primeira faixa, representada pelos valores de 0 a 242, é uma relação linear entre 0 e 10 VDC e a segunda faixa que contém os valores de 243 a 255 estão encarregados de realizar as manobras entre as válvulas dos tanques.

Assim foram coletados quatro pontos de equilíbrio para quatro entradas diferentes, os valores de entrada, nível e vazão podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela com as relações entre valor de entrada e vazão.

| Entrada | Nível (mm) | Vazão ($\frac{mm^3}{s}$) |
|----------------|-------------------|--|
| 165,0 | 132,0 | 13729,5 |
| 170,0 | 145,0 | 14389,7 |
| 180,0 | 153,0 | 14781,0 |
| 190,0 | 185,0 | 16253,0 |

Fonte: Autoria própria

Utilizando os comandos POLYFIT e POLYVAL do MATLAB, no qual o primeiro comando é responsável por determinar os coeficientes de um polinômio que aproxime um vetor com duas entradas, amplitude e tempo por exemplo, e o segundo tem como função resolver o polinômio dentro de uma faixa desejada, assim obteve-se uma reta que se aproxima do comportamento da bomba centrífuga. Logo o fluxo de entrada $f_{in}(t)$ foi aproximado à reta dada pela Equação (40).

$$f_{in}(t) = 93.6E_{in} - 1709.2 \quad (40)$$

Sendo

E_{in} = valor de entrada no sistema que pode assumir valores entre 0 e 242.

A Figura 25 ilustra o comportamento da resposta real da vazão da bomba e a aproximação linear deste comportamento para diferentes valores de entrada.

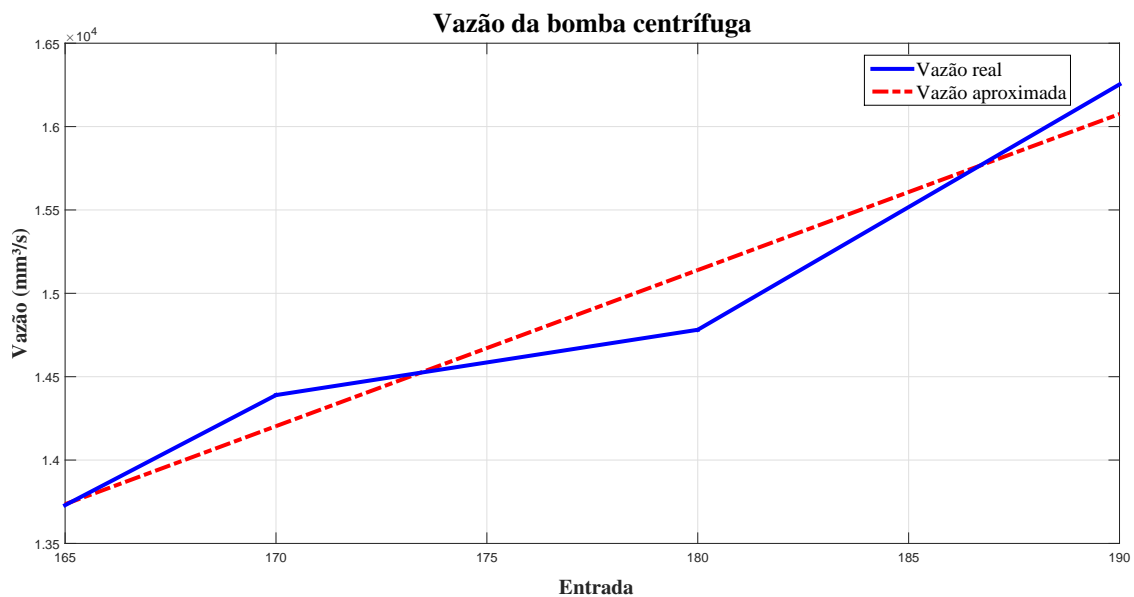


Figura 25: Vazão real e aproximada na bomba de acordo com a entrada.
Fonte: Autoria própria.

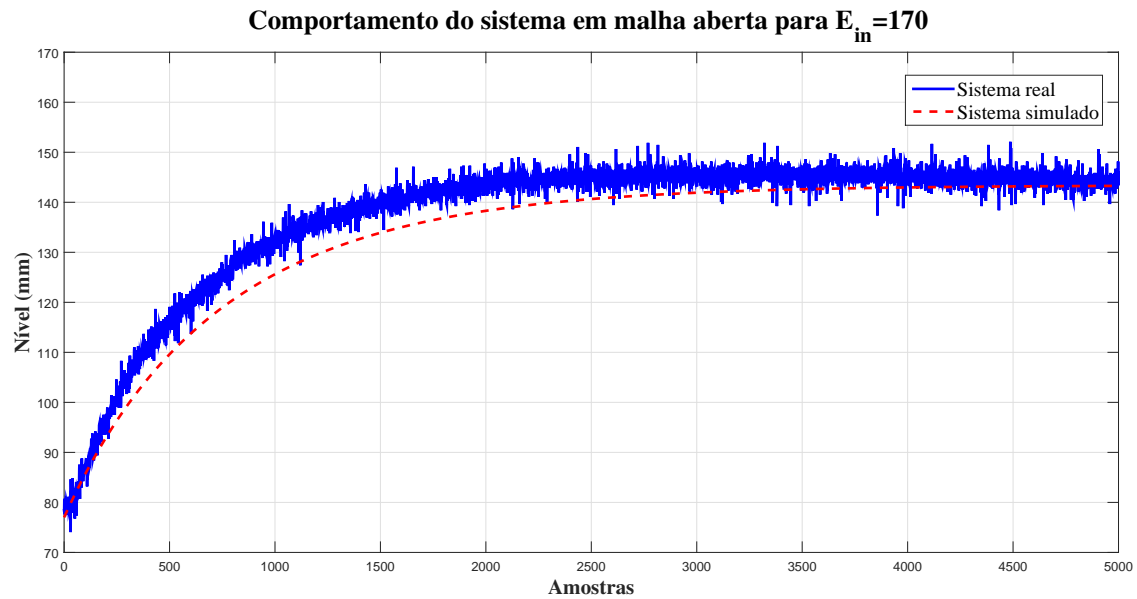
Assim, substituindo a Equação (40) na Equação (38), a variação do nível no Tanque B é dada pela Equação (41).

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A} \left(\frac{93.6E_{in} - 1709.2}{C} - C_v \sqrt{h} \right) \quad (41)$$

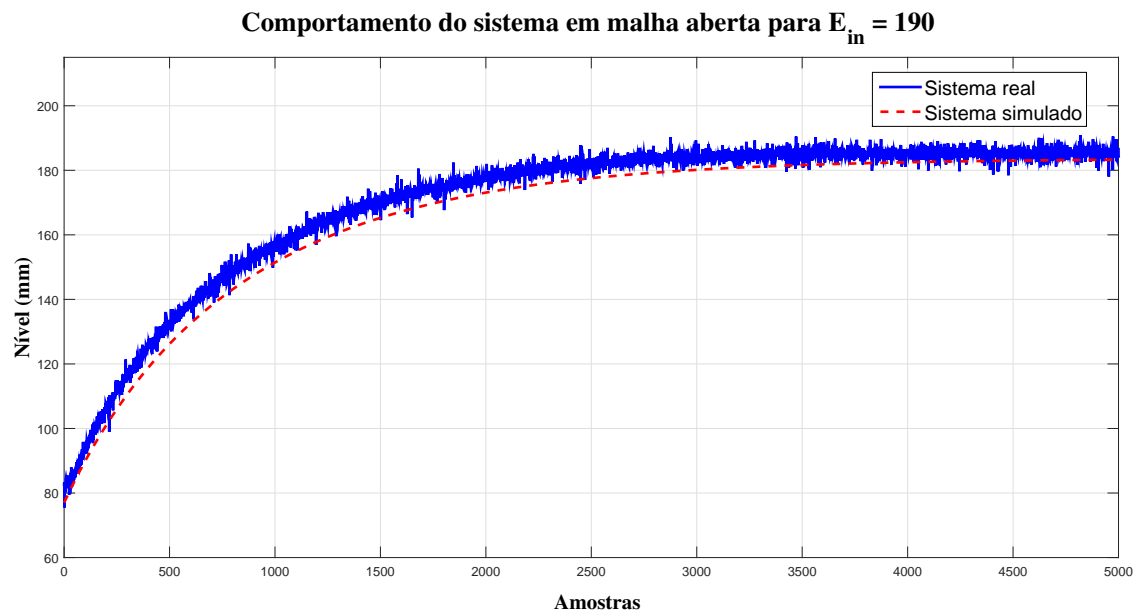
A constante C foi adicionada à Equação (41) afim de ajustar o comportamento do modelo matemático com a variação real do nível. O valor encontrado empiricamente que obteve o menor erro entre o sistema real e simulado foi de $C = 0.99$.

Para verificar se o sistema identificado condiz com o comportamento do sistema real, foram atribuídas duas entradas no sistema em malha aberta. A Figura 26 mostra as saídas tanto do sistema simulado quanto do sistema real para uma entrada $E_{in} = 170$, enquanto que na Figura 27 ilustra as saídas para uma entrada $E_{in} = 190$.

Em ambas as Figuras 26 e 27 é possível notar que a resposta do sistema simulado se aproxima da resposta do sistema real, principalmente em relação ao regime permanente. O erro persistente entre o sistema real e simulado pode ser atribuído ao fato de que o fluxo de entrada $f_{in}(t)$ foi aproximado a uma reta, porém como visto na Figura 25 o fluxo real não é exatamente linear.



**Figura 26: Malha de nível com entrada $E_{in} = 170$.
Fonte: Autoria própria.**



**Figura 27: Malha de nível com entrada $E_{in} = 190$.
Fonte: Autoria própria.**

7.2 IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE TEMPERATURA

A identificação da malha de temperatura foi feita utilizando o comando `IDDATA` do MATLAB. Neste trabalho o sistema foi identificado para o limite superior de saturação de tensão, que no simulink é dado pelo valor de 242. Assim foi obtida a função de transferência dada pela Equação (42).

$$H_{temp}(s) = \frac{9,35 * 10^{-6}}{s + 4,324 * 10^{-5}} \quad (42)$$

Já a representação no espaço de estados para o sistema é dado pelas matrizes A_{temp} , B_{temp} , C_{temp} e D_{temp} dadas pelas Equações (43) - (46).

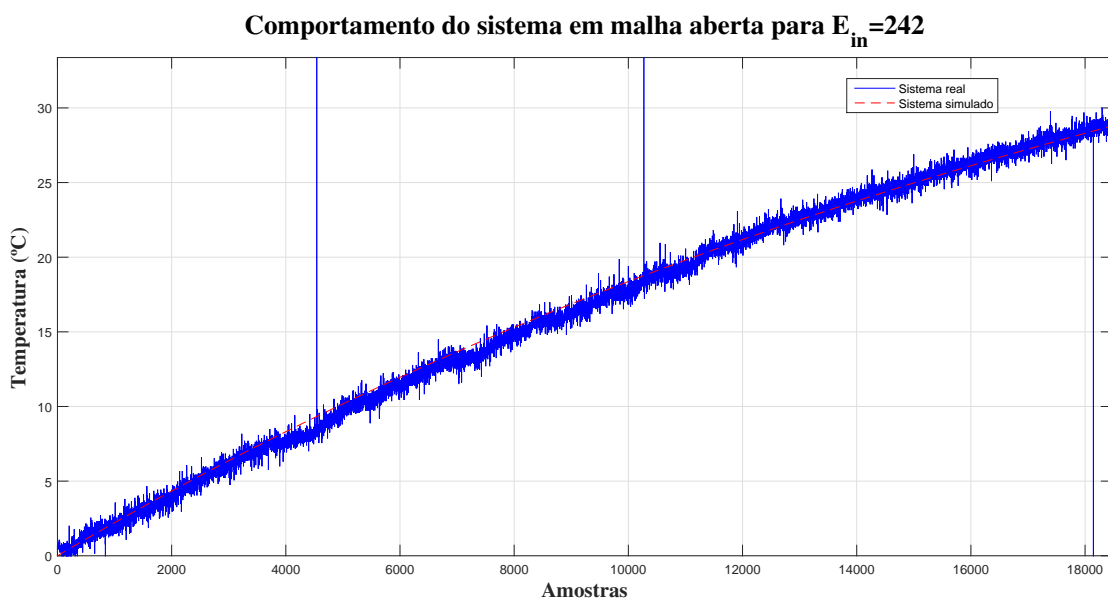
$$A_{temp} = [-4.3240 * 10^{-05}] \quad (43)$$

$$B_{temp} = [6.44 * 10^{-09}] \quad (44)$$

$$C_{temp} = [1452] \quad (45)$$

$$D_{temp} = [0] \quad (46)$$

Por se tratar de um sistema lento e também pelo fato de não ser recomendado manter temperaturas muito altas no tanque, obter a curva em regime para a entrada em saturação se tornou inviável. Sendo assim, o comportamento do sistema real e simulado pode ser visto na Figura 28.



**Figura 28: Malha de temperatura com entrada $E_{in} = 242$.
Fonte: Autoria própria.**

Vale ressaltar que todas as matrizes que representam o sistema no espaço de estados,

são de dimensões 1×1 , tal característica já era esperado uma vez que o sistema é de primeira ordem.

8 CONTROLE E RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados as metodologias das técnicas de controles aplicadas neste trabalho e após esta abordagem mais teórica, são apresentados os resultados obtidos para os controladores propostos no trabalho, tanto para a malha de nível quanto para a malha de temperatura.

8.1 CONTROLE MALHA DE NÍVEL

Nesta seção serão apresentadas as estruturas dos controladores utilizados para a malha de nível da planta industrial didática, no qual foram utilizados o Controle PI, *Sliding Mode* e Controle Robusto (H_2/H_∞).

8.1.1 CONTROLE PI

Para determinar os ganhos k_p e k_i do controlador foi utilizado o *toolbox Global Optimization* do software MATLAB, que corresponde à implementação do algoritmo genético no software MATLAB. Neste algoritmo foi definido que a faixa de busca para os ganhos fosse entre 0 e 200, para uma função objetivo que busca minimizar o erro RMS (erro quadrático médio) e população final de 20 indivíduos. Os códigos utilizados para determinação dos ganhos do controlador PI via Algoritmo Genético são apresentados nos Apêndices A, B e C.

Devido a metodologia apresentada neste trabalho, foi necessário montar uma estrutura de simulação do sistema real para que fosse possível utilizar o Algoritmo genético e tal foi feita no software MATLAB/SIMULINK, no qual o modelo matemático da malha de nível, dado pela Equação (41), foi simulado por meio do bloco Matlab *function*. Na simulação foi realizada a realimentação negativa entre a entrada de referência e saída da planta e adicionado um bloco de PI entre o erro e a entrada do sistema, como mostrado na Figura 29. Como resultado o Algoritmo Genético retornou os valores de $k_p = 181.6122$ e $k_i = 0.0137$.

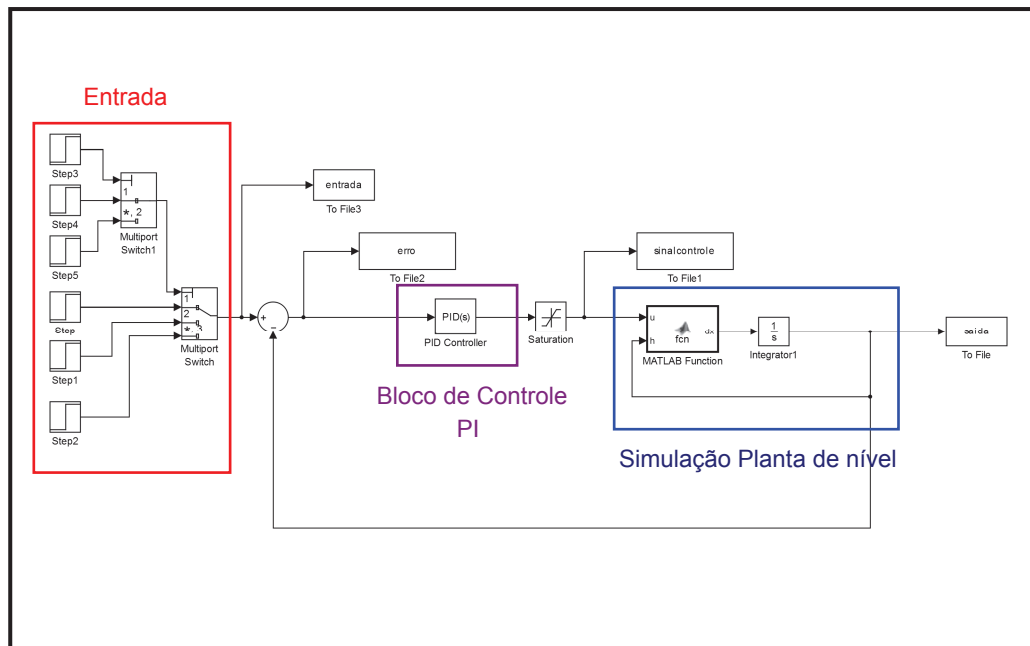


Figura 29: Estrutura de simulação para determinação dos ganhos k_p e k_i .

Fonte: Autoria própria.

É interessante ressaltar que a única diferença entre a estrutura de simulação mostrada na Figura 1 e o controle com a planta real é a substituição dos blocos de simulação do sistema pelos blocos da Figura 22. Isso mostra a versatilidade da ferramenta implementada neste trabalho, uma vez que a transição entre uma simulação computacional e a implementação real do controle se dá por uma simples troca de blocos de controle no Simulink. A Figura 30 mostra o sistema de controle utilizando PI para a planta de nível.

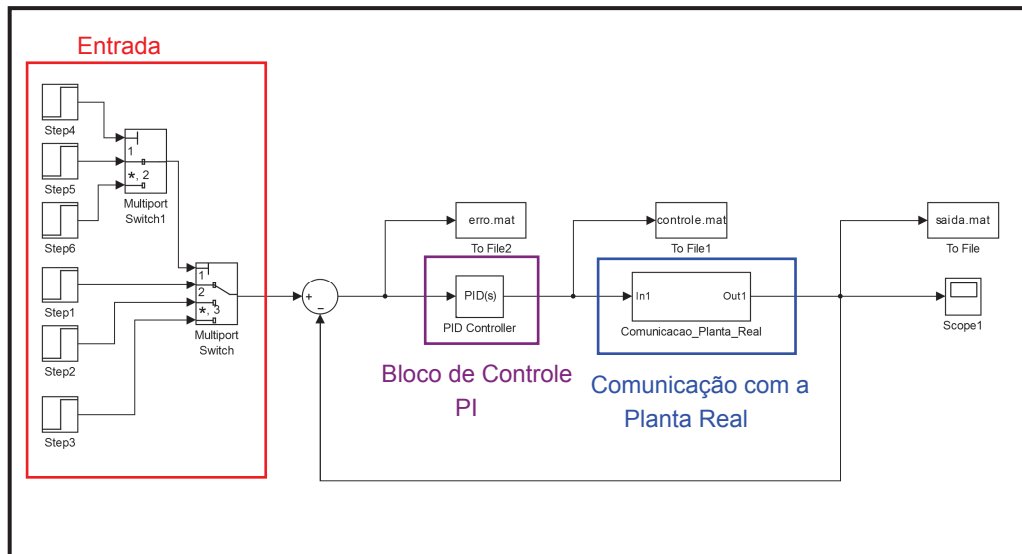


Figura 30: Estrutura de controle PI para a Planta de nível.
Fonte: Autoria própria.

8.1.2 CONTROLE *SLIDING MODE*

Substituindo as constantes A , C e C_v da Equação (41), é possível reescrevê-la por meio da Equação (47).

$$\dot{h} = 0,002315E_{in} - 0,04228 - 0,029\sqrt{h} \quad (47)$$

A Equação (18) mostra que a superfície deslizante $s(t)$ é a diferença entre a saída do sistema e o sinal de referência, nesta malha a saída do sistema é o nível do tanque, assim a superfície pode ser reescrita pela Equação (48).

$$s(t) = h(t) - r(t) \quad (48)$$

A derivada da Equação (48) é dada por,

$$\dot{s}(t) = \dot{h}(t) - \dot{r}(t) \quad (49)$$

assim substituindo a Equação (49) em (47) e isolando a entrada E_{in} , é obtida a Equação (50).

$$E_{in} = 431,96[\dot{s}(t) + \dot{r}(t)] + 18,2634 + 12,526\sqrt{h} \quad (50)$$

Neste trabalho todas as referências são sinais constantes, desta maneira suas derivadas

serão sempre nulas, ou seja, $\dot{r}(t)$ não interfere na lei de controle.

Para determinar a superfície $\dot{s}(t)$ é necessário impor que o sistema seja estável. Uma maneira de verificar a estabilidade é por meio do teorema de Lyapunov (KHALIL, 2002).

Teorema 2 *Uma função $V(x)$, contínua e diferenciável, sendo $D \subset \mathbb{R}^n$, é dita de Lyapunov, se e somente se atender às condições:*

$$\begin{aligned} V(0) &= 0 \\ V(s) &> 0 \text{ em } D - \{0\} \\ \dot{V}(s) &\leq 0 \end{aligned}$$

Considerando a possível função de Lyapunov dada por,

$$V(s) = \frac{s^2}{2} \quad (51)$$

esta função deve atender aos requisitos dados no Teorema 2, no qual duas delas já são atendidas, pois a função tem o valor de zero para $s = 0$ e é positiva para qualquer valor de domínio, exceto para a origem.

Para determinar se a função atende ao terceiro e último requisito, é calculada a derivada $\dot{V}(s)$, mostrada em (52).

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} \quad (52)$$

Uma maneira de garantir que a derivada da função de Lyapunov seja sempre negativa, é atribuir $\dot{s} = -ks$, sendo $k > 0$, assim a Equação (52) pode ser reescrita por meio da Equação (53).

$$\dot{V}(s) = -ks^2 \quad (53)$$

Substituindo \dot{s} por $-ks$, sendo $s = e = (h - r)$ na Equação (50), a lei de controle para o sistema de nível é dado pela Equação (54)

$$E_{in} = 18,2634 + 12,526\sqrt{h} - k(h - r) \quad (54)$$

Foi verificado que o valor da constante k interfere no tempo de subida da resposta do sistema, assim foi atribuído o valor de $k = 20$, pois valores maiores não influenciam a resposta,

uma vez que o sistema físico possui saturação quanto a vazão na bomba.

A simulação do controle do sistema foi feita via código, utilizando o MATLAB . Tal função é mostrada no Apêndice D.

A estrutura de Controle para o sistema físico utilizando *Sliding Mode* foi feita no MATLAB/SIMULINK e pode ser vista na Figura 31.

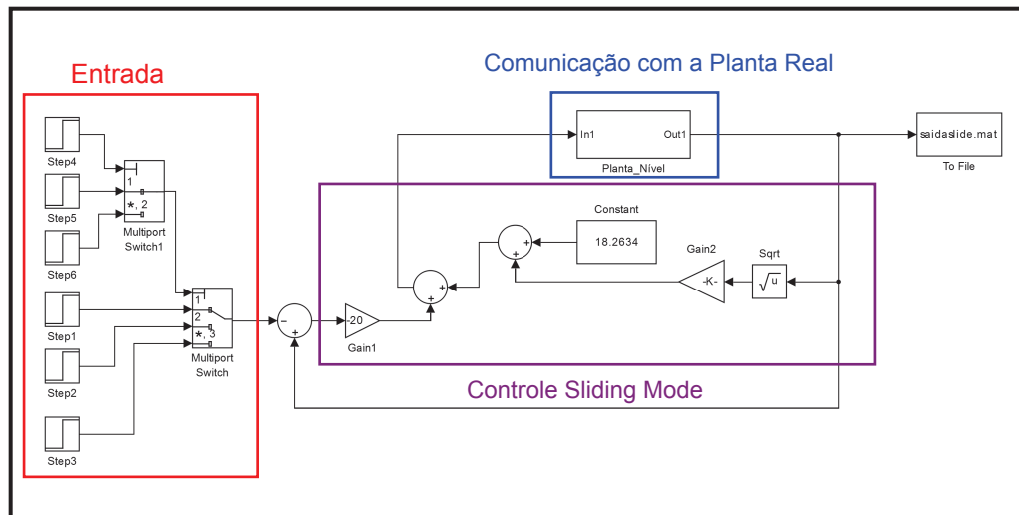


Figura 31: Estrutura de controle *Sliding Mode* para a Planta de nível.
Fonte: Autoria própria.

8.1.3 CONTROLE ROBUSTO

Como mostrado na Figura 25, a vazão real da bomba não é linear, assim a finalidade do controle robusto neste trabalho é determinar um controlador que garanta a estabilidade mesmo com esta não linearidade.

Neste trabalho foi escolhido o seguinte procedimento, no qual foram determinadas duas retas para fluxo de entrada, $f_1 = 132,04E_{in} - 8057.1$ e $f_2 = 70,1E_{in} + 2163$, que abrangem toda região que a bomba possa ter algum valor de vazão, no qual é demonstrado pela Figura 32. Sob estas duas retas foram escolhidos sete pontos de equilíbrio para que o sistema fosse linearizado. A Tabela 3 mostra os pontos de equilíbrio escolhidos e seus valores de vazão para as retas f_1 e f_2 .

Tabela 3: Tabela com os pontos de equilíbrio para o sistema para os fluxo de entrada f_1 e f_2 .

| Entrada | Vazão f_1 ($\frac{mm^3}{s}$) | Vazão f_2 ($\frac{mm^3}{s}$) |
|----------------|---|---|
| 165,0 | 13729,5 | 13729,5 |
| 170,0 | 14389,7 | 14080 |
| 180,0 | 15710,1 | 14781,0 |
| 190,0 | 17030,5 | 15482 |

Fonte: Autoria própria

Como a Equação que rege o comportamento do sistema leva em consideração o fluxo da bomba, a Equação (38) deve ser reescrita considerando as retas f_1 e f_2 para que sejam feitas as linearizações. Considerando f_1 , o modelo matemático do sistema é representado pela Equação (55).

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{40832}(132,04E_{in} - 8057,1 - 1198\sqrt{h(t)}) \quad (55)$$

Para determinar a matriz A do sistema linearizado deve-se derivar o sistema não linear em função das variáveis de estado (SLOTINE, 1991), neste caso em função da altura h . Na Equação (56) é mostrada tal derivada para o sistema da Equação (55).

$$A_{f1} = \frac{-1198}{81664\sqrt{h_{eq}}} \quad (56)$$

Da mesma forma, o sistema deve ser derivado para encontrar o valor da matriz B linearizada, mas neste caso em função da entrada E_{in} (SLOTINE, 1991). Para a reta f_1 a matriz B é dada pela Equação (57).

$$B_{f1} = [0.0032337] \quad (57)$$

Como mencionado as entradas escolhidas para as linearizações são pontos de equilíbrio, assim o nível h é um ponto de equilíbrio quando $\dot{h}(t) = 0$ (SLOTINE, 1991). Consequentemente, para a entrada $E_{in} = 165$ o nível $h_{eq} = 131,34 \text{ mm}$ e a matriz linearizada A_1 para este ponto é dada pela Equação (58).

$$A_1 = [-0.001280] \quad (58)$$

Como a finalidade do controlador robusto neste trabalho é seguir uma referência, deve se inserir um ganho integrativo que em consequência gera um sistema aumentado (OGATA, 2010). A matriz aumentada A_{1h} é dada pela Equação (59).

$$A_{1h} = \begin{bmatrix} -0.001280 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

Outro ponto de equilíbrio escolhido foi de $E_{in} = 170$ e $h_{eq} = 144,27 \text{ mm}$, no qual foi encontrada a matriz linearizada A_2 , dada por

$$A_2 = [-0.001221] \quad (60)$$

da mesma forma foi determinada uma matriz aumentada A_{2h} dada pela Equação (61).

$$A_{2h} = \begin{bmatrix} -0.001221 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

Para a entrada $E_{in} = 180$ e $h_{eq} = 171,97 \text{ mm}$, também foi feita a linearização e foi determinada a matriz A_3 , dada por

$$A_3 = [-0.001118] \quad (62)$$

sendo que a matriz aumentada A_{3h} foi determinada como mostra a Equação (63).

$$A_{3h} = \begin{bmatrix} -0.001118 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

O último ponto de equilíbrio escolhido para o sistema da Equação (55) foi de $E_{in} = 190$ e $h_{eq} = 202 \text{ mm}$, no qual resultou uma matriz linearizada A_4 , dada por

$$A_4 = [-0.001032] \quad (64)$$

e a matriz aumentada A_{4h} é dada pela Equação (65).

$$A_{4h} = \begin{bmatrix} -0.001032 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

Também deve-se obter uma matriz B aumentada, deste modos as matrizes B_{1h} , B_{2h} ,

B_{3h} e B_{4h} são dadas por (66).

$$B_{1h} = B_{2h} = B_{3h} = B_{4h} = \begin{bmatrix} \mathbf{0.0032337} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (66)$$

As outras três linearizações foram feitas considerando a vazão da bomba dada por f_2 , deste modo o modelo matemático da planta de nível é dado pela Equação (67).

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{40832}(70,1E_{in} + 2163 - 1198\sqrt{h(t)}) \quad (67)$$

Da mesma maneira que foi feita anteriormente, é necessário determinar as matrizes linearizadas A e B do sistema dado pela Equação (67). A derivada do sistema em função do nível $h(t)$ resulta na Equação (68).

$$A_{f2} = \frac{-1198}{81664\sqrt{h_{eq}}} \quad (68)$$

Quando feita a derivada do modelo não linear em função da entrada foi obtida a matriz B dada pela Equação (69).

$$B_{f2} = [0.0017167] \quad (69)$$

O próximo ponto de equilíbrio escolhido foi o de $E_{in} = 170$, mas como o modelo matemático foi modificado devido à vazão na bomba, o nível em que o sistema entra em equilíbrio também é outro, neste caso $h_{eq} = 138,13 \text{ mm}$, que resultou na matriz linearizada A_5 , dada por

$$A_5 = [-\mathbf{0.001248}] \quad (70)$$

que quando aumentada é dada pela Equação (71).

$$A_{5h} = \begin{bmatrix} \mathbf{-0.001248} & \mathbf{0} \\ \mathbf{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (71)$$

A entrada $E_{in} = 180$ e o nível $h_{eq} = 152,23 \text{ mm}$ foi outro ponto de equilíbrio escolhido para ser linearizado, no qual foi obtida a matriz A_6 , dada por

$$A_6 = [-\mathbf{0.001889}] \quad (72)$$

no qual foi possível obter a matriz aumentada dada pela Equação (73).

$$A_{6h} = \begin{bmatrix} -0.001889 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (73)$$

Por fim foi determinado que o ponto $E_{in} = 190$ e $h_{eq} = 167$ para linearização, obtendo assim a matriz A_7 mostrada em

$$A_7 = [-0.001135] \quad (74)$$

que também foi necessário determinar sua equivalente aumentada, que pode ser vista na Equação (75).

$$A_{7h} = \begin{bmatrix} -0.001135 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (75)$$

As matrizes B_{5h} , B_{6h} e B_{7h} são representadas pela Equação (76).

$$B_{5h} = B_{6h} = B_{7h} = \begin{bmatrix} 0.0017167 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (76)$$

A Figura 32 mostra quais foram os pontos que foram feitas as linearização dos sistema, além das retas que abrangem a variação da vazão na bomba.

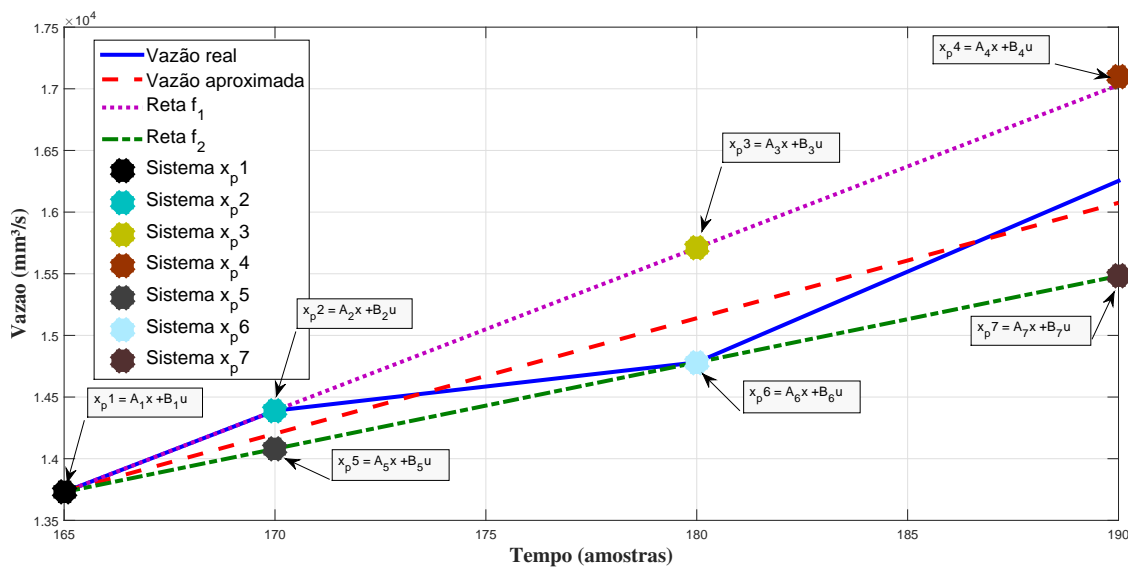


Figura 32: Pontos de linearização para determinação do controlador robusto.

Fonte: Autoria própria.

Realizadas todas as linearizações, foi possível determinar os ganhos K_x e K_q utilizando a técnica de controle robusto. O código utilizado para determinação de tais ganhos foi feito via MATLAB, que é apresentado no Apêndice E. Os valores dos ganhos para o controlador retornados pelas normas H_2 e H_∞ foram de $K_x = -61,4874$ e $K_q = 0,7683$.

A Figura 33 mostra a estrutura de controle desenvolvida no MATLAB/SIMULINK, nela é evidente a facilidade de se trabalhar tanto com o modelo do sistema ou a planta real, no qual apenas é necessário escolher na chave adicionada qual saída será a do sistema.

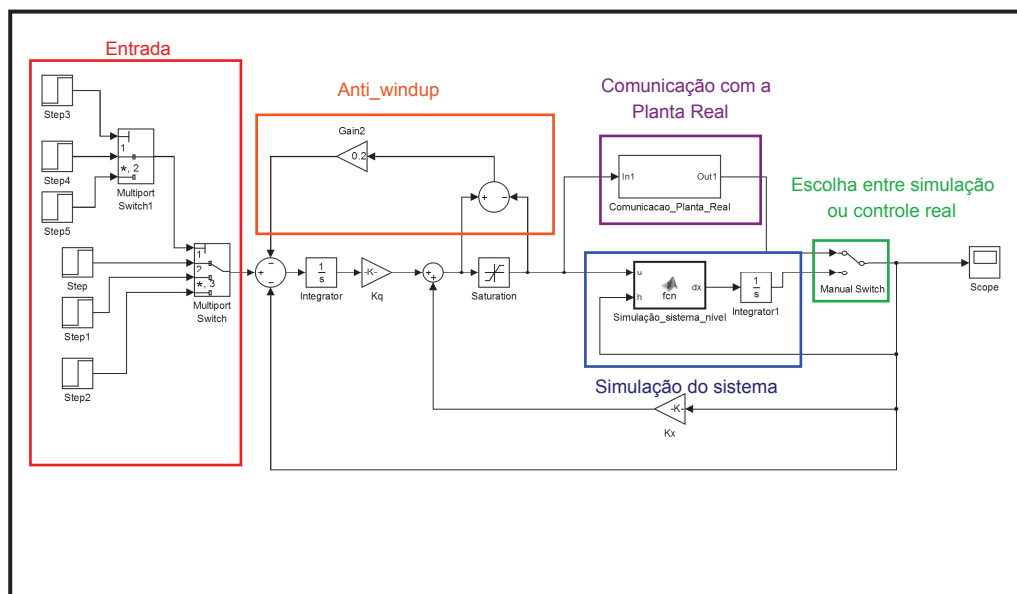


Figura 33: Estrutura para controle misto para a Planta de nível.
Fonte: Autoria própria.

8.2 CONTROLE MALHA DE TEMPERATURA

Na malha de temperatura foram empregados o Controle PI e por realimentação de estados com ganho integrativo, a exceção do *Sliding Mode* se justifica ao fato de o modelo matemático desta malha, considerada neste trabalho, não apresentar características não lineares.

8.2.1 CONTROLE PI

Assim como na malha de nível, os ganhos k_p e k_i foram encontrados utilizando o algoritmo genético. Para determinação dos ganhos foram atribuídos uma faixa de busca de 0 a 200, com uma função objetivo que busca minimizar o erro RMS, sendo que a população final é de 20 indivíduos. Os códigos utilizados utilizando o AG foram os mesmos utilizados para a malha de nível, tais códigos podem ser vistos nos Apêndices A, B e C.

O Algoritmo Genético trabalha em conjunto com uma estrutura de simulação para o controle da malha de temperatura, que também é responsável pelo controle real da malha de nível, como apresentado na Figura 34. Deste modo o AG retornou como ganhos para o controlador PI $k_p = 195,3506$ e $k_i = 0,0008$.

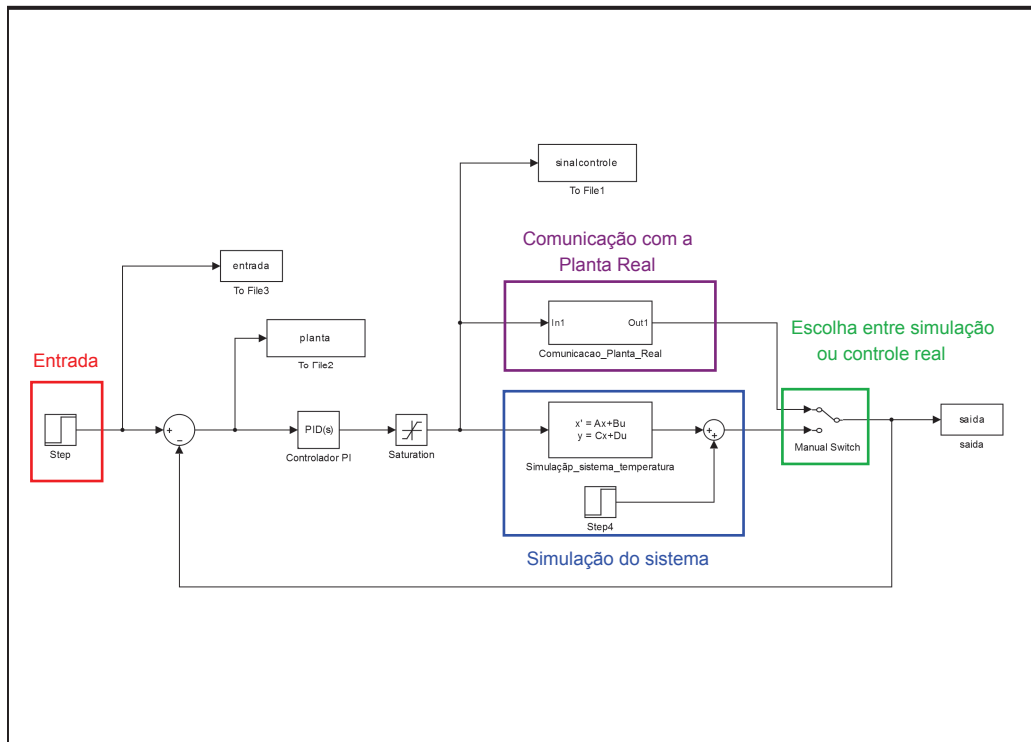


Figura 34: Estrutura para controle PI da malha de temperatura.
Fonte: Autoria própria.

8.2.2 CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS

A estrutura deste controle é a mesma utilizada pelo controlador robusto projetado para a malha de nível, Figura 9, a diferença neste caso é que os ganhos k_x e k_q foram determinados via Algoritmo Genético, no qual mais uma vez os códigos dos Apêndices *A*, *B* e *C* foram úteis, com a única diferença de que a faixa de busca foi estabelecida neste caso entre 0 e 100 para ambos os ganhos.

Para realizar a simulação e determinar os ganhos do controlador foi utilizado o sistema identificado dados pelas matrizes A_{temp} , B_{temp} , C_{temp} e D_{temp} mostradas nas Equações (43) - (46). Assim como feito para os outros controladores também foi criada, utilizando o MATLAB/SIMULINK, uma estrutura para simulação e controle real do sistema, apresentada na Figura 35.

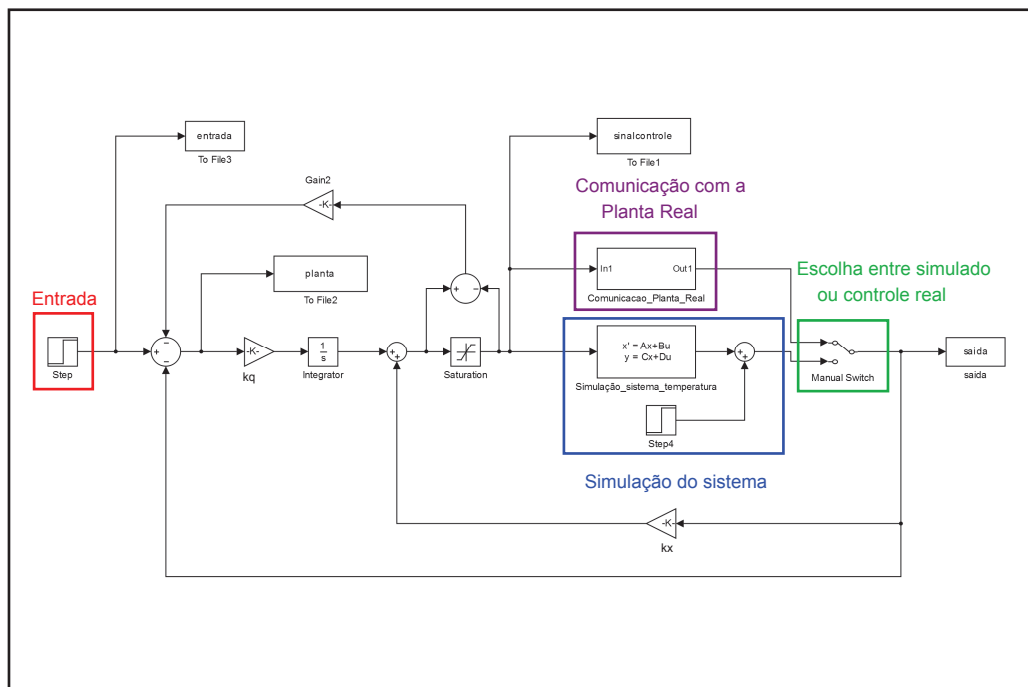


Figura 35: Estrutura para controle por realimentação de estados da malha de temperatura.
Fonte: Autoria própria.

Como resposta o Algoritmo Genético retornou os valores de $k_x = 99,0223$ e $k_q = 81,6053$.

8.3 INTERFACE PARA MANOBRA ENTRE AS MALHAS DE CONTROLE

A planta industrial didática utilizada neste trabalho possui interligação entre suas malhas de controle, assim é possível realizar troca de fluido entre os reservatórios, em virtude disso foi desenvolvida uma interface no MATLAB possibilitando tais manobras.

A Figura 36 mostra a interface desenvolvida, no qual o botão **Conectar** habilita e o botão **Desconectar** desabilita a comunicação entre o MATLAB e o microcontrolador, uma vez habilitada a comunicação é possível escolher qual a malha de origem e malha de destino do fluido. Uma vez escolhidas as malhas para troca de líquido é possível acionar ou desligar a bomba centrífuga por meio da interface, utilizando os comandos **Start** e **Stop** respectivamente. O botão **Leitura Sensor** habilita o sensor da malha de origem selecionada, retornando para o usuário o valor em tensão lido pelo microcontrolador referente a este sensor.

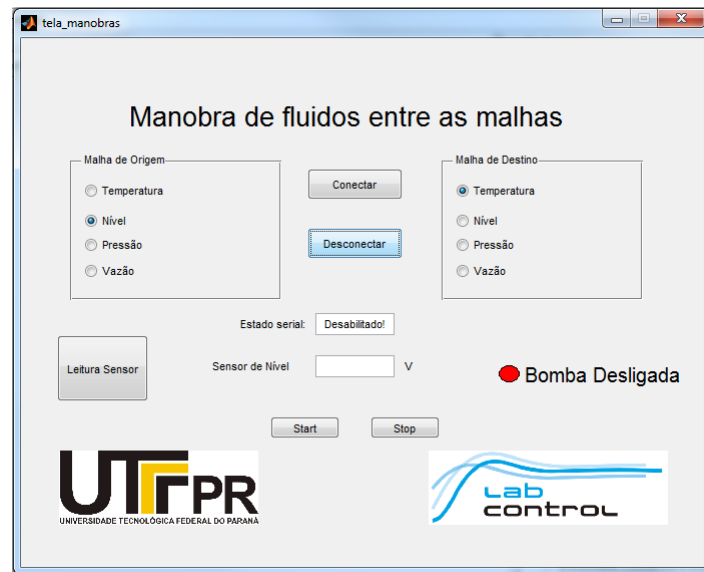


Figura 36: Interface de manobra.
Fonte: Autoria própria.

8.4 RESULTADOS MALHA DE NÍVEL

Para testar a eficácia de cada controlador na malha de nível, foram impostos ao sistema três diferentes degraus de entrada como referência, no qual para as primeiras 3500 amostras o valor de *setpoint* é de 130 *mm*, entre 3500 e 7000 amostras a referência sobe para 180 *mm* e depois cai para 150 *mm* até o término da simulação.

O primeiro controlador utilizado foi o PI. Na Figura 37 é mostrada a saída do sistema para esta técnica e é possível ver que a resposta para o sistema real e simulado convergiram para os degraus de entrada. É importante também ressaltar a semelhança entre as curvas geradas pelos sistemas real e simulado, o que ilustra a correta identificação do sistema.

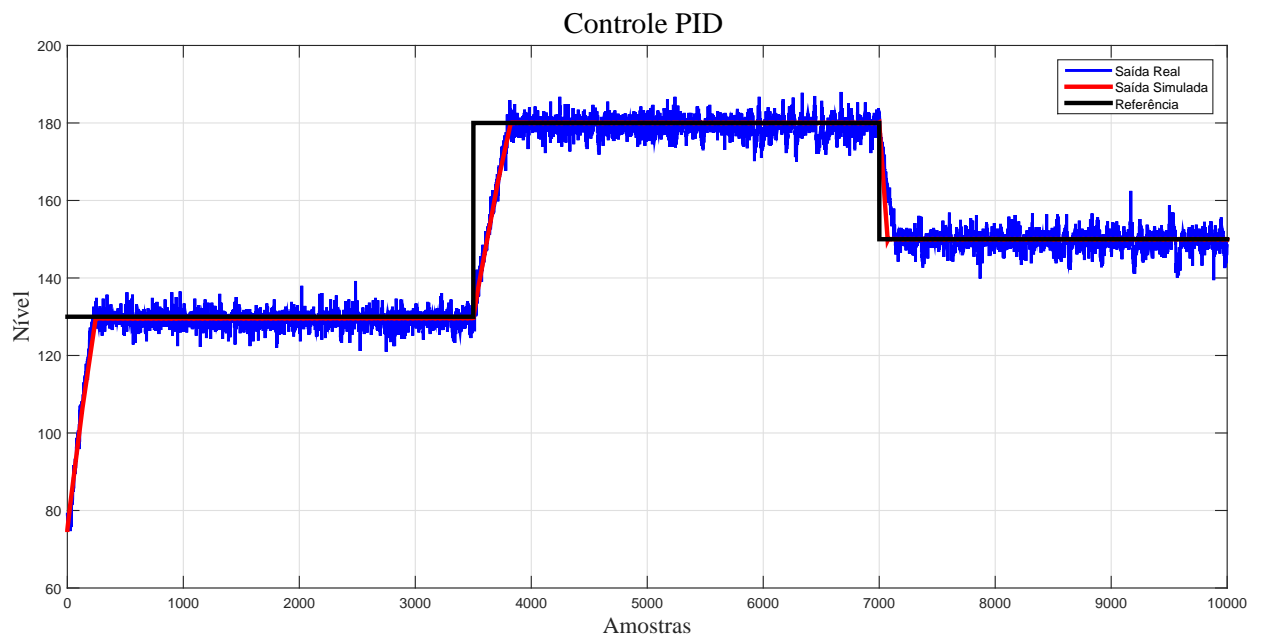


Figura 37: Resposta do sistema para controlador PI.
Fonte: Autoria própria.

Também foi analisado o sinal de controle gerado pelo controlador PI, que pode ser visto na Figura 38. É possível verificar que o sinal de controle real apresentou oscilações muito maiores do que as previstas na simulação. Tal característica não é muito interessante, pois pode causar desgaste excessivo na bomba centrífuga.

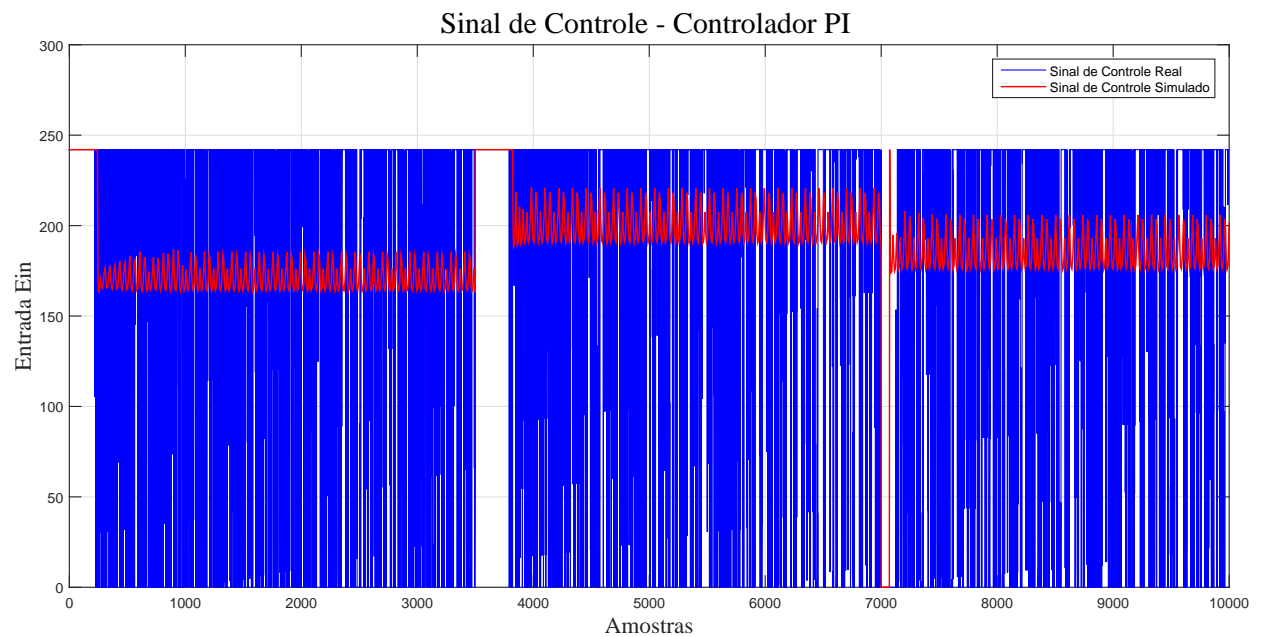


Figura 38: Sinal de controle para controlador PI.
Fonte: Autoria própria.

A segunda técnica utilizada foi o controle Robusto Misto, baseado nas normas H_2 e H_∞ . O comportamento da saída do sistema real e simulado para as referências impostas é mostrado na Figura 39, cuja resposta do sistema físico mais uma vez foi muito parecido com a simulação.

Este controlador obteve um resultado satisfatório, já que foi capaz de estabilizar a saída do sistema nos *setpoints*. Porém, dentre os três controladores utilizados, foi o que teve maior tempo de assentamento.

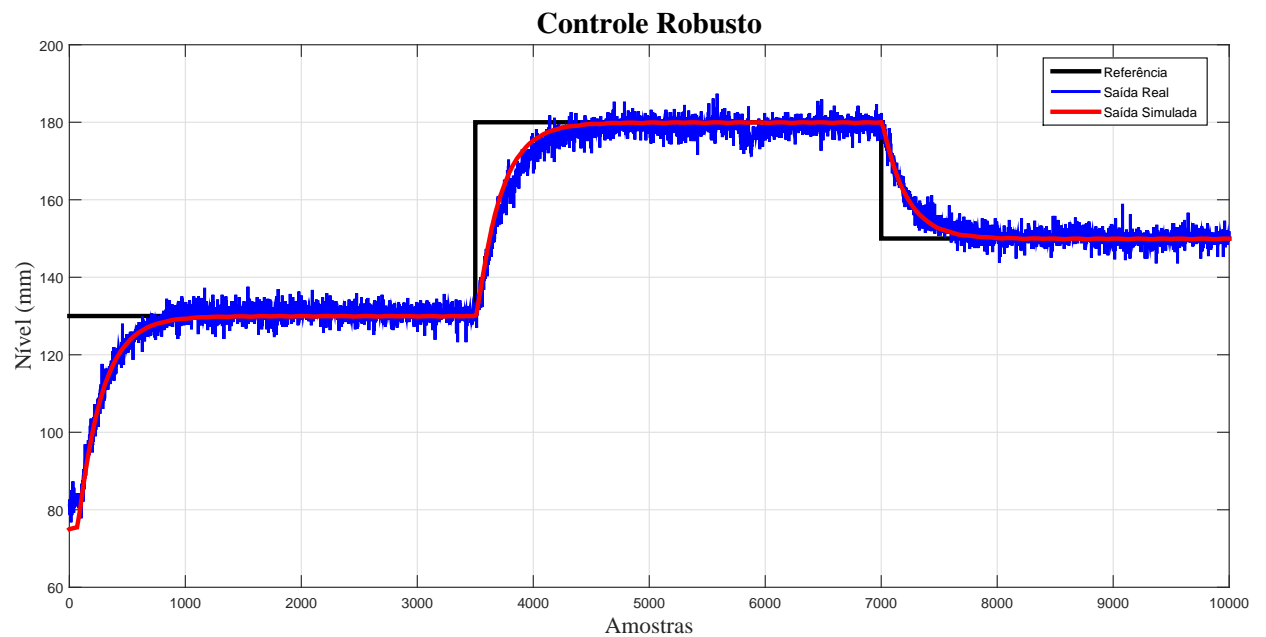


Figura 39: Resposta do sistema para controlador Robusto.
Fonte: Autoria própria.

O sinal de controle para o controle Misto, Figura 40, mais uma vez obteve grandes oscilações que não foram previstas pela simulação, assim neste caso também não é aconselhado a utilização deste controle em grandes períodos de tempo.

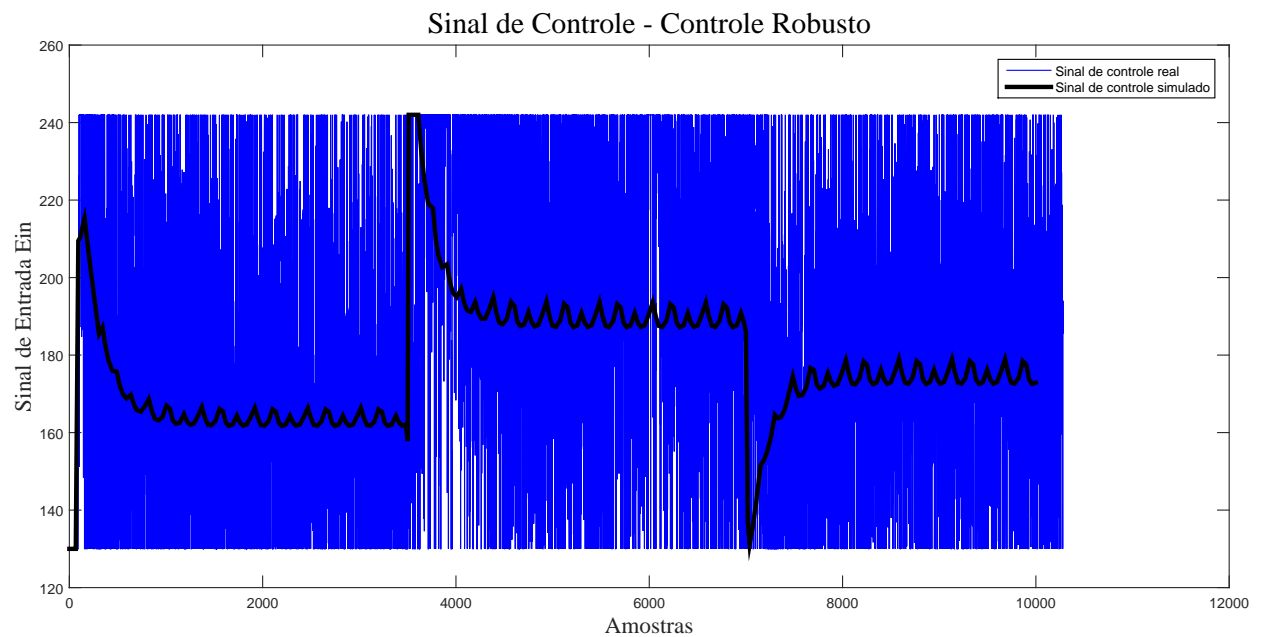
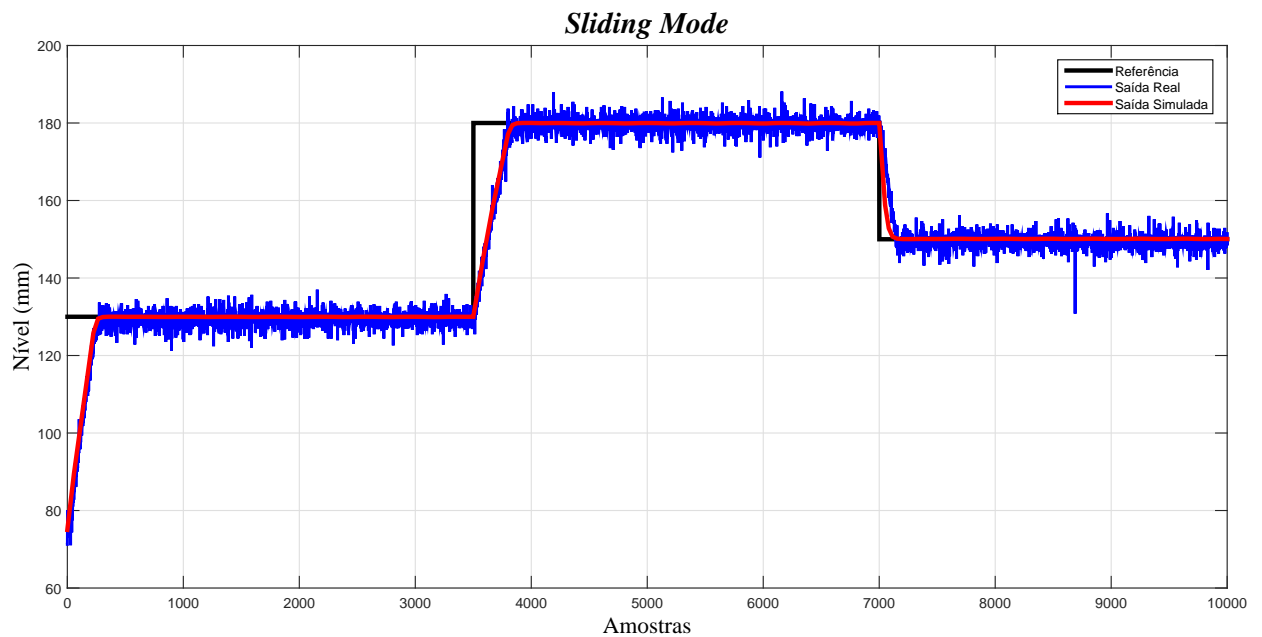


Figura 40: Sinal de controle para controlador Robusto.
Fonte: Autoria própria.

Para os controladores Robusto e PI, foram verificados sinais de controle muito ruidoso-

sos, que não foram previstos em simulação. Uma justificativa para tal é o fato de que ambas as técnicas foram baseadas em algoritmos de otimização para determinação dos ganhos do controlador, assim, como o modelo não considerava os ruídos presentes no sensor de nível, o sinal de controle real se tornou muito sensível à pequenas variações na leitura do nível.

A última técnica utilizada na malha de nível foi o controlador não linear *Sliding Mode*, cujas respostas do sistema, real e simulada, podem ser vistas na Figura 41. Este controlador se mostrou bastante eficaz, uma vez que buscou todas as referências impostas.



**Figura 41: Resposta do sistema para controlador *Sliding Mode*.
Fonte: Autoria própria.**

Embora o tempo de assentamento para as respostas do sistema utilizando o controle PI e *Sliding Mode* sejam semelhantes, o controlador não linear se mostrou o mais eficiente, pois dentre os três controladores foi o que apresentou menor oscilação no sinal de controle enviado à bomba centrífuga, Figura 42. Desta forma, o controle *Sliding Mode* é julgado o mais apropriado para este sistema.

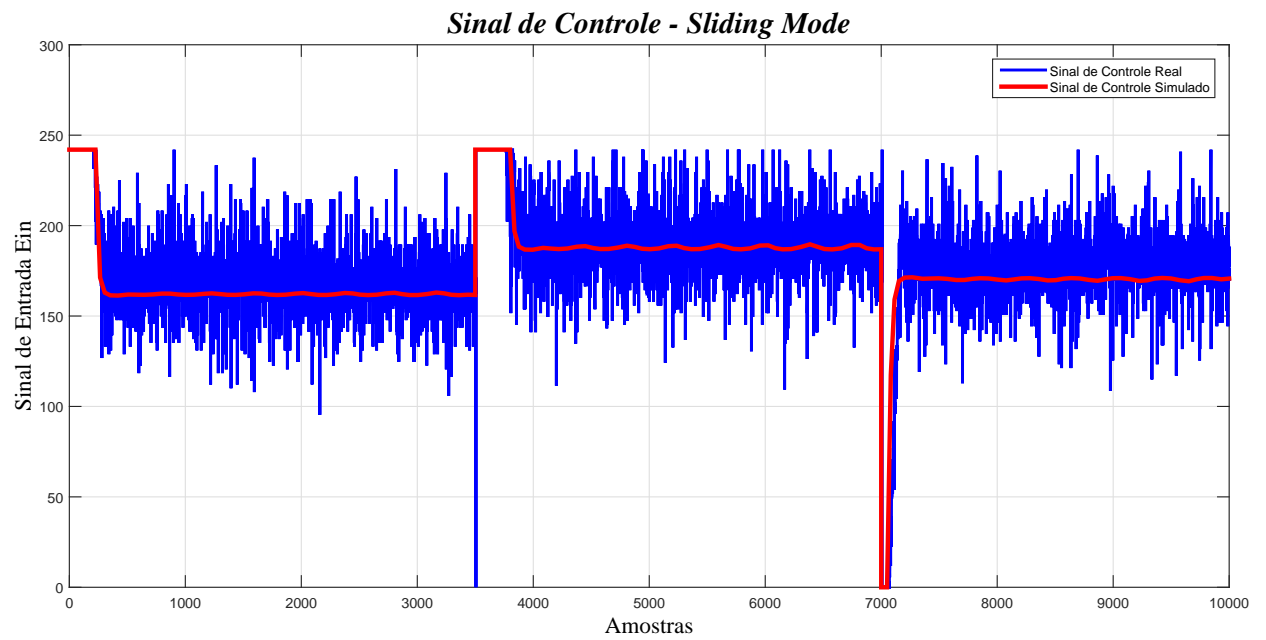


Figura 42: Sinal de controle para controlador *Sliding Mode*.
Fonte: Autoria própria.

8.5 RESULTADOS MALHA DE TEMPERATURA

Para a malha de temperatura foram utilizadas duas topologias diferentes de controladores, sendo o PI e realimentação de estados. Em ambos os casos foi atribuído um degrau de 50 °C como referência.

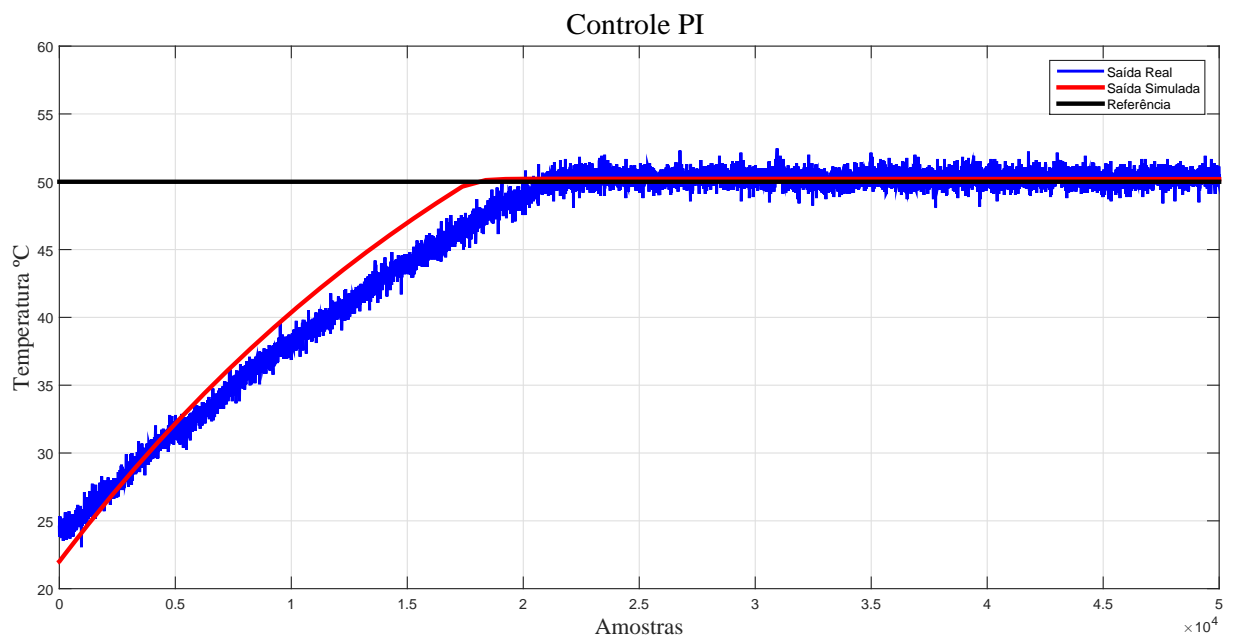


Figura 43: Resposta do sistema para controlador PI.
Fonte: Autoria própria.

O primeiro controlador a ser testado foi o PI, cuja resposta do sistema pode ser vista na Figura 43. Embora a saída do sistema simulado não tenha exatamente o mesmo comportamento do sistema real, os ganhos do controlador obtidos por meio do modelo se mostraram também eficientes para o sistema real, uma vez que foi capaz de seguir a referência.

Já o sinal de controle, mostrado na Figura 44, se mostrou bastante ruidoso para este controlador no sistema real, porém como neste caso o elemento que recebe o sinal de controle é uma resistência, este sinal não é tão nocivo ao seu funcionamento como para uma bomba.

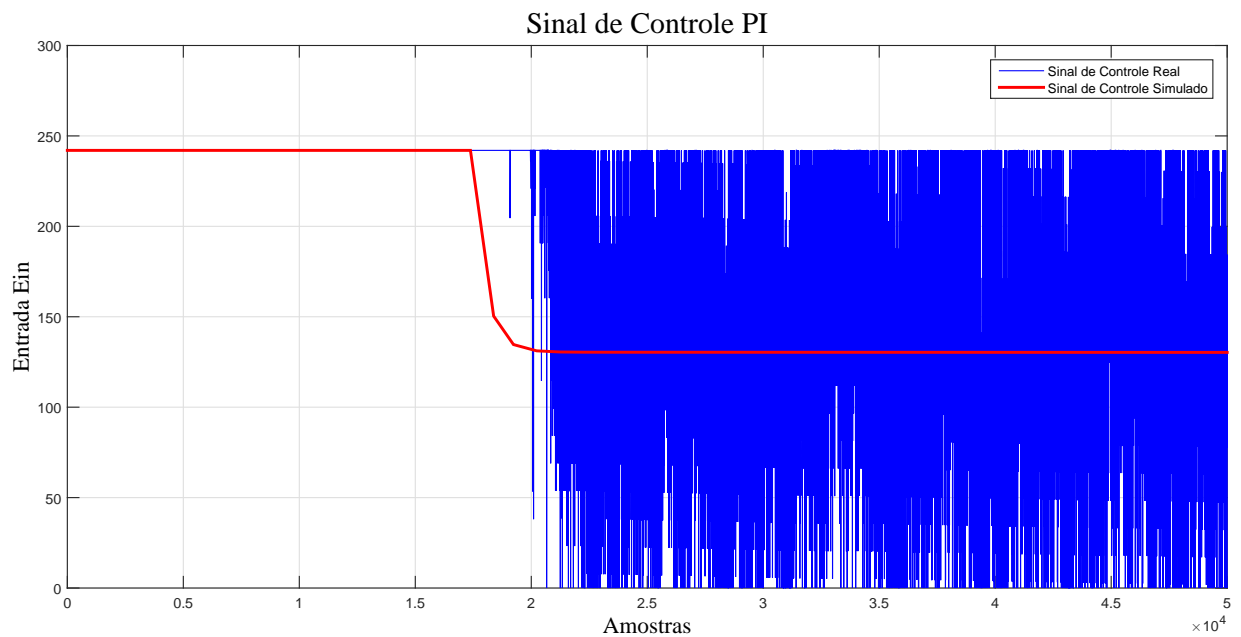


Figura 44: Sinal de controle para controlador PI.
Fonte: Autoria própria.

O outro controlador utilizado foi controle com realimentação de estados, no qual a saída do sistema, mostrada na Figura 46, seguiu a referência para o sistema simulado e sistema real, embora mais uma vez o comportamento de ambos não sejam tão semelhantes.

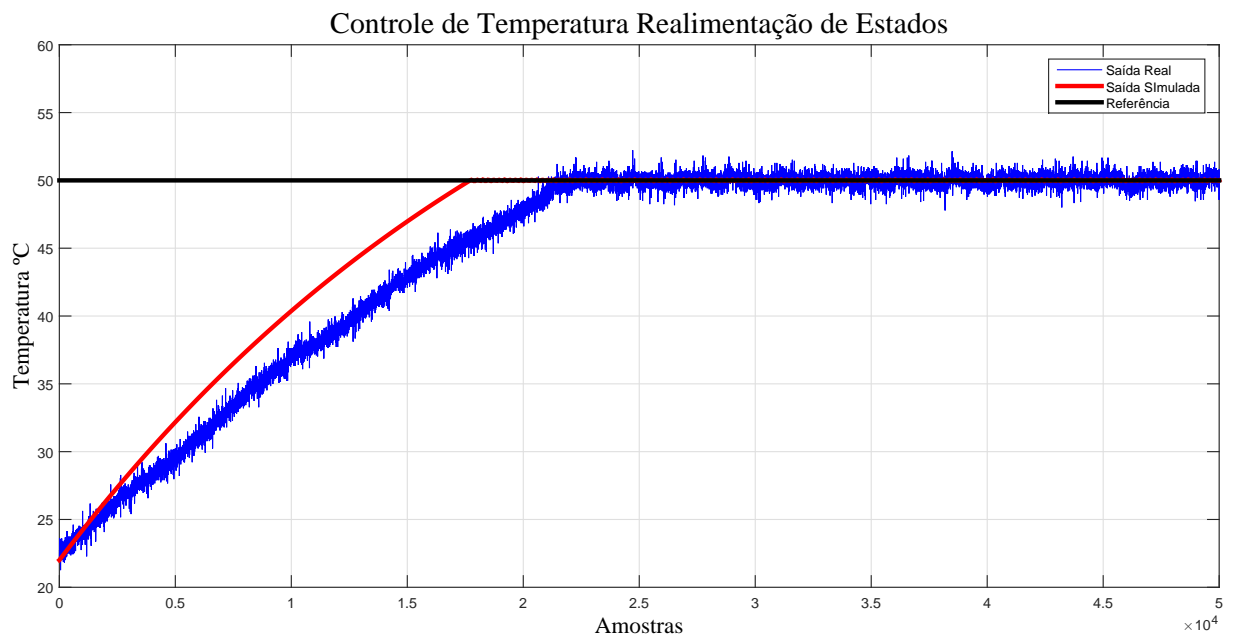


Figura 45: Resposta do sistema para realimentação de estados.
Fonte: Autoria própria.

O sinal de controle enviado para a resistência, utilizando a realimentação de estados, também obteve um comportamento bastante ruidoso, tanto para o sistema simulado quanto para o sistema real. Tal comportamento é dado na Figura 46.

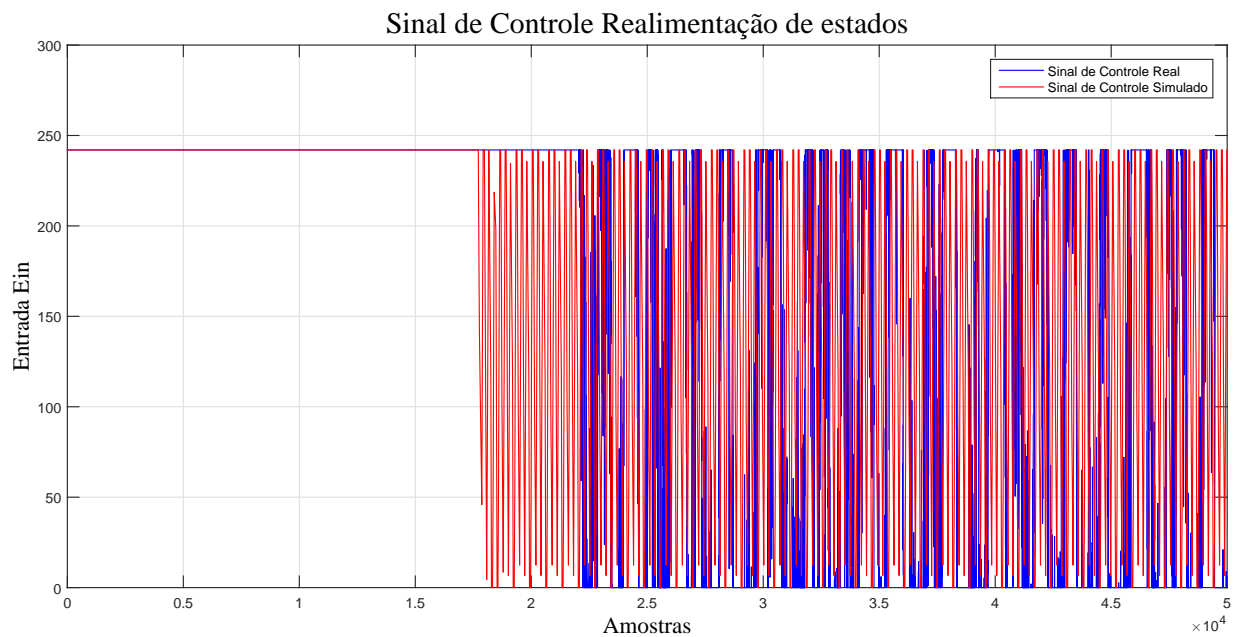


Figura 46: Sinal de controle para realimentação de estados.
Fonte: Autoria própria.

Na malha de temperatura os sinais de controle mais uma vez apresentaram ruídos e

outra vez a justificativa se baseia no fato de os ganhos do controladores terem sido encontrados via algoritmos de otimização, sendo que aqui o ruído no sensor Pt100 tornou o sinal de controle muito sensível, obtendo compensações que não eram esperadas.

9 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de uma interface entre o software MATLAB/SIMULINK e uma planta industrial didática desenvolvida pela Festo. Para realizar tal comunicação foi escolhido o microcontrolador PIC 18F4550 fabricado pela Microchip, tal dispositivo possui, dentre suas especificações, comunicação serial, portas analógicas e digitais, além do módulo *PWM* que foram os principais motivos que levaram a sua escolha.

Como o microcontrolador escolhido não possui compatibilidade com os níveis de tensões dos sensores e atuadores da planta, foi necessário o condicionamento destes sinais. Foi reutilizado um módulo de condicionamento de sinais, desenvolvido em trabalhos anteriores, o que facilitou o seguimento do projeto.

Criada a parte física do trabalho, foi desenvolvida a comunicação entre a interface e o software MATLAB/SIMULINK, que neste trabalho utilizou o padrão serial com uma velocidade de 9600 bps. No MATLAB/SIMULINK os blocos que realizam a transferência de dados entre os dispositivos, ficam alocados dentro de um *Subsystem*, como uma caixa preta, de modo que o usuário não necessita ter conhecimento prévio em eletrônica ou redes de comunicação para utilizar a interface.

A próxima etapa consistiu em identificar as malhas de controle utilizadas neste trabalho, este estágio foi bastante facilitado pela interface desenvolvida, uma vez que tais identificações foram baseadas nos sinais enviados e colhidos em cada malha.

Por fim, foram aplicadas diferentes técnicas de controle em cada malha com base nos modelos obtidos pelas identificações. Todos os controladores, em ambas as malhas, foram capazes de levar a saída do sistema até a referência estabelecida, embora existam algumas ressalvas, principalmente em relação ao sinal de controle em alguns casos. Com isso, foi atingido o principal objetivo do trabalho, pois foi validado o desenvolvimento de uma interface entre a planta industrial didática e o MATLAB/SIMULINK, de modo que a estrutura de controle fosse semelhante a estrutura de blocos que os estudantes de Engenharia estão acostumados em sala de aula, tal característica evidenciada pelo fato de que as estruturas de simulação e o controle

real são praticamente idênticas.

Outro resultado bastante interessante obtido no trabalho, foi a diversidade de controladores utilizados. Neste trabalho, foram aplicados o *Sliding Mode Control*, Controle PI, Controle por realimentação de estados no qual este teve seus ganhos determinados via Controle Robusto (malha de nível) e algoritmo genético (malha de temperatura), sendo que nenhum deles apresentou dificuldade no momento da implementação utilizando a estrutura de blocos.

Os modelos matemáticos identificados em cada malha foram fundamentais para a determinação da lei de controle em cada técnica, mostrando que com uma boa aproximação do sistema real é possível trabalhar com controladores que, embora seu desenvolvimento teórico seja mais complexo em relação aos convencionais, podem sim ser aplicados em sistemas físicos. É importante realçar aqui a qualidade da identificação obtida na malha de nível deste trabalho, no qual o comportamento da saída do sistema físico e simulado são muito semelhantes, com diferença praticamente apenas no ruído apresentado pelo sensor que não foi levado em consideração no momento da identificação. Já o modelo da malha de temperatura não teve o seu comportamento tão idêntico ao do sistema real. O fato do sistema ser muito lento dificultou a aquisição do comportamento do sistema em malha aberta, principalmente para tensões mais próximas da zona de saturação, o que dificultou uma análise mais precisa do comportamento do sistema em toda sua faixa de operação. Contudo, o modelo utilizado foi suficiente para determinar controladores que funcionassem tanto no ambiente de simulação quanto no físico.

Na malha de nível, o controlador que obteve destaque foi o *Sliding Mode Control* que levou a saída do sistema até a referência sem sobressinal e com o menor tempo de assentamento, sendo que o sinal de controle foi o menos ruidoso entre os controladores aplicados nesta malha. Tal resposta comprova as vantagens teóricas por trás deste controlador não linear, no qual diz que se trata de uma técnica um tanto quanto robusta em relação a variações nos parâmetros do modelo.

Ainda na malha de nível, a principal justificativa para as oscilações dos controladores PI e Robusto é o ruído transferido pelo sensor, que não foi levado em consideração no momento de determinar os ganhos destes dois controladores via simulação. Dentre algumas soluções é possível citar um filtro para este sinal antes da interferência do controlador, ou mesmo considerar este ruído como uma incerteza do modelo e determinar um ganho via controle robusto que leve em consideração tal incerteza além da não linearidade presente na bomba. Outra sugestão é inserir um bloco de controle *anti-windup*, uma vez que o sinal de controle oscilou muito entre os valores saturados.

O sinal de controle para a malha de temperatura, para ambas as técnicas utilizadas,

apresentou grandes oscilações que provavelmente foram causadas devido ao ruído na leitura do sensor de temperatura, contudo nesta malha o atuador é um componente puramente resistivo, deste modo esta variação não causa um dano tão significativo quanto em motores e bombas elétricas que é o caso da malha de nível.

Na malha de temperatura não foi utilizado nenhum tipo de controle não linear e nem robusto, no primeiro caso a não utilização desta técnica se justifica pelo fato de que o modelo matemático convencional de uma malha de temperatura ser puramente linear, apesar de haver não-linearidades no sistema físico que não foram consideradas no modelo. Já no caso do Controle Robusto é possível tratar a diferença entre o modelo matemático obtido pela identificação e o comportamento do sistema real e até mesmo a não linearidade presente na resistência como incertezas e determinar ganhos por meio das normas H_2 e H_∞ , porém em um sistema simples como o de temperatura a utilização desta técnica não se justifica, pois a utilização de técnicas convencionais funcionam muito bem.

Como trabalho futuro, é proposta a análise mais aprofundada sobre a teoria de controladores robustos, que aqui neste trabalho foi tratado de uma forma menos detalhada uma vez que o objetivo principal do trabalho era desenvolver a interface para utilização de diferentes controladores. Assim, poderia ser efetuada a junção entre as malhas presentes na planta didática, no qual incertezas como não linearidades na bomba e na resistência, ruídos dos sensores de temperatura e nível fossem levados em consideração, de modo a tornar um sistema mais complexo no qual a utilização de tal técnica tivesse de fato justificativa.

E como melhora do sistema também é proposta como trabalho futuro a padronização dos componentes no padrão SMD (dispositivos de montagem superficial), deixando o circuito menor e possibilitando desenvolver um envólucro conseqüentemente menor, diminuindo custo além de substituir o padrão serial pelo USB ("Universal Serial Bus"), deixando o projeto mais atualizado e compatível com os computadores presentes atualmente.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. et al. **Enciclopédia de automática: controle e automação**. 1^a.ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- AGULHARI, C. M. **Estabilidade e controle de sistemas lineares e variantes no tempo com parâmetros incertos**. 98 p. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- ALMEIDA, J. P. L. S. de. **Automação de uma Planta Didática de Sistemas de Controle**. 122f. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Cornélio Procópio, 2012.
- BONATTI, I. S. et al. **Linearidade em Sinais e Sistemas**. 1^a.ed. Campinas: Unicamp, 2013.
- BOYD, S. P. et al. **Linear matrix inequalities in system and control theory**. 1^a.ed. Philadelphia, Pennsylvania: SIAM, 1994.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 12^a.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2013.
- GREEN, M.; LIMEBEER, D. J. **Linear robust control**. 1^a.ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Courier Corporation, 2012.
- HAUPT, R. L. **Practical genetic algorithms**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2004.
- JUNIOR, P. A. F. **Automação e Controle Digital Assitido por Computador de uma de uma Planta Didática Industrial**. 122f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Cornélio Procópio, 2013.
- KHALIL, H. k. **Nonlinear Systems**. 3^a.ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**. 2^a.ed.: Brasport, 2008.
- MICROCHIP. **PIC 18F2455/2550/4455/4550 datasheet**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>. Acesso em: 7 de abril de 2016.
- MIYADAIRA, A. **Microcontroladores PIC18: Aprenda e Programe em Linguagem C**. São Paulo: 1^a Ed., Editora Érica, 2009.
- NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6^a.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010.
- OGATA, K. **Discrete-time control systems**. 2^a.ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5^a.ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2010.

SEDRA, A.; SMITH, K. **Microeletrônica**. 4^a.ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. **Controle Automático de processos industriais: instrumentação**. 2^a.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

SLOTINE, J.-J. E. **Applied Nonlinear Controle**. 1^a.ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1991.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. **Princípios e Prática do Controle Automático de Processo**. Rio de Janeiro, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA CONFIGURAÇÃO DO TOOLBOX DO ALGORITMO GENÉTICO DO MATLAB

```
1 % Codigo com configurações do AG - MATLAB
2 %% Limpa variaveis e fecha telas
3 clc;
4 clear all;
5 close all;
6 %% Configuracoes
7 ObjectiveFunction = @objetivo; % Indica qual funcao é a funcao objetivo
8 nvars = 2; % Numero de variaveis a serem buscadas
9 LB = [0 0]; % Limite inferior de busca
10 UB = [200 200]; % Limite superior de busca
11 options = gaoptimset('PopulationSize',20,'PopulationType','doubleVector',
12 'PopInitRange',[LB; UB]);
13
14 %% Inicia busca de parametros via AG
15 tic;
16 [x, fval,exitflag,output,final_pop] = ga(ObjectiveFunction, nvars, ...
17 [], [], [], [], [LB], [UB], [], options)
```


APÊNDICE B – FUNÇÃO OBJETIVO UTILIZADA NO TOOLBOX DO ALGORITMO GENÉTICO NO MATLAB

```
1 function [ erro_rms ] = objetivo( X )
2 kp=X(1); %Variavel kp
3 ki=X(2); %Variavel ki
4
5 ts=10000; %Tempo de simulacao
6 options = simset('SrcWorkspace','Current');
7 tic;
8 sim('Simula_nivel',ts,options); %Inicia simulacao do controle da ...
    malha de nivel/temperatura
9 toc;
10 load planta
11 erro_rms=rms(eplanta,0,ts); %Funcao objetivo é minimizar o erro_rms
12 load sinalcontrole
13
14 a = control(2,:);
15
16 if((max (a)) > 300) %Sinais de Controle acima da saturacao nao sao ...
    interessantes
17 erro_rms = 1000000000000;
18 end
19
20 end
```

APÊNDICE C – FUNÇÃO PARA O ERRO RMS

```
1  function RMS_total=rms(sig,ti,ts)
2
3  rms_1=0;
4
5  n=length(sig(1,:));
6  t_T=sig(1,end);
7  nti=(single(floor(ti/t_T*(n-1)))+1);
8  nts=(single(floor(ts/t_T*(n-1)))+1);
9  for i=nti:nts
10 rms_1 = rms_1 + sqrt((sig(2,i)*1000)^2);
11 end
12
13 RMS_total=rms_1/n;
14
15 end
```

APÊNDICE D – SIMULAÇÃO DO CONTROLE *SLIDING MODE* PARA A PLANTA DE NÍVEL.

```
1 function [dx u] = Ex_7_1_3_Slotine(t,x)
2 k = 20; %Definicao da constante k
3 h=x;
4 %% Tres diferentes referencias durante a simulacao para analisar o ...
   comportamento do controle
5 if(t<3500)
6 xr = 130;dxr = 0;ddxr = 0;
7 end
8 if((t>3500)&&(t<7000))
9 xr = 180;dxr = 0;ddxr = 0;
10 end
11 if(t>7000)
12 xr = 150;dxr = 0;ddxr = 0;
13 end
14 %% Lei de Controle
15 s=(h-xr); %Superficie S(t)
16 u = 18.2634 + 12.567*sqrt(h) - k*s; %Lei de Controle E_{in}
17 %% Saturacao da bomba
18 if(u>242)
19 u = 242;
20 end
21 if(u<0)
22 u = 0;
23 end
24 %% Saída do sistema
25 dx = 0.002315*u - 0.04228 - 0.029*sqrt(h);
26 return
```

**APÊNDICE E – CODIGO PARA DETERMINAÇÃO DOS GANHOS K_X E K_Q
UTILIZANDO CONTROLE MISTO.**

```

1 %% Codigo para determinacao dos ganhos Kx e Kq
2 clear all;rolmip('clearvar');close all;clc;warning off
3 %% Modelos dos sete sistemas linearizados
4 A1 = [-0.001280];
5 A2 = [-0.001221];
6 A3 = [-0.001118];
7 A4 = [-0.001032];
8 A5 = [-0.001248];
9 A6 = [-0.001889];
10 A7 = [-0.001135];
11
12 B1 = [0.0032337];
13 B2 = [0.0032337];
14 B3 = [0.0032337];
15 B4 = [0.0032337];
16 B5 = [0.0017167];
17 B6 = [0.0017167];
18 B7 = [0.0017167];
19
20 C = [1];
21 D = [0];
22 %% Matrizes A aumentadas
23 A1h=[A1 0;-C 0];
24 A2h=[A2 0;-C 0];
25 A3h=[A3 0;-C 0];
26 A4h=[A4 0;-C 0];
27 A5h=[A5 0;-C 0];
28 A6h=[A6 0;-C 0];
29 A7h=[A7 0;-C 0];
30
31 A = [A1h A2h A3h A4h A5h A6h A7h]; %Matriz A eh concatenacao de todas ...
    as matrizes A aumentadas

```

```
32
33 %% Matrizes B aumentadas
34 B1h = [B1;0];
35 B2h = [B2;0];
36 B3h = [B3;0];
37 B4h = [B4;0];
38 B5h = [B5;0];
39 B6h = [B6;0];
40 B7h = [B7;0];
41
42 B = [B1h B2h B3h B4h B5h B6h B7h]; %Matriz B eh concatenacao de todas ...
    as matrizes B aumentadas
43
44 I = eye(2);
45 Cz = 5*eye(2); %Prioridade para o tempo de assentamento
46 Dz = 2*[1;1]; %Prioridade para energia de controle
47
48 %% Determinacao das matrizes para o controle robusto
49 B1i = [0.1;0.1];
50 Czi = [0.1 0];
51
52 B12 = [1;1];
53
54 Dzui = [0];
55 Dzwi = [0];
56
57 %% Constantes definidas necessarias para determinacao do controlador
58 gama = 0.5;
59 xii = 0.01;
60 xi2 = 0.01;
61
62 outzi = size(Czi, 1);
63 order = length(A1h);
64 inpwi = size(B1i, 2);
65 inpu = size(B1h, 2);
66 %% Criacao das variaveis
67 poly_struct(A, 'A', 7, 1);
68 poly_struct(B, 'B', 7, 1);
69 poly_struct(B1i, 'B1i', 0, 0);
70 poly_struct(B12, 'B12', 0, 0);
71 poly_struct(Czi, 'Czi', 0, 0);
72 poly_struct(Dzui, 'Dzui', 0, 0);
73 poly_struct(Dzwi, 'Dzwi', 0, 0);
```

```

74 poly_struct(Cz, 'Cz', 0, 0);
75 poly_struct(Dz, 'Dz', 0, 0);
76 poly_struct(order, order, 'Pi', 'sym', 7, 1);
77 poly_struct(order, order, 'P2', 'sym', 7, 1);
78 poly_struct(inpwi, inpwi, 'Hi', 'full', 7, 1);
79 poly_struct(inpwi, inpwi, 'H2', 'full', 7, 1);
80 poly_struct(order, order, 'G', 'full', 0, 0);
81 poly_struct(inpu, order, 'Z', 'full', 0, 0);
82 poly_struct(gama, 'gama', 'scalar');
83 poly_struct(xii, 'xii', 'scalar');
84 poly_struct(xi2, 'xi2', 'scalar');
85 poly_struct(eye(inpwi), 'I2');
86 poly_struct(zeros(inpwi, order), 'zero');
87 poly_struct(2, 2, 'X', 'sym', 0, 0);
88
89 Term = parser_poly('Pi');
90 LMIs = construct_lmi(Term, '>');
91 clear Term;
92 Term = parser_poly('P2');
93 LMIs = [LMIs, construct_lmi(Term, '>')];
94 clear Term;
95 Term = parser_poly('X');
96 LMIs = [LMIs, construct_lmi(Term, '>')];
97
98 clear Term;
99 %% Norma H_{2}
100 Term{1,1} = parser_poly('-X');
101 Term{1,2} = parser_poly('Cz*G+Dz*Z');
102 Term{2,1} = parser_poly('(Cz*G+Dz*Z)''');
103 Term{2,2} = parser_poly('P2-G-G''');
104 LMIs = [LMIs, construct_lmi(Term, '<')];
105
106 clear Term;
107
108 Term{1,1} = parser_poly('A*G + G''*A'' + B*Z + Z''*B''');
109 Term{2,1} = parser_poly('P2 - G + xi2*(A*G + B*Z)''');
110 Term{3,1} = parser_poly('H2''*B12''');
111 Term{2,2} = parser_poly('-xi2*(G+G''')');
112 Term{3,2} = parser_poly('zero');
113 Term{3,3} = parser_poly('I2 - H2 - H2''');
114 LMIs = [LMIs, construct_lmi(Term, '<')];
115
116 clear Term;

```

```

117 %% Norma H_infinity
118 Term{1,1} = parser_poly('A*G + G'*A'' + B*Z + Z''*B''');
119 Term{2,1} = parser_poly('Pi - G + xii*(A*G + B*Z)''');
120 Term{3,1} = parser_poly('Czi*G + Dzui*Z');
121 Term{4,1} = parser_poly('-Hi''*Bli''');
122 Term{2,2} = parser_poly('-xii*(G+G''')');
123 Term{3,2} = parser_poly('xii*(Czi*G + Dzui*Z)');
124 Term{4,2} = parser_poly('zero');
125 Term{3,3} = parser_poly('-gama*I2');
126 Term{4,3} = parser_poly('-Hi''*Dzwi''');
127 Term{4,4} = parser_poly('I2 + Hi + Hi''');
128 LMIs = [LMIs, construct_lmi(Term, '<')];
129
130 clear Term;
131
132 polX = rolmip('getvar', 'X');
133 trX = trace(polX.data(1).value);
134
135 sol = solvesdp(LMIs, []) % Retorna como resultado os ganhos Kx e Kq
136
137 %sol = solvesdp(LMIs, trX)
138
139 [p, d] = checkset(LMIs)
140
141 if sum(p < 0) == 0
142 polZ = rolmip('getvar', 'Z');
143 polG = rolmip('getvar', 'G');
144 K = double(polZ.data(1).value)*inv(double(polG.data(1).value))
145 Norma = sqrt(trace(double(polX.data(1).value)))
146 else
147 disp('Infactivel');
148 a = 1;
149 end

```

ANEXO A – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA VERSUS TEMPERATURA DE UM SENSOR PT100

TABELA DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA PARA BULBO DE RESISTÊNCIA (PT 100)

| °C ITS-90 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | °C ITS-90 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| RESISTÊNCIA EM Ohms | | | | | | | | | | | | |
| -200 | 18.52 | | | | | | | | | | | -200 |
| -190 | 22.83 | 22.40 | 21.97 | 21.54 | 21.11 | 20.68 | 20.25 | 19.82 | 19.38 | 18.95 | 18.52 | -190 |
| -180 | 27.10 | 26.67 | 26.24 | 25.82 | 25.39 | 24.97 | 24.54 | 24.11 | 23.68 | 23.25 | 22.83 | -180 |
| -170 | 31.34 | 30.91 | 30.49 | 30.07 | 29.64 | 29.22 | 28.80 | 28.37 | 27.95 | 27.52 | 27.10 | -170 |
| -160 | 35.54 | 35.12 | 34.70 | 34.28 | 33.86 | 33.44 | 33.02 | 32.60 | 32.18 | 31.76 | 31.34 | -160 |
| -150 | 39.72 | 39.31 | 38.89 | 38.47 | 38.05 | 37.64 | 37.22 | 36.80 | 36.38 | 35.96 | 35.54 | -150 |
| -140 | 43.88 | 43.46 | 43.05 | 42.63 | 42.22 | 41.80 | 41.39 | 40.97 | 40.56 | 40.14 | 39.72 | -140 |
| -130 | 48.00 | 47.59 | 47.18 | 46.77 | 46.36 | 45.94 | 45.53 | 45.12 | 44.70 | 44.29 | 43.88 | -130 |
| -120 | 52.11 | 51.70 | 51.29 | 50.88 | 50.47 | 50.06 | 49.65 | 49.24 | 48.83 | 48.42 | 48.00 | -120 |
| -110 | 56.19 | 55.79 | 55.38 | 54.97 | 54.56 | 54.15 | 53.75 | 53.34 | 52.93 | 52.52 | 52.11 | -110 |
| -100 | 60.26 | 59.85 | 59.44 | 59.04 | 58.63 | 58.23 | 57.82 | 57.41 | 57.01 | 56.60 | 56.19 | -100 |
| -90 | 64.30 | 63.90 | 63.49 | 63.09 | 62.68 | 62.28 | 61.88 | 61.47 | 61.07 | 60.66 | 60.26 | -90 |
| -80 | 68.33 | 67.92 | 67.52 | 67.12 | 66.72 | 66.31 | 65.91 | 65.51 | 65.11 | 64.70 | 64.30 | -80 |
| -70 | 72.33 | 71.93 | 71.53 | 71.13 | 70.73 | 70.33 | 69.93 | 69.53 | 69.13 | 68.73 | 68.33 | -70 |
| -60 | 76.33 | 75.93 | 75.53 | 75.13 | 74.73 | 74.33 | 73.93 | 73.53 | 73.13 | 72.73 | 72.33 | -60 |
| -50 | 80.31 | 79.91 | 79.51 | 79.11 | 78.72 | 78.32 | 77.92 | 77.52 | 77.12 | 76.73 | 76.33 | -50 |
| -40 | 84.27 | 83.87 | 83.48 | 83.08 | 82.69 | 82.29 | 81.89 | 81.50 | 81.10 | 80.70 | 80.31 | -40 |
| -30 | 88.22 | 87.83 | 87.43 | 87.04 | 86.64 | 86.25 | 85.85 | 85.46 | 85.06 | 84.67 | 84.27 | -30 |
| -20 | 92.16 | 91.77 | 91.37 | 90.98 | 90.59 | 90.19 | 89.80 | 89.40 | 89.01 | 88.62 | 88.22 | -20 |
| -10 | 96.09 | 95.69 | 95.30 | 94.91 | 94.52 | 94.12 | 93.73 | 93.34 | 92.95 | 92.55 | 92.16 | -10 |
| 0 | 100.00 | 99.61 | 99.22 | 98.83 | 98.44 | 98.04 | 97.65 | 97.26 | 96.87 | 96.48 | 96.09 | 0 |
| 0 | 100.00 | 100.39 | 100.78 | 101.17 | 101.56 | 101.95 | 102.34 | 102.73 | 103.12 | 103.51 | 103.90 | 0 |
| 10 | 103.90 | 104.29 | 104.68 | 105.07 | 105.46 | 105.85 | 106.24 | 106.63 | 107.02 | 107.40 | 107.79 | 10 |
| 20 | 107.79 | 108.18 | 108.57 | 108.96 | 109.35 | 109.73 | 110.12 | 110.51 | 110.90 | 111.29 | 111.67 | 20 |
| 30 | 111.67 | 112.06 | 112.45 | 112.83 | 113.22 | 113.61 | 114.00 | 114.39 | 114.77 | 115.15 | 115.54 | 30 |
| 40 | 115.54 | 115.93 | 116.31 | 116.70 | 117.08 | 117.47 | 117.86 | 118.24 | 118.63 | 119.01 | 119.40 | 40 |
| 50 | 119.40 | 119.78 | 120.17 | 120.55 | 120.94 | 121.32 | 121.71 | 122.09 | 122.47 | 122.86 | 123.24 | 50 |
| 60 | 123.24 | 123.63 | 124.01 | 124.39 | 124.78 | 125.16 | 125.54 | 125.93 | 126.31 | 126.69 | 127.08 | 60 |
| 70 | 127.08 | 127.46 | 127.84 | 128.22 | 128.61 | 128.99 | 129.37 | 129.75 | 130.13 | 130.52 | 130.90 | 70 |
| 80 | 130.90 | 131.28 | 131.66 | 132.04 | 132.42 | 132.80 | 133.18 | 133.57 | 133.95 | 134.33 | 134.71 | 80 |
| 90 | 134.71 | 135.09 | 135.47 | 135.85 | 136.23 | 136.61 | 136.99 | 137.37 | 137.75 | 138.13 | 138.51 | 90 |
| 100 | 138.51 | 138.88 | 139.26 | 139.64 | 140.02 | 140.40 | 140.78 | 141.16 | 141.54 | 141.91 | 142.29 | 100 |
| 110 | 142.29 | 142.67 | 143.05 | 143.43 | 143.80 | 144.18 | 144.56 | 144.94 | 145.31 | 145.69 | 146.07 | 110 |
| 120 | 146.07 | 146.44 | 146.82 | 147.20 | 147.57 | 147.95 | 148.33 | 148.70 | 149.08 | 149.46 | 149.83 | 120 |
| 130 | 149.83 | 150.21 | 150.58 | 150.96 | 151.33 | 151.71 | 152.08 | 152.46 | 152.83 | 153.21 | 153.58 | 130 |
| 140 | 153.58 | 153.96 | 154.33 | 154.71 | 155.08 | 155.46 | 155.83 | 156.20 | 156.58 | 156.95 | 157.33 | 140 |
| 150 | 157.33 | 157.70 | 158.07 | 158.45 | 158.82 | 159.19 | 159.56 | 159.94 | 160.31 | 160.68 | 161.05 | 150 |
| 160 | 161.05 | 161.43 | 161.80 | 162.17 | 162.54 | 162.91 | 163.29 | 163.66 | 164.03 | 164.40 | 164.77 | 160 |
| 170 | 164.77 | 165.14 | 165.51 | 165.89 | 166.26 | 166.63 | 167.00 | 167.37 | 167.74 | 168.11 | 168.48 | 170 |
| 180 | 168.48 | 168.85 | 169.22 | 169.59 | 169.96 | 170.33 | 170.70 | 171.07 | 171.43 | 171.80 | 172.17 | 180 |
| 190 | 172.17 | 172.54 | 172.91 | 173.28 | 173.65 | 174.02 | 174.38 | 174.75 | 175.12 | 175.49 | 175.86 | 190 |
| 200 | 175.86 | 176.22 | 176.59 | 176.96 | 177.33 | 177.69 | 178.06 | 178.43 | 178.79 | 179.16 | 179.53 | 200 |
| 210 | 179.53 | 179.89 | 180.26 | 180.63 | 180.99 | 181.36 | 181.72 | 182.09 | 182.46 | 182.82 | 183.19 | 210 |
| 220 | 183.19 | 183.55 | 183.92 | 184.28 | 184.65 | 185.01 | 185.38 | 185.74 | 186.11 | 186.47 | 186.84 | 220 |
| 230 | 186.84 | 187.20 | 187.56 | 187.93 | 188.29 | 188.66 | 189.02 | 189.38 | 189.75 | 190.11 | 190.47 | 230 |
| 240 | 190.47 | 190.84 | 191.20 | 191.56 | 191.92 | 192.29 | 192.65 | 193.01 | 193.37 | 193.74 | 194.10 | 240 |
| 250 | 194.10 | 194.46 | 194.82 | 195.18 | 195.55 | 195.91 | 196.27 | 196.63 | 196.99 | 197.35 | 197.71 | 250 |
| 260 | 197.71 | 198.07 | 198.43 | 198.79 | 199.15 | 199.51 | 199.87 | 200.23 | 200.59 | 200.95 | 201.31 | 260 |
| 270 | 201.31 | 201.67 | 202.03 | 202.39 | 202.75 | 203.11 | 203.47 | 203.83 | 204.19 | 204.55 | 204.90 | 270 |
| 280 | 204.90 | 205.26 | 205.62 | 205.98 | 206.34 | 206.70 | 207.05 | 207.41 | 207.77 | 208.13 | 208.48 | 280 |
| 290 | 208.48 | 208.84 | 209.20 | 209.56 | 209.91 | 210.27 | 210.63 | 210.98 | 211.34 | 211.70 | 212.05 | 290 |