

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS HENRIQUE GOMES LOURENÇO

**MODELAGEM E CONTROLE PREDITIVO DE NÍVEL DE UM SISTEMA DE
TANQUES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

CARLOS HENRIQUE GOMES LOURENÇO

**MODELAGEM E CONTROLE PREDITIVO DE NÍVEL DE UM SISTEMA DE
TANQUES**

Trabalho de conclusão de curso apresentada
como requisito para a obtenção do título de
Engenheiro Eletricista pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – Campus
Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Francisco
Sanches Buzachero

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Henrique Gomes Lourenço

Modelagem e controle preditivo de nível de um sistema de tanques

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 24/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica 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). Luiz Francisco Sanches Buzachero - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

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

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

Vó Dita,

É com lagrimas nos olhos que penso hoje em como queria ter a senhora aqui comigo nesse momento para agradecer a todo carinho e amor. Tenho certeza que onde quer que esteja a senhora continua olhando por nós, como o anjo que sempre foi. Saudade eterna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, por ter me abençoado durante todos esses anos e me mantido forte nos momentos mais difíceis. Obrigado Senhor pela oportunidade de realizar meus sonhos, como era cursar engenharia elétrica, e por iluminar o meu caminho.

Aos meus pais só tenho a agradecer por todo o apoio, por acreditar sempre no meu potencial, pelo amor e carinho que nunca faltaram. Obrigado pela educação que me deram, pelos bons princípios que me passaram, o que faz de mim hoje uma pessoa de caráter.

A todos os meus irmãos que, apesar da distância, estão comigo sempre em pensamento.

Agradeço a toda minha família, em especial a minha avó Dona Amélia, por tudo que tem feito por mim em todos esses anos, por se preocupar e zelar por esse neto que tanto a ama.

Sou extremamente grato a todos os professores da UTFPR que colaboraram com a minha formação, em especial ao professor Luiz Buzachero pela orientação neste trabalho.

Aos meus amigos de graduação, Gabriela Payão, Igor Elias, Rafael Pereira, Marcelo Donizetti e Natanea Alves, entre outros, que tornaram esses anos de estudo muito melhores.

Ao prof. Dr. Kleber Romero Felizardo pelo tempo de orientação, sem o qual este trabalho não seria possível.

Agradeço ainda a minha namorada Adrielle Guerra, essa pessoa maravilhosa que Deus colocou em minha vida. Obrigado por me apoiar e acreditar na minha capacidade. Seu amor e companheirismo me servem a cada dia de motivação para seguir buscando melhorar sempre.

O distúrbio vem da ordem, a covardia surge da coragem, a fraqueza decorre da força.

(Sun Tzu)

RESUMO

LOURENÇO, Carlos Henrique Gomes. **Modelagem e Controle Preditivo de Nível de um Sistema de Tanques**. 2017. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho, propõe-se o estudo de técnicas de controle de nível aplicadas a um sistema de tanques. A planta é composta por dois tanques de vidro, uma bomba CC e um sensor ultrassônico. Microcontroladores Arduino foram utilizados para a comunicação Planta/Simulink a fim de monitorar o sinal referente ao nível, bem como transmitir as ações de controle a serem executadas. Duas técnicas de controle distintas foram aplicadas em ambiente Simulink, sendo uma baseada em um controle preditivo e a outra em controle clássico (PID) para efeito de comparação. O presente trabalho tem como objetivo a modelagem matemática do sistema a ser controlado, através da aplicação de métodos de identificação, bem como a utilização das técnicas de controle. Diante disso, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos para cada técnica aplicada para efeito de comparação de desempenhos. Embora as metodologias propostas mostraram-se efetivas, mais testes podem ser realizados visando otimizar o processo de controle.

Palavras-chave: Controle Preditivo Baseado em Modelo, Controle Clássico, Sistemas de Controle, Microcontrolador Arduino

ABSTRACT

LOURENÇO, Carlos Henrique Gomes. **Modeling and Predictive Level Control of a Tank System**. 2017. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

In this work, it is proposed the study of level control techniques applied to a tank system. The plant consists of two glass tanks, a DC pump and an ultrasonic sensor. Arduino Microcontrollers were used for the communication Plant/Simulink in order to monitor the signal referring to the level, as well as to transmit the control actions to be executed. Two different control techniques were applied in a Simulink environment, one based on a predictive control and the other on a classical control (PID) for comparison purposes. The present work aims at the mathematical modeling of the system to be controlled, through the application of identification methods, as well as the use of control techniques. Therefore, an analysis of the results obtained for each technique applied for the purpose of performance comparison is presented. Although the proposed methodologies were effective, more tests can be performed to optimize the control process.

Palavras-chave: Model Predictive Control, Classic Control, Control System, Arduino Microcontroller

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processo a ser controlado.....	16
Figura 2 - Sistema de controle em malha aberta (sem feedback).	16
Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada (com feedback).....	17
Figura 4 - Sistema dinâmico.....	20
Figura 5 - Controle PID de uma planta.....	23
Figura 6 - Resposta ao degrau unitário de uma planta.....	24
Figura 7 - Curva de resposta em forma de S.	24
Figura 8 - Oscilação com período P_{cr}	26
Figura 9 - Bloco de PID no Simulink.....	27
Figura 10 - Parâmetros do bloco de PID.....	28
Figura 11 - Diagrama de blocos da estrutura básica do MPC.	30
Figura 12 - Estratégia de atuação do MPC.....	31
Figura 13 - Bloco de MPC no Simulink.....	37
Figura 14 - Estrutura MPC Simulink	37
Figura 15 - Parâmetros do bloco de MPC.....	39
Figura 16 - Reservatório de líquido do Módulo de Nível e Temperatura 2325 Datapool...	40
Figura 17 - Distância percorrida pelo sinal ultrassônico.....	41
Figura 18 - Sensor Ultrassônico HC-SR04.....	41
Figura 19 - Diagrama de temporização dos pinos TRIG e ECHO.	42
Figura 20 - L298N.	43
Figura 21 - Ponte H.....	43
Figura 22 - Acionamento das chaves da ponte H.	44
Figura 23 - Arduino Uno.	45
Figura 24 - Arduino Mega 2560.....	45
Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de controle de nível.	46
Figura 26 - Esquemático para o controle de nível via Simulink.	47
Figura 27 - Ensaio em malha aberta.....	48
Figura 28 - Ensaio 1: Controle Preditivo.	49
Figura 29 - Ensaio 2: Controle Preditivo.	50
Figura 30 - Ensaio 3: Controle Preditivo Crescente.	51
Figura 31 - Ensaio 4: Controle Preditivo Decrescente.....	51
Figura 32 - Ensaio 5: Controle PI.....	52
Figura 33 - Ensaio 6: Controle PI.....	53
Figura 34 - Ensaio 7: Controle PI Crescente.	53
Figura 35 - Ensaio 8: Controle PI Decrescente.....	54
Figura 36 - Ensaio 9: Controle MPC-PI Crescente.....	55
Figura 37 - Ensaio 10: Controle PI-MPC Crescente.....	55
Figura 38 - Ensaio 11: Controle MPC-PI Decrescente.	56
Figura 39 - Ensaio 12: Controle PI-MPC Decrescente.	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. PROBLEMA	12
3. JUSTIFICATIVA	13
4. OBJETIVOS	14
4.1. OBJETIVO GERAL	14
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5. REVISÃO CONCEITUAL	15
5.1. SISTEMAS DE CONTROLE	15
5.2. MODELAGEM	17
5.2.1. Modelos Matemáticos	18
5.2.2. Função de Transferência	19
5.3. MODELOS EM VARIÁVEIS DE ESTADO	20
5.3.1. A Equação Diferencial de Estado	21
5.4. CONTROLE PID	22
5.4.1. Sintonia Manual de PID	23
5.4.1.1. Primeiro Método	24
5.4.1.2. Segundo Método	26
5.4.2. PID no Simulink	27
5.5. CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO	28
5.5.1. Estratégia do MPC	30
5.5.2. Formulação do MPC	31
5.5.2.1. Modelo de predição	32
5.5.2.2. Cálculo de $y_k + i k$ ao longo do horizonte de predição N_p	33
5.5.2.3. Função custo	34
5.5.2.4. Problema de otimização sem restrições operativas	35
5.5.2.5. Problema de otimização com restrições operativas	36
5.5.3. MPC no Simulink	37
6. MATERIAIS E MÉTODOS	40
6.1. PLANTA DIDÁTICA	40
6.2. SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04	41
6.3. MÓDULO DE ACIONAMENTO L298N	43
6.4. MICROCONTROLADOR ARDUINO	44
6.5. METODOLOGIA	46

6.5.1. Modelagem Matemática da Planta	47
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
7.1. RESULTADOS CONTROLE PREDITIVO.....	49
7.2. RESULTADOS CONTROLE PI.....	52
7.3. RESULTADOS MPC-PID.....	54
8. CONCLUSÕES	58
8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – CÓDIGO SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04 (ARDUINO 1).....	63
APÊNDICE B – CÓDIGO IMPLEMENTAÇÃO MPC MATLAB SIMULINK (ARDUINO 2).....	65

1. INTRODUÇÃO

Uma área de pesquisa que segue em constante ampliação é a automação, principalmente no setor industrial, pelo uso de dispositivos e aplicação de soluções desenvolvidas nesta área. A aplicação da automação industrial traz melhorias na qualidade dos processos, redução significativa no tempo de produção e otimização dos espaços e custos, além de poder substituir o trabalho humano em tarefas consideradas exaustivas, monótonas ou perigosas (PAREDE; GOMES, 2011).

Moraes e Castrucci (2007) definem automação industrial como “qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitui o trabalho humano, em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, rapidez da produção, dos serviços ou bem estar”.

O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência, sendo um componente importante e intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc. (OGATA, 2010).

Os controladores eletrônicos digitais apresentam algumas vantagens quando comparados aos analógicos, tais como: flexibilidade em alterações de parâmetros ou ganhos dos compensadores, uma vez que essas informações estão relacionadas apenas com dados armazenados nas memórias dos circuitos dos controladores, e não com valores de resistores e capacitores como ocorre nos analógicos; apresentam menor sensibilidade a variações de temperatura e umidade ambiental em comparação aos circuitos analógicos; possibilitam implementações de filtros digitais e algoritmos especiais como controle adaptativo, fuzzy, neural, etc. Diante disso, os controladores eletrônicos digitais vem sendo cada vez mais utilizados em malhas de controle de processos (DATAPOOL, 2003b).

Apesar de eficientes, a maioria das técnicas de controle utilizadas para o controle dos processos, principalmente na indústria, não têm a capacidade de otimizar aspectos como uso de energia e custos (OGUNNAIKE; RAY, 1994). A pesquisa de novas técnicas de controle capazes de otimizar os processos, de forma a atender especificações cada vez mais restritas, levou a criação do Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC, do inglês

Model Predictive Control). O MPC é capaz de efetuar uma predição do processo, baseado em um modelo matemático do sistema, e ainda determinar as melhores ações de controle a serem aplicadas no processo (CAMACHO; BORDONS, 2007).

Diante disso, esse trabalho tem como objetivo a modelagem de um sistema de tanques e aplicação dos conceitos de MPC para o controle de nível, visando a otimização do processo. Será utilizado ainda um controlador PID (proporcional integral derivativo) clássico para efeito de comparação.

2. PROBLEMA

Dada sua robustez e facilidade de implementação, segundo Carmo (2006), o controlador PID tem sido muito utilizado no controle de processos industriais. Apesar de se tratar de uma técnica considerada suficiente para grande parte dos processos (ASTROM; HAGGLUND, 1995), este tipo de controlador não é capaz de assimilar determinadas restrições operacionais do sistema, como eventuais distúrbios e falhas.

A grande maioria das aplicações bem sucedidas de MPC trata do caso do controle multivariável na presença de restrições, motivando a sua ampla distribuição para aplicações onde o controle tradicional geralmente chega perto de seus limites. MPCs adaptativos ou robustos tem atraído muito interesse tanto no meio acadêmico quanto na indústria (AGACHI; NAGY; CRISTEA, 2006). Além disso, segundo Maciejowski (2002), os MPCs levam em conta eventuais limitações dos atuadores presentes no sistema.

O MPC trata ainda distúrbios como restrições do sistema para a otimização de uma determinada função de maximização. Através da utilização de um modelo do processo o MPC é capaz de calcular, baseado em determinados horizontes de predição e controle, as ações de controle a serem aplicadas ao processo para garantir a otimização do mesmo (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

Neste trabalho, será realizada uma comparação entre o controlador convencional PID e o MPC, a fim de verificar as vantagens esperadas do MPC. Para a implementação destas técnicas de controle será desenvolvido um modelo do sistema de tanques para o controle de nível do líquido no reservatório. Para coleta da variável de processo será utilizado um sensor ultrassônico, HC-SR04.

3. JUSTIFICATIVA

Considerada uma das técnicas avançadas de controle de maior sucesso, o MPC tem se mostrado economicamente eficaz, principalmente na indústria química, através da redução de custos operacionais ou pelo aumento da produção. As razões para este sucesso dependem em particular da aplicação, mas estão relacionadas às habilidades do MPC em otimizar funções custo e ao tratamento de restrições (CAMACHO; BORDONS, 2007).

Os microcontroladores Arduino podem ser utilizados para a aquisição de dados, tendo em vista seu baixo custo e a possibilidade de comunicação com o *software* Simulink, que surge como uma opção viável devido à facilidade de implementação. Desta forma não é necessária a utilização do *software* livre IDE do Arduino para a programação dos microcontroladores, o que simplifica consideravelmente a utilização destes.

Tendo em vista que o MPC é uma técnica de controle não apresentada no plano de ensino do curso de Engenharia Elétrica desta instituição (UTFPR – Campus Cornélio Procopio), sua aplicação será vantajosa a nível de graduação, tanto pelos conceitos de sistemas de controle quanto pela familiarização com a *toolbox* MPC no ambiente Simulink com a utilização dos microcontroladores Arduino.

Neste trabalho a implementação dos controladores MPC e PID digital será então executada no ambiente Simulink, por meio de suas *toolboxes*, sendo os Arduinos utilizados como um sistema de aquisição de dados.

4. OBJETIVOS

4.1.OBJETIVO GERAL

Aplicar os conceitos do MPC para o controle de nível de um sistema de tanques, bem como realizar uma comparação com o desempenho do controle clássico PID.

4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar uma revisão conceitual sobre os sistemas de controle, PID, MPC, microcontroladores Arduino, Simulink e ainda sobre o sistema de tanques e os instrumentos de aquisição.

Modelagem matemática do sistema para que seja possível executar o controle preditivo (MPC) e o convencional PID.

Comunicar o microcontrolador Arduino com o software Simulink.

5. REVISÃO CONCEITUAL

5.1.SISTEMAS DE CONTROLE

Para que seja possível o melhor entendimento dos conceitos de sistemas de controle, Ogata (2010) define uma terminologia básica descrita a seguir.

Variável controlada e sinal de controle ou variável manipulada. A grandeza ou a condição medida e controlada é chamada de variável *controlada*. Por outro lado, aquela grandeza ou condição modificada pelo controlador, com a finalidade de causar efeito sobre a variável controlada, é tida como *sinal de controle* ou variável *manipulada*. Sendo assim, corrigir ou limitar os desvios do valor medido da variável controlada do sistema a partir de um valor desejado através da aplicação de um sinal de controle significa *controlar*.

Plantas. Uma planta pode ser uma parte de equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação.

Processo. Pode ser definido como uma operação natural de progresso contínuo ou um desenvolvimento caracterizado por uma série de modificações graduais que se sucedem umas às outras de modo relativamente estável, avançando em direção a dado resultado ou objetivo, ou uma operação contínua progressiva, artificial ou voluntária, que consiste em uma série de ações ou movimentos controlados, sistematicamente destinados a atingir determinados fins ou resultados.

Sistemas. É a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. A ideia de sistema não fica restrita apenas a algo físico. Tal conceito pode ser aplicado a fenômenos abstratos dinâmicos, como aqueles encontrados na economia. Dessa maneira, a palavra ‘sistema’ pode ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.

Distúrbios. É um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado dentro de um sistema, ele será chamado distúrbio *interno*, enquanto um distúrbio *externo* é aquele gerado fora do sistema e que se comporta como um sinal de entrada.

Controle com realimentação. Refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência e atua com base nessa diferença.

Segundo Dorf e Bishop (2013) um sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam uma configuração que irá fornecer uma resposta desejada. Eles afirmam ainda que a base de análise de um sistema é a base fornecida pela teoria do sistema linear, o que pressupõe uma relação de causa-efeito para os componentes do mesmo. Analogamente a esta relação causa-efeito tem-se, nos processos a serem controlados, a relação entrada-saída que por sua vez representa o processamento do sinal de entrada e o sinal da saída.

A Figura 1 ilustra a representação por um bloco de um processo a ser controlado.

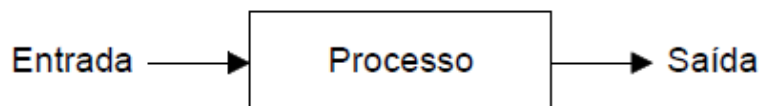


Figura 1: Processo a ser controlado.

Fonte: Dorf e Bishop (2013).

Quando um controlador e um atuador passam a ser utilizados para a obtenção da resposta desejada do processo, como ilustrado na Figura 2, trata-se de um sistema de controle em malha aberta. Tais sistemas utilizam atuadores para controlar diretamente o processo na ausência de *feedback* (DORF; BISHOP, 2013).

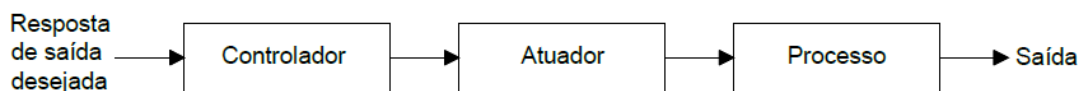


Figura 2 - Sistema de controle em malha aberta (sem feedback).

Fonte: Dorf e Bishop (2013).

Em contrapartida, quando a saída atual do processo (*feedback*) passa a ser medida e comparada à resposta de saída desejada tem-se um sistema de controle em malha fechada. Uma simples representação deste sistema pode ser feita através do diagrama de

blocos da Figura 3. A saída atual do processo trata-se de um sinal de realimentação (DORF; BISHOP, 2013).

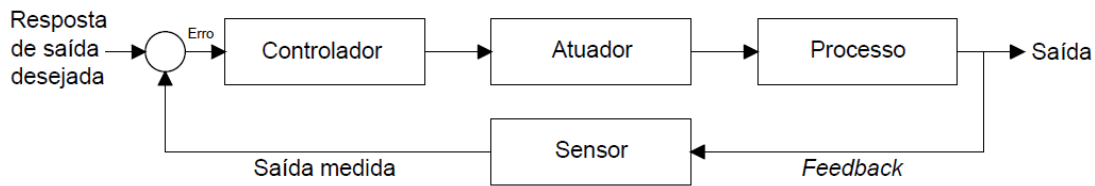


Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada (com feedback).

Fonte: Dorf e Bishop (2013).

Dorf e Bishop (2013) afirmam ainda que este tipo de sistema de controle, com realimentação, frequentemente utiliza a relação entre a saída atual e a referência de entrada para controlar o processo. Geralmente, a diferença entre a saída desejada e a saída atual é o erro, podendo ser ajustado pelo controlador.

Para o controle de diversos tipos de processos, as funções de controle são implementadas em unidades de processamento (microprocessadores) através de programas dedicados, estando estes armazenados nas memórias de tais unidades. Para a comunicação do controlador com a instrumentação do processo torna-se necessária a utilização de conversores analógicos-digitais (A/D) e conversores digitais-analógicos (D/A), que executam a conversão do sinal analógico proveniente do processo para um sinal digital compatível ao controlador, bem como o inverso (DATAPOOL, 2003b).

5.2.MODELAGEM

Para entender e controlar sistemas complexos deve-se obter modelos matemáticos quantitativos destes sistemas (DORF; BISHOP, 2013). Pode haver muitos modelos matemáticos que representem um mesmo sistema dinâmico. Esta modelagem é definida como um conjunto de equações que representam a dinâmica do sistema de forma bastante aceitável ou, até mesmo, com certa precisão (OGATA, 2010).

A dinâmica de muitos sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos ou outros pode ser descrita em termos de equações diferenciais obtidas pelas leis físicas que regem dado sistema. Deve-se sempre ter em mente que construir modelos matemáticos adequados é a parte mais importante da análise de sistemas de controle como um todo (OGATA, 2010).

5.2.1. Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos podem assumir muitas formas diferentes. Dependendo do sistema que é alvo de interesse e das circunstâncias particulares, um modelo matemático pode ser mais adequado do que outros. Por exemplo, em problemas de controle ótimo, é vantajoso usar representações no espaço de estados. Por outro lado, para a análise de resposta transitória ou de resposta de frequência de sistemas monovariáveis (a uma entrada e a uma saída), lineares e invariantes no tempo, a representação através de função de transferência pode ser mais conveniente do que qualquer outra. Uma vez obtido um modelo matemático de um sistema, várias ferramentas analíticas e de computador podem ser usadas para fins de análise e de síntese (OGATA, 2010).

A precisão de um modelo matemático pode ser melhorada aumentando-se a complexidade do mesmo, podendo chegar, em alguns casos, a centenas de equações para descrever um sistema completo. Deve-se, no entanto, estabelecer um compromisso entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise na obtenção de um modelo matemático. Portanto, quando não for necessária uma precisão extrema, é preferível obter apenas um modelo razoavelmente simplificado. No entanto, somente a proximidade do modelo matemático com o comportamento real de um dado sistema valida os resultados obtidos da análise (OGATA, 2010).

Em geral, na solução de um novo problema, considera-se desejável construir inicialmente um modelo simplificado de modo a se adquirir um conhecimento básico e geral para a solução. Posteriormente, um modelo matemático mais completo poderá ser então elaborado e utilizado para uma análise mais detalhada (OGATA, 2010). Em

resumo, Dorf e Bishop (2013) apresentam a abordagem para a modelagem de sistemas dinâmicos listada a seguir:

- a. Definir o sistema e seus componentes.
- b. Formular o modelo matemático e as principais hipóteses necessárias baseando-se em princípios básicos.
- c. Obter as equações diferenciais representando o modelo matemático.
- d. Resolver as equações para as variáveis de saída desejadas.
- e. Examinar as soluções e as hipóteses.
- f. Se necessário, analisar ou projetar novamente o sistema.

5.2.2. Função de Transferência

As relações de entrada-saída de componentes ou sistemas que podem ser descritos por equações diferenciais lineares invariantes no tempo são comumente caracterizadas pelas funções ditas *funções de transferência* (OGATA, 2010).

A função de transferência de um sistema representado por equações diferenciais lineares invariantes no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída (função resposta) e a transformada de Laplace do sinal de entrada (função excitação), na hipótese de que todas as condições iniciais são nulas (OGATA, 2010).

Ogata (2010) define o sistema linear invariante no tempo pela seguinte equação diferencial:

$$\begin{aligned}
 a_0 y^n + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} \dot{y} + a_n y \\
 = b_0 x^m + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} \dot{x} + b_m x
 \end{aligned} \tag{1}$$

$(n \geq m)$

onde y é o sinal de saída do sistema e x é o sinal de entrada. A função de transferência deste sistema é obtida tomando-se as transformadas de Laplace de ambos os membros da Eq. (2), na hipótese de que todas as condições iniciais são nulas.

$$\begin{aligned} \text{Função de Transferência} = G(s) &= \frac{\mathcal{L}[\text{Saída}]}{\mathcal{L}[\text{Entrada}]} \Big|_{\text{condições iniciais}=0} \\ &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)}s + a_n} \end{aligned} \quad (2)$$

A aplicabilidade do conceito da função de transferência é limitada a equações diferenciais lineares invariantes no tempo e, portanto, é amplamente usado na análise e no projeto de tais sistemas.

5.3. MODELOS EM VARIÁVEIS DE ESTADO

A pronta disponibilidade de computadores digitais torna prática a consideração da formulação no domínio do tempo de equações representando os sistemas de controle. As técnicas no domínio do tempo podem ser usadas para sistemas não lineares, variantes no tempo e multivariáveis.

Dorf e Bishop definem o *estado* de um sistema como um conjunto de variáveis cujos valores, em conjunto com os sinais de entrada e as equações descrevendo a dinâmica, irão fornecer o estado e a saída futuros do sistema.

As *variáveis de estado* $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$, que descrevem o estado de um sistema dinâmico, determinam o comportamento de um sistema quando o estado presente do sistema e os sinais de excitação são conhecidos (DORF; BISHOP, 2013).

A Figura 4 representa a forma geral de um sistema dinâmico, sendo $u(t)$ o sinal de entrada, $y(t)$ o sinal de saída e $x(0)$ as condições iniciais das variáveis de estado no instante t_0 .

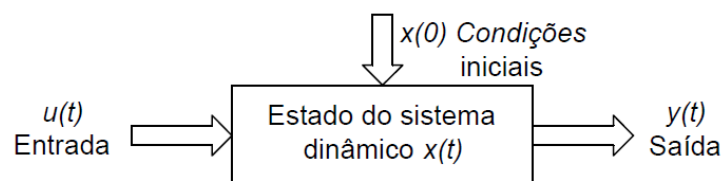


Figura 4 - Sistema dinâmico.

Fonte: Dorf e Bishop (2013)

Para este tipo de sistema, o conhecimento das condições iniciais das variáveis de estado e do sinal de entrada $x(t)$ e do sinal de entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$ é suficiente para determinar os valores futuros das saídas e das variáveis de estado (DORF; BISHOP, 2013).

5.3.1. A Equação Diferencial de Estado

A resposta de um sistema é descrita pelo sistema de equações diferenciais de primeira ordem escritas em função das variáveis de estado (x_1, x_2, \dots, x_n) e das entradas (u_1, u_2, \dots, u_m) (DORF; BISHOP, 2013). Este sistema de equações diferenciais pode ser escrito na forma matricial como a seguir:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

A matriz coluna consistindo nas variáveis de estado é chamada, segundo Dorf e Bishop (2013), de **vetor de estado** e é escrita como

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde o negrito indica um vetor. Eles definem ainda o vetor dos sinais de entrada como \mathbf{u} . Pode-se, então, representar o sistema pela notação compacta da **equação diferencial de estado**, ou equação de estado, como

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5)$$

A matriz \mathbf{A} é uma matriz quadrada $n \times n$, e \mathbf{B} é uma matriz $n \times m$. A equação diferencial de estado relaciona a taxa de variação do estado do sistema, o estado do sistema e os sinais de entrada (DORF; BISHOP, 2013). Em geral, as saídas de um sistema

linear podem ser relacionadas com as variáveis de estado e os sinais de entrada pela **equação de saída**

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \quad (6)$$

em que \mathbf{y} é o conjunto dos sinais de saída expressos na forma de um vetor coluna. A **representação em espaço de estados** (ou representação em variáveis de estado) consiste na equação diferencial de estado e na equação de saída (DORF; BISHOP, 2013).

5.4. CONTROLE PID

Em controle de processos industriais um controlador de três termos aparece como uma forma amplamente utilizada. Trata-se do **controlador PID** e pode ser representado pela função transferência a seguir (DORF; BISHOP, 2013).

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (7)$$

No domínio do tempo a equação passa a ser conforme a função de $u(t)$ a seguir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Segundo Dorf e Bishop (2013), este controlador é chamado de PID devido à presença de um termo proporcional (K_P), um integral (K_I) e um derivativo (K_D), tendo estes a finalidade de reduzir o tempo de acomodação, eliminar o erro de regime e aumentar a estabilidade do sistema, respectivamente.

O bom desempenho sob diversas condições de operação e a possibilidade de uma operação de forma simples e direta é o que torna os controladores PID, como apresentado na Figura 5, populares. Para se implementar o controlador PID, devem ser determinados seus três parâmetros (K_P , K_I e K_D) (DORF; BISHOP, 2013).

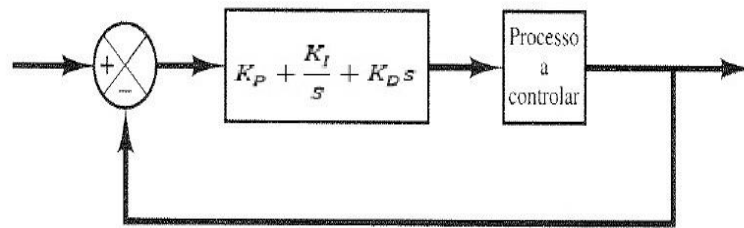


Figura 5 - Controle PID de uma planta.

Fonte: Dorf e Bishop (2013).

A determinação dos ganhos do controlador PID, processo conhecido por **sintonia de PID**, pode ser feita através de diversos métodos. A utilização de métodos de sintonia ditos **manuais**, nos quais os ganhos são determinados por tentativa e erro, com mínima análise, usando respostas ao degrau obtidas via simulação, ou em alguns casos, testes reais nos sistemas e decidindo-se os ganhos baseando-se em observações e experiência, surgem como uma abordagem bastante comum para este processo (DORF; BISHOP, 2013).

5.4.1. Sintonia Manual de PID

Dois métodos de sintonia do controlador PID foram apresentados por Ziegler-Nichols (OGATA, 2010), baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. Tais métodos são úteis para sistemas onde o modelo matemático da planta é desconhecido, e sugerem valores para os parâmetros do controlador de modo a proporcionar uma operação estável do sistema. Estes valores sugeridos geralmente não são os valores definitivos, podendo ser aplicada ainda uma série de sintonias finas para a obtenção do resultado esperado.

5.4.1.1. Primeiro Método

Neste método de sintonia a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, como mostra a Figura 6, é obtida experimentalmente. O aspecto de um S apresentado pela curva de resposta ao degrau unitário, como pode ser visto na Figura 7, pode ser explicado pela ausência de integradores ou polos complexos conjugados dominantes. Lembrando ainda que essa curva pode ser gerada experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta.

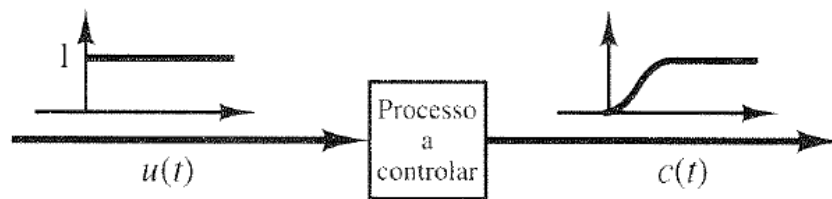


Figura 6 - Resposta ao degrau unitário de uma planta.

Fonte: Ogata (2010).

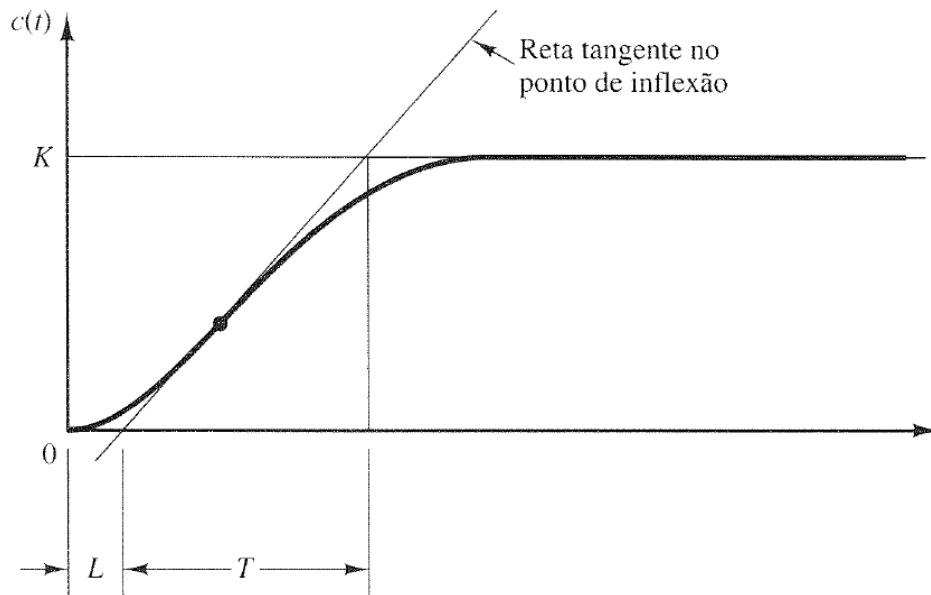


Figura 7 - Curva de resposta em forma de S.

Fonte: Ogata (2010).

A constante de tempo T e o atraso L caracterizam a curva em formato de S e são determinadas desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$. O sistema de primeira ordem com um atraso de transporte a seguir pode ser utilizado como uma aproximação para a função de transferência $C(s)/U(s)$.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (9)$$

A Tabela 1 a seguir apresenta as fórmulas propostas por Ziegler-Nichols para a escolha dos parâmetros do controlador.

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta.

Tipo de Controle	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3} \infty$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Autoria Própria.

Através deste método de sintonia o controlador PID gera uma resposta como apresentada abaixo:

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right) \\ &= 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \end{aligned} \quad (10)$$

Diante da formulação apresentada, o controlador tem um polo na origem e zeros duplos em $s = -1/L$.

5.4.1.2. Segundo Método

Neste método, os valores de T_i e T_d são definidos como ∞ e 0, respectivamente. Em seguida, usando apenas o termo proporcional, aumenta-se K_p de 0 para um valor crítico K_{cr} onde a saída apresenta as primeiras oscilações.

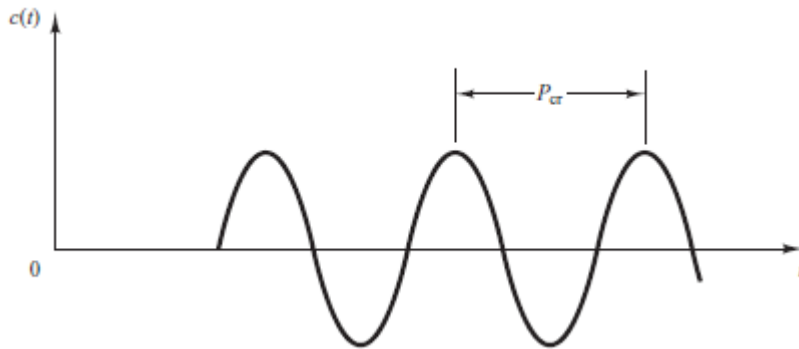


Figura 8 - Oscilação com período P_{cr} .

Fonte: Ogata (2010).

Desta forma, o ganho crítico K_{cr} e o período correspondente P_{cr} são determinados experimentalmente, conforme apresentado na Figura 8. Na Tabela 2 abaixo encontram-se as fórmulas sugeridas por Ziegler-Nichols para a definição dos parâmetros K_p , T_i e T_d .

Tabela 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} .

Tipo de Controle	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Autoria Própria.

Diante disso, a resposta para esse método de sintonia tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125P_{cr}s \right) \\
 &= 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned} \tag{11}$$

5.4.2. PID no Simulink

Blocos de controle PID, como o da Figura 9 abaixo, são encontrados nas bibliotecas do Simulink.

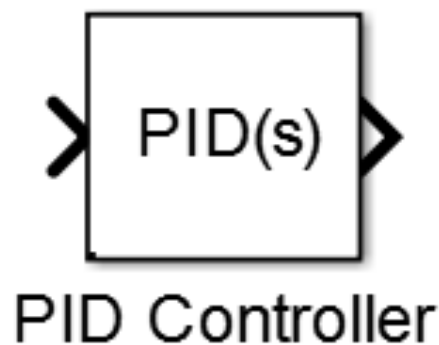


Figura 9 - Bloco de PID no Simulink.

Fonte: Mathworks (2017).

Este bloco recebe a diferença entre o sinal atual da saída medida da planta e o sinal de referência e gera uma ação de controle baseada nos parâmetros e características especificadas pelo usuário, como pode ser visto na Figura 10 (MATHWORKS, 2017).

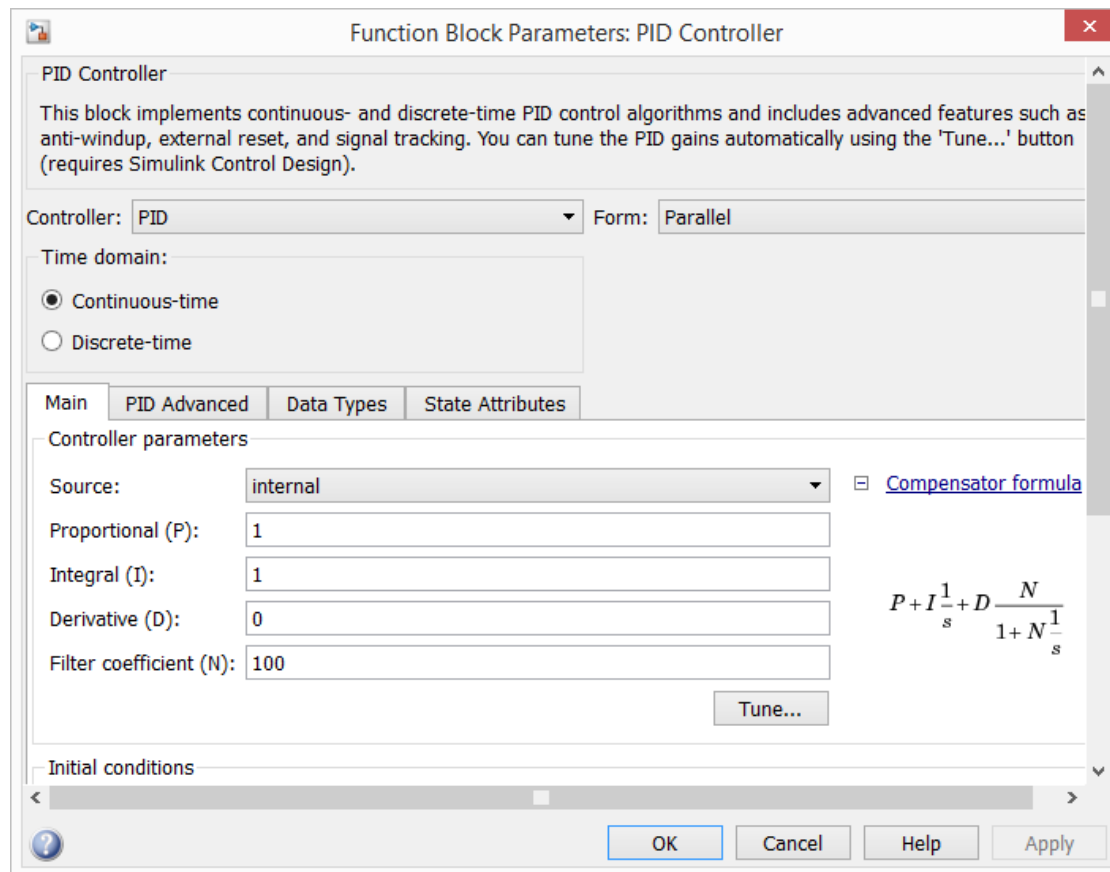


Figura 10 - Parâmetros do bloco de PID.

Fonte: Mathworks (2017).

5.5. CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

Desde a década de 70 os processos industriais já inspiravam o desenvolvimento de diferentes sistemas de controle baseados em modelo para o controle multivariável robusto. Foi então lançado simultaneamente por Richalet et al. (1976) e Cutler & Ramaker (1979), o controle preditivo baseado em modelo. Porém, esse campo passou a ser tratado com mais interesse nos anos 80, quando dois grupos pioneiros de pesquisa (Shell Oil e Adersa/Gerbios), baseados nos conceitos tratados anteriormente por Richalet et al. e Cutler & Ramaker, publicaram trabalhos de grande relevância para o segmento, sendo eles o DMC (Dynamic Matrix Control) e o MAC (Model Algorithmic Control), este último passando a ser comercializado com o nome de IDCOM, um acrônimo de

Identificação e Comando. Outro fator determinante para o crescimento desta área foi a organização da primeira exposição clara e concreta sobre o controle preditivo generalizado (GPC, do inglês Generalized Predictive Control).

A partir de então o MPC passou a ser utilizado, cada vez mais, nos mais diferentes ramos da indústria como uma importante, e eficiente, ferramenta de controle e otimização dos processos envolvidos. A causa desta crescente aceitação do MPC pela indústria deve-se principalmente as diversas vantagens que o mesmo apresenta frente a outros métodos de controle, tais como:

- O MPC pode ser utilizado nos mais variados processos, com diferentes níveis de complexidade, incluindo processos com grandes atrasos de tempo, não lineares, fase não-mínima, multivariáveis e processos instáveis;
- Para a compensação das perturbações mensuráveis, o controle de pré-alimentação (feedforward) pode ser inserido naturalmente no projeto do MPC;
- As restrições do sistema, caso existam, podem ser inseridas de maneira sistemática no projeto;
- O MPC tem ainda a capacidade de lidar com eventuais mudanças estruturais, como falhas de atuadores e sensores, mudanças nos parâmetros ou na estrutura do sistema, adaptando sua estratégia de controle com base na amostragem.

Em contrapartida, a grande desvantagem do controlador MPC é o tempo gasto na modelagem de um sistema dinâmico a partir de dados da planta.

Tendo em vista que este tipo de controle deve obedecer às restrições e à minimização de uma função objetivo em um determinado horizonte de controle, sua utilização se restringe a processos de dinâmica considerada lenta em relação à velocidade de processamento computacional (RAO; RAWLINGS, 2000).

5.5.1. Estratégia do MPC

O modelo de predição e o otimizador são os elementos mais importantes da estratégia MPC, como mostra o diagrama de blocos da Figura 11.

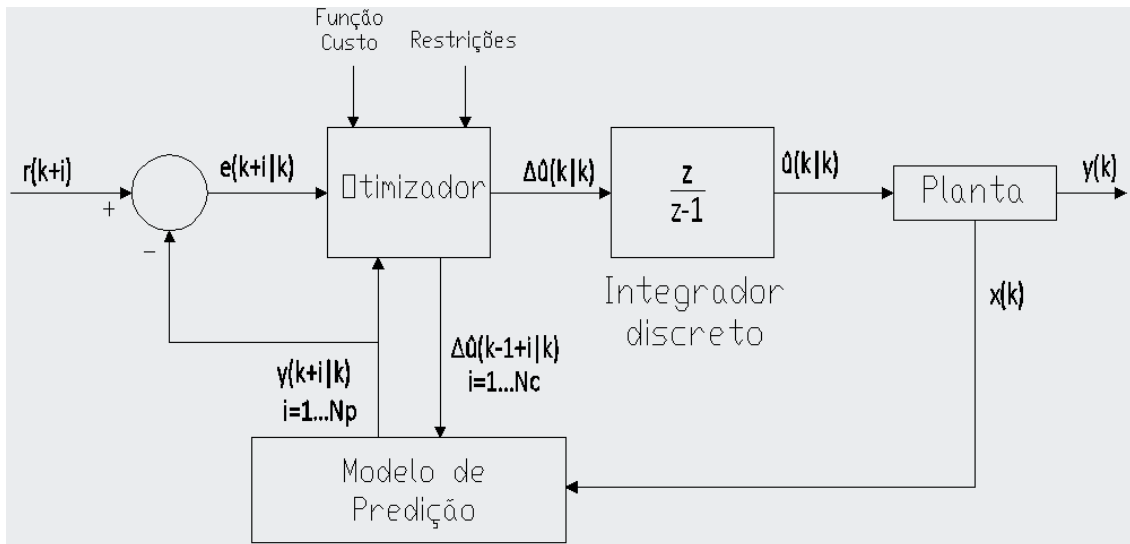


Figura 11 - Diagrama de blocos da estrutura básica do MPC.

Fonte: Adaptado de Camacho e Bordons. (2007).

A variável manipulada (saída de controle denominada $u(k) \in \mathfrak{R}^p$), a variável controlada (saída da planta denominada $y(k) \in \mathfrak{R}^q$) e o sinal de referência (setpoint denominado $r(k) \in \mathfrak{R}^q$) são a entrada, saída e referência da estrutura, respectivamente, no instante $k = nT_a$; sendo T_a o período de amostragem. O valor do estado no instante k é representado pelo vetor $x(k) \in \mathfrak{R}^n$ e deve-se utilizar um observador de estado para estima-lo, caso não esteja disponível para realimentação. O sinal de controle incremental $\Delta u(k)$ é dado pela seguinte equação:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (12)$$

Com base nas informações disponíveis até o instante k , as saídas preditas usando o modelo de predição são denotadas por $\hat{y}(k + i|k)$ para $i = 1, \dots, N_p$ e dependem do estado $x(k)$ no instante k e do sinal de controle $\hat{\Delta u}(k - 1 + i|k)$ para $i = 1, \dots, N_c$; sendo

N_p o horizonte de predição e N_c o horizonte de controle, ambos dados em múltiplos inteiros de T_a . Após o horizonte de controle N_c o sinal de controle $\hat{u}(k)$ permanece constante (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

A estratégia MPC pode ser melhor entendida através da análise da Figura 12.

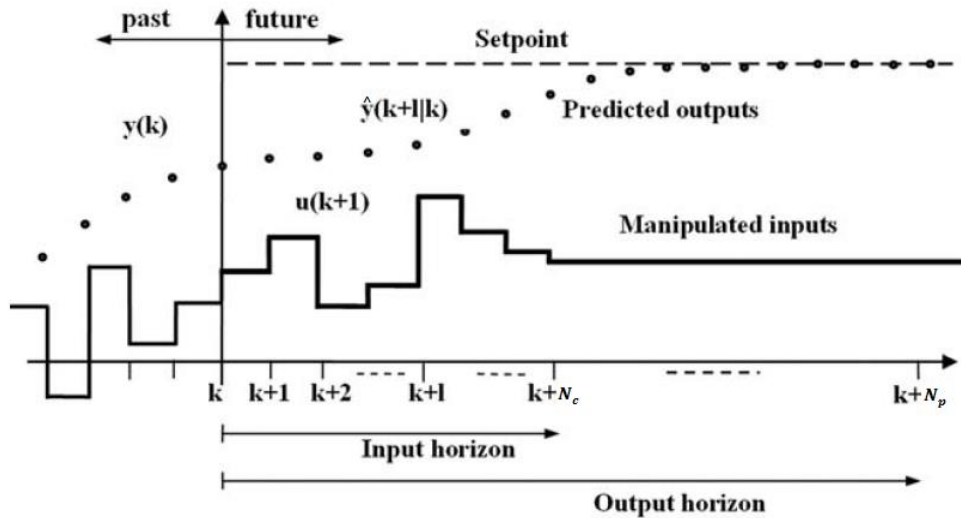


Figura 12 - Estratégia de atuação do MPC.

Fonte: Adaptado de Agachi et al. (2006).

Observe que $N_c \leq N_p$ e $\Delta \hat{u}(k-1+i|k) = 0$ para $i \geq N_c$; ou seja, o sinal de controle $\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k-1+N_c|k)$ para $N_c \leq i \leq N_p-1$; permanece constante após o horizonte de controle N_c (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

5.5.2. Formulação do MPC

A formulação de um MPC que possa ser utilizado no cálculo das predições da variável de saída $\hat{y}(k+i|k)$ ao longo do horizonte de predição N_p baseia-se em um modelo de predição no espaço de estado que será apresentado a seguir.

5.5.2.1. Modelo de predição

A forma de espaço de estado discreto, conforme as equações a seguir, é a mais utilizada para modelos lineares de predição em controladores do tipo MPC (CAMACHO; BORDONS, 2007).

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (13)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (14)$$

onde: A é a matriz de estado do modelo, $\in \mathfrak{R}^{n \times n}$;

B é a matriz das entradas do modelo, $\in \mathfrak{R}^{n \times p}$;

C é a matriz das saídas, $\in \mathfrak{R}^{q \times n}$.

O modelo de espaço de estado pode ser utilizado também na forma incremental que torna possível que o erro seja zerado para referências constantes, devido ao acréscimo de um integrador na planta de forma natural.

Combinando-se as equações do modelo (13) e (14) com a equação do sinal de controle (12) o modelo incremental pode ser representado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} x(k + 1) \\ u(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k - 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (15)$$

$$y(k) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k - 1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

O vetor de estado pode ser definido conforme a equação a seguir:

$$\tilde{x}(k) = [x(k) \quad u(k - 1)]^T \quad (17)$$

O modelo incremental pode ser então equacionado como a seguir (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\tilde{x}(k + 1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}\Delta u(k) \quad (18)$$

$$\tilde{y}(k) = \tilde{C}\tilde{x}(k) \quad (19)$$

sendo:

$$\check{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\check{B} = \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix}, \quad (21)$$

e

$$\check{C} = [C \quad 0]. \quad (22)$$

5.5.2.2. Cálculo de $\hat{y}(k+i|k)$ ao longo do horizonte de predição N_p

As equações (18) e (19) podem ser utilizadas para a obtenção da variável de saída $\hat{y}(k+i|k)$ para $i = 1, \dots, N_p$ conforme formulação a seguir (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k) &= \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+N_p|k) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \check{C}\check{A}\check{x}(k) + \check{C}\check{B}\Delta\hat{u}(k|k) \\ \check{C}\check{A}^2\check{x}(k) + \sum_{i=0}^1 \check{C}\check{A}^{1-i}\check{B}\Delta\hat{u}(k+i|k) \\ \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p}\check{x}(k) + \sum_{i=0}^{N_p-1} \check{C}\check{A}^{N_p-1-i}\check{B}\Delta\hat{u}(k+i|k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (23)$$

Pode-se ainda representar a variável de saída na forma matricial, como apresentado na equação a seguir (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\mathbf{y}(k) = \psi\check{x}(k) + \Theta\Delta\mathbf{u}(k) \quad (24)$$

onde:

$$\psi = \begin{bmatrix} \check{C}\check{A} \\ \check{C}\check{A}^2 \\ \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \check{C}\check{A} & 0 & \cdots & a_{1n} \\ \check{C}\check{A}\check{B} & \check{C}\check{B} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p-1}\check{B} & \check{C}\check{A}^{N_p-2}\check{B} & \cdots & \check{C}\check{A}^{N_p-N_c}\check{B} \end{bmatrix} \quad (26)$$

e

$$\Delta u(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + N_c - 1|k) \end{bmatrix}. \quad (27)$$

5.5.2.3. Função custo

O MPC atua na otimização de uma função custo como a apresentada a seguir:

$$J(k) = \sum_{i=N_w}^{N_p} \|\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{\mathfrak{R}}^2 \quad (28)$$

onde:

N_p representa o horizonte máximo de predição;

N_w representa o horizonte mínimo de predição;

N_c representa o horizonte de controle;

$\|\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{\mathfrak{R}}^2$ e $\|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_Q^2$ representa uma norma euclidiana ponderada por \mathfrak{R} e Q que são matrizes simétricas semidefinidas positivas.

A função custo pode ainda ser representada na forma matricial (MACIEJOWSKI, 2002):

$$J(k) = \|y(k) - r(k)\|_Q^2 + \|\Delta u(k)\|_R^2 \quad (29)$$

onde:

$$r(k) = \begin{bmatrix} r(k + N_w|k) \\ \vdots \\ r(k + N_p|k) \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q \end{bmatrix}_{q(N_p - N_w + 1) \times q(N_p - N_w + 1)} \quad (31)$$

e

$$R = \begin{bmatrix} \mathfrak{R} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathfrak{R} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathfrak{R} \end{bmatrix}_{pN_c \times pN_c} \quad (32)$$

5.5.2.4. Problema de otimização sem restrições operativas

Substituindo-se a equação de predição (23) na função custo (28), a mesma pode ser escrita da seguinte forma (MACIEJOWSKI, 2002):

$$J(k) = \Delta u(k)^T \mathcal{H} \Delta u(k) - \Delta u(k)^T \mathcal{G} + \mathcal{C} \quad (33)$$

onde:

$$\mathcal{G} = 2\Theta^T Q \mathcal{E}(k), \quad (34)$$

$$\mathcal{H} = \Theta^T Q \Theta + R, \quad (35)$$

$$\mathcal{C} = \mathcal{E}(k)^T Q \mathcal{E}(k), \quad (36)$$

e

$$\mathcal{E}(k) = r(k) - \psi \tilde{x}(k). \quad (37)$$

A minimização desta função custo, na ausência de restrições, possui uma solução analítica exata devido ao seu caráter quadrático em $\Delta u(k)$, sendo a matriz \mathcal{H} positiva para $Q \geq 0$ e $R > 0$. O gradiente da equação (37) pode ser igualado a zero para o cálculo da solução analítica

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \Delta u(k)} = -\mathcal{G} + 2\mathcal{H} \Delta u(k) \quad (38)$$

resultando na sequencia ótima do sinal de controle apresentada a seguir:

$$\Delta u^*(k) = \frac{1}{2} \mathcal{H}^{-1} \mathcal{G} \quad (39)$$

5.5.2.5. Problema de otimização com restrições operativas

Restrições sobre a amplitude e variação no sinal de controle e de saída podem ser incorporadas à função custo para que se torne possível o tratamento de restrições operacionais do processo, garantindo que estes sinais se encontrem em faixas pré-determinadas como:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta \hat{u}(k-1+i|k) \leq \Delta u_{max}; i = 1, \dots, N_c \quad (40)$$

$$u_{min} \leq \hat{u}(k-1+i|k) \leq u_{max}; i = 1, \dots, N_c \quad (41)$$

$$y_{min} \leq \hat{y}(k+i|k) \leq y_{max}; i = 1, \dots, N_p \quad (42)$$

onde:

Δu_{min} e Δu_{max} representam os limites mínimo e máximo do sinal de controle incremental;

u_{min} e u_{max} representam os limites mínimo e máximo do sinal de controle;

y_{min} e y_{max} representam os limites mínimo e máximo do sinal de saída.

A seguinte expressão de desigualdade é capaz de representar esses limites em função do vetor $\Delta u(k)$ (MACIEJOWSKI, 2002):

$$\Omega \Delta u(k) \leq \varpi \quad (43)$$

onde Ω e ϖ são matrizes de dimensões apropriadas. Diante disto, o objetivo do problema de otimização trata de minimizar a função custo quadrática levando em consideração tais desigualdades lineares (restrições), como apresentado pela seguinte formulação:

$$\text{minimizar } u(k)^T \mathcal{H} \Delta u(k) - \Delta u(k)^T \mathcal{G} + \mathcal{C} \quad (44)$$

sujeito a

$$\Omega \Delta u(k) \leq \varpi \quad (45)$$

5.5.3. MPC no Simulink

A biblioteca do Simulink conta com blocos de MPC, como o da Figura 13.

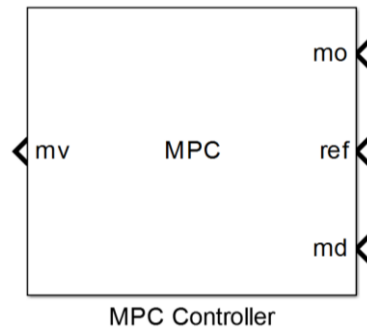


Figura 13 - Bloco de MPC no Simulink.

Fonte: Mathworks (2017).

Este bloco recebe o sinal atual da saída medida mo (*measured output*), o sinal de referência ref e um sinal opcional de perturbação medida md (*measured disturbance*), e gera uma resposta ótima para as variáveis manipuladas mv (*manipulated variables*) baseada em uma solução de caráter quadrático (MATHWORKS, 2017).

A estrutura do modelo abordada pela toolbox MPC no Simulink aparece na Figura 14 abaixo.

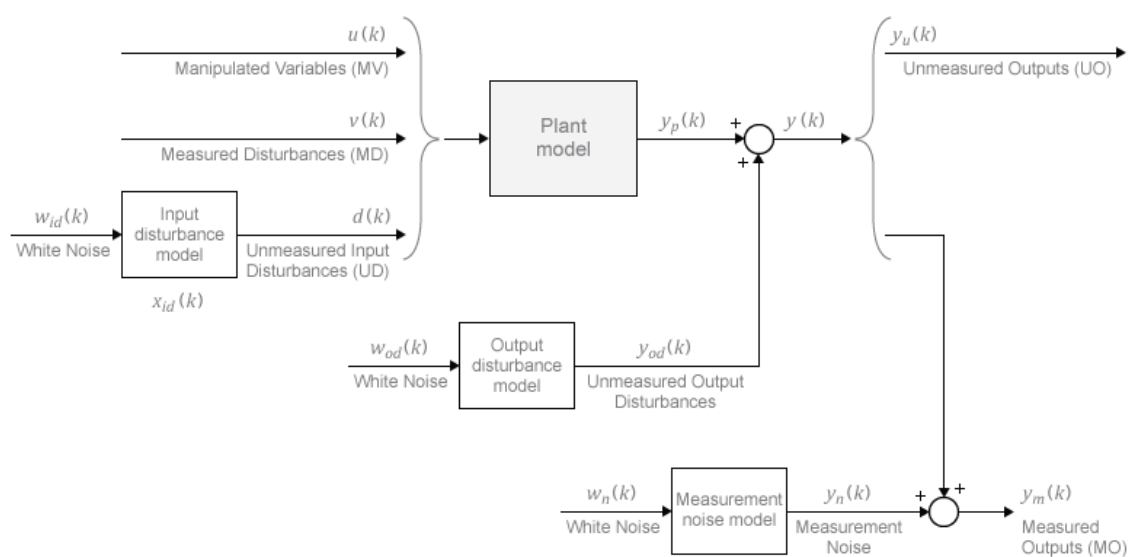


Figura 14 - Estrutura MPC Simulink

Fonte: Mathworks (2017).

O modelo da planta pode ser especificado a partir de função transferência, espaço de estados e outros modelos numéricos invariantes no tempo.

O controlador MPC executa todos os cálculos de estimativa e otimização usando um sistema de espaço de estados discreto, sem atraso, com variáveis de entrada e saída adimensionais. Logo, ao especificar o modelo de planta no controlador, o software executa a conversão do modelo numérico fornecido para espaço de estados.

É permitido ainda que você especifique um fator de escala para cada entrada da planta e variável de saída. O software converte as variáveis de entrada e saída da planta para a forma adimensional da seguinte maneira:

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B S_i u_p(k) \quad (46)$$

$$y_p(k) = S_0^{-1} C x_p(k) + S_0^{-1} D S_i u_p(k) \quad (47)$$

Onde: A_p , B , C e D são matrizes constantes de espaço de estados.

S_i é uma matriz diagonal de fatores de escala de entrada.

S_0 é uma matriz diagonal de fatores de escala de saída.

x_p é o vetor de estado.

u_p é um vetor de variáveis de entrada da planta.

y_p é um vetor de variáveis de saída da planta.

O modelo de planta resultante possui a seguinte forma equivalente:

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_{pu} u(k) + B_{pv} v(k) + B_{pd} d(k) \quad (48)$$

$$y_p(k) = C_p x_p(k) + D_{pu} u(k) + D_{pv} v(k) + D_{pd} d(k) \quad (49)$$

onde $C_p = S_0^{-1} C$, B_{pu} , B_{pv} e B_{pd} são as colunas equivalentes de $B S_i$. Além disso D_{pu} , D_{pv} e D_{pd} são as colunas equivalentes de $S_0^{-1} D S_i$.

Finalmente, $u(k)$, $v(k)$ e $d(k)$ são as variáveis manipuladas, distúrbios medidos e distúrbios de entrada não medidos, respectivamente.

Internamente, este bloco conta ainda com uma série de características que podem ser modificadas conforme o interesse do usuário, como pode ser visto na Figura 15, sendo eles: parâmetros, portas de entrada e saída necessárias, portas entrada e saída opcionais, portas de ajuste online e, por fim, atributos do sinal e tempo de amostra do bloco (MATHWORKS, 2017).

No campo de parâmetros o usuário deve designar o código fonte (Apêndice B) do controlador, no qual serão especificadas as propriedades do controlador, como a função transferência que representa o sistema, os horizontes de predição e controle, bem como as limitações de sensores e atuadores da planta.

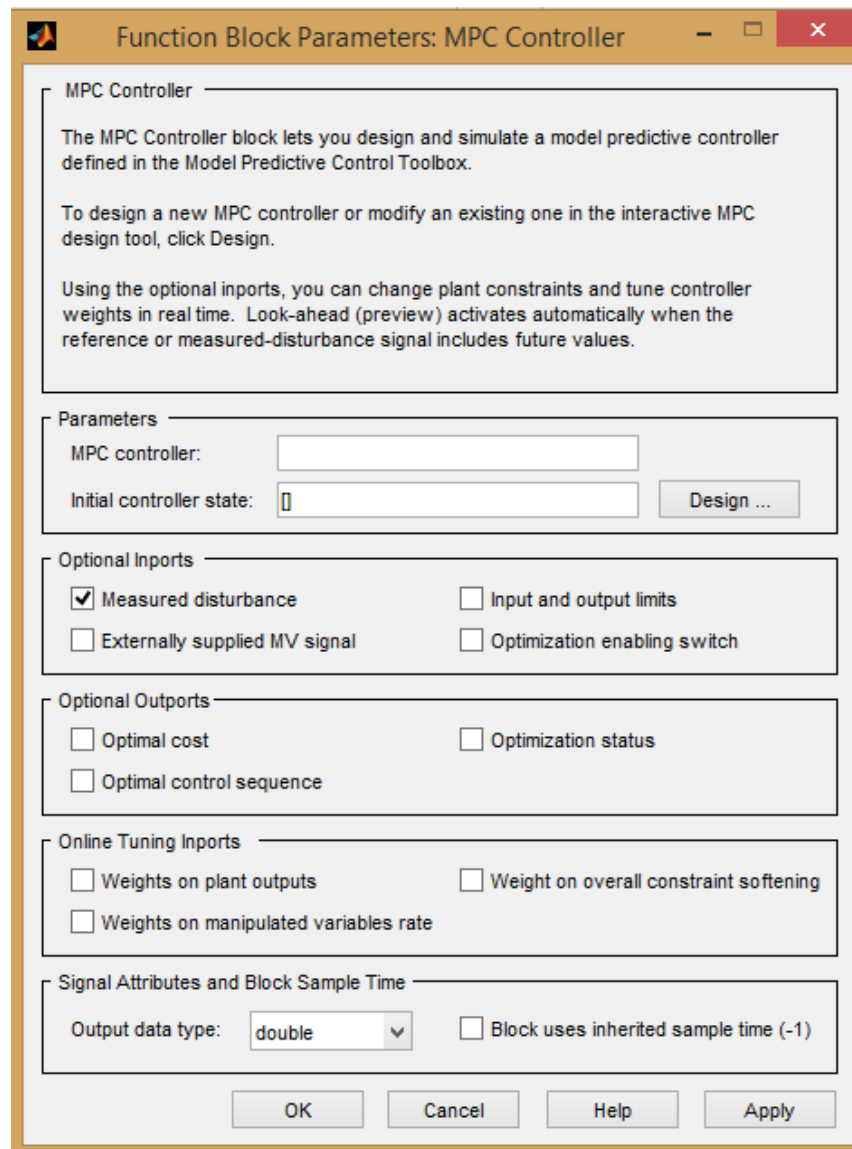


Figura 15 - Parâmetros do bloco de MPC.

Fonte: Mathworks (2017).

A Mathworks disponibiliza ao usuário, por meio do próprio simulink, tutoriais e exemplos práticos que auxiliam no melhor entendimento e utilização deste tipo de bloco, bem como todos os outros blocos que possam vir a ser necessários no desenvolvimento deste projeto.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. PLANTA DIDÁTICA

A planta didática utilizada neste projeto trata-se do Módulo de Nível e Temperatura 2325 da fabricante Datapool, que consiste em dois tanques interligados através de dutos com vazão controlada, como apresenta a Figura 16.

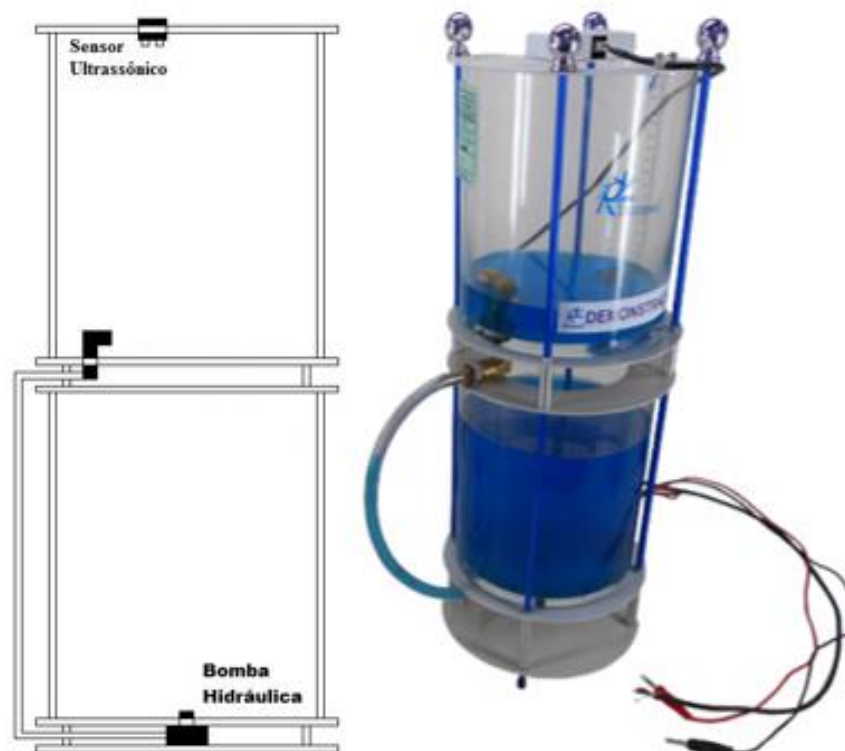


Figura 16 - Reservatório de líquido do Módulo de Nível e Temperatura 2325 Datapool.

Fonte: Adaptado de Datapool (2003a).

Na parte inferior do tanque fica a bomba hidráulica de 12V, que irá bombear o líquido para o tanque de cima. Na parte superior encontra-se o sensor de nível, a 20 centímetros do fundo do tanque. Existe ainda uma vazão constante de líquido do tanque de cima para o de baixo.

6.2.SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04

Para a medição do nível do líquido no tanque será utilizado o sensor HC-SR04 que permite a detecção de objetos entre 2 cm e 5 m com precisão de 0,3 cm. A distância entre o objeto e o sensor é calculada a partir de um *tempo de trânsito* de um sinal ultrassônico emitido pelo sensor. Este tempo de trânsito é o tempo que o sinal leva para refletir no objeto e retornar ao sensor, assumindo-se uma velocidade constante de aproximadamente 340 m/s. A Figura 17 mostra o princípio básico deste sensor onde d é a distância entre o sensor e o objeto e $2d$ a distância total percorrida pelo sinal.

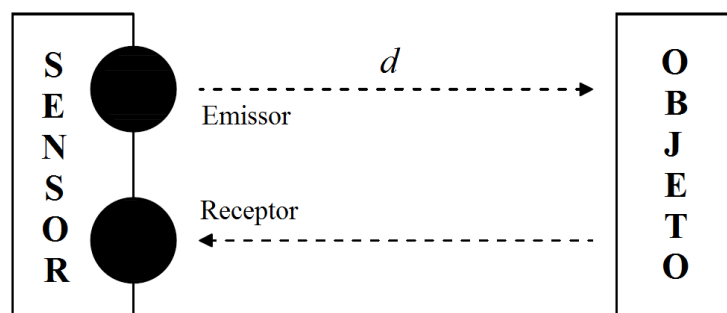


Figura 17 - Distância percorrida pelo sinal ultrassônico.

Fonte: Autoria Própria.

O sensor HC-SR04, mostrado na Figura 18, possui 4 pinos de conexão, sendo eles: pino de alimentação VCC, TRIG, ECHO E GND.



Figura 18 - Sensor Ultrassônico HC-SR04.

Fonte: Cytron Technologies (2013).

Para o início da leitura, deve-se gerar um pulso de $10\mu\text{s}$ no pino TRIG e aguardar os 8 pulsos de 40 kHz emitidos pelo sensor. Em seguida, o pino ECHO irá gerar um pulso de duração t_p proporcional a $2d$, conforme pode ser visto na Figura 19.

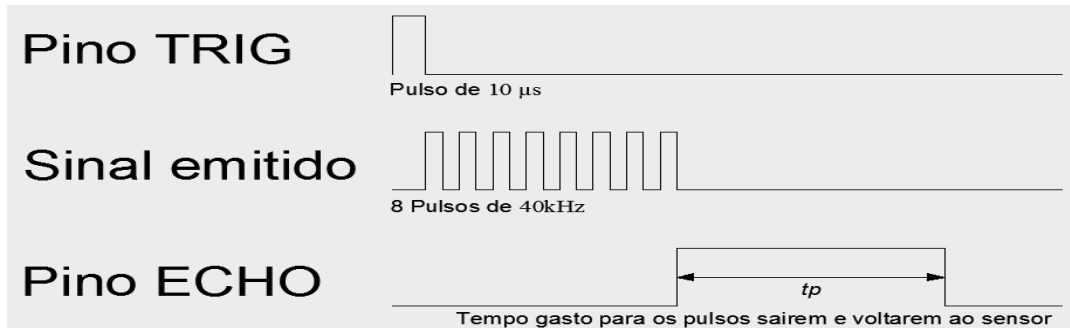


Figura 19 - Diagrama de temporização dos pinos TRIG e ECHO.

Fonte: Cytron Technologies (2013).

A distância d , em centímetros, entre o sensor e o líquido é calculada através da seguinte relação:

$$d = \frac{t_p(\mu\text{s})}{58} \quad (50)$$

O nível do tanque N_t , em centímetros, é dado por

$$N_t = 20 - d \quad (51)$$

onde 20 é a distância, em centímetros, entre o sensor e o fundo do reservatório.

Nota-se então que quanto menor a distância entre o sensor e o líquido, maior será o nível no tanque.

6.3.MÓDULO DE ACIONAMENTO L298N

O CI L298N é um circuito integrado no encapsulamento multiwatt 15, como mostra a Figura 20, que possui internamente duas pontes H capazes de acionar cargas indutivas e motores CC de até 46 V/ 2 A.

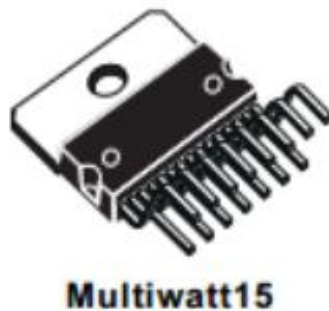


Figura 20 - L298N.

Fonte: ST MICROELECTRONICS (2000).

A ligação invertida dos terminais do motor ocasiona a inversão do sentido de rotação do mesmo. A ponte H surge como uma opção para que a operação possa ser feita de maneira manual. O nome ponte H vem da disposição dos elementos, sendo quatro chaves mecânicas ou eletrônicas e o motor posicionados de maneira a formar uma letra H, como pode ser observado na Figura 21.

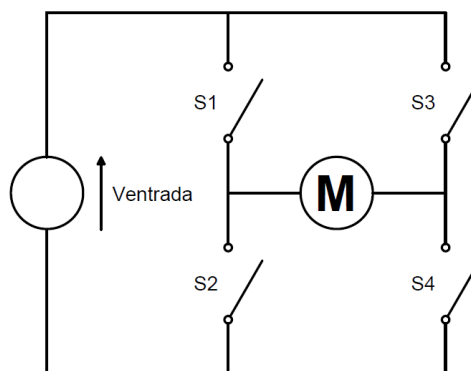


Figura 21 - Ponte H.

Fonte: Adaptado de Arduino (2014).

Uma ponte H é utilizada para controlar o sentido de rotação de um motor através do acionamento das chaves (S1, S2, S3 e S4). Tendo em vista que S1 e S2 não podem ser acionadas simultaneamente bem como S3 e S4, pois um curto circuito iria ocorrer, cada configuração das chaves garante a rotação do motor em determinado sentido, como pode ser visto na Figura 22.

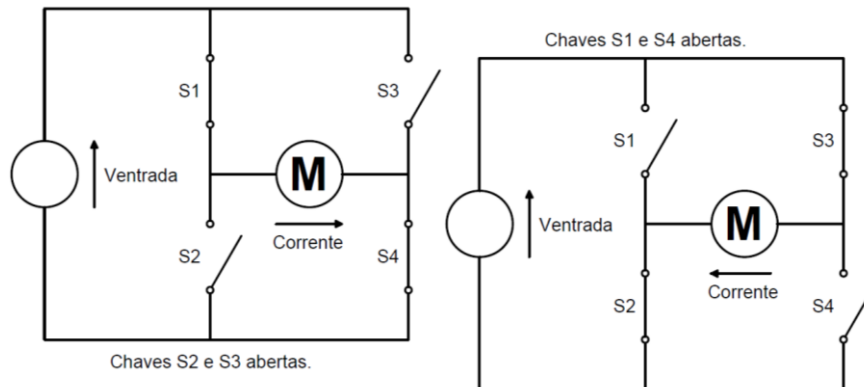


Figura 22 - Acionamento das chaves da ponte H.

Fonte: Adaptado de Arduino (2014).

6.4.MICROCONTROLADOR ARDUINO

O Arduino Uno, como o da Figura 23, é um microcontrolador baseado na ATmega328, que conta com 14 pinos de entrada/saída digitais (sendo 6 delas utilizadas como saídas PWM), 6 entradas analógicas e conexão USB (ARDUINO, 2016). A grande disponibilidade deste modelo na universidade torna interessante a sua utilização.



Figura 23 - Arduino Uno.

Fonte: Arduino (2016).

A necessidade de monitoramento do sistema a ser controlado exige uma característica de hardware que só pode ser encontrada em determinados modelos de Arduino, como é o caso do Mega 2560, tornando necessária sua utilização (ARDUINO, 2016).

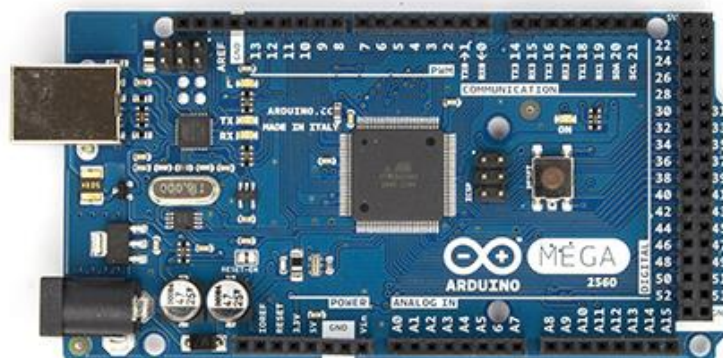


Figura 24 - Arduino Mega 2560.

Fonte: Arduino (2016).

O modelo apresentado na Figura 24 trata-se de um microcontrolador baseado na ATmega2560, que conta com 54 pinos de entrada/saída digital (sendo 15 delas utilizadas como saídas PWM), 16 entradas analógicas e conexão USB (ARDUINO, 2016).

6.5.METODOLOGIA

Neste projeto, dois microcontroladores Arduino (Arduino 1 e 2) serão utilizados para a leitura do sinal do sensor ultrassônico e geração de sinal do tipo PWM para o circuito de acionamento da bomba hidráulica, conforme ilustrado na Figura 25. Estes microcontroladores serão programados por meio do *software* IDE do Arduino e do Simulink.

A malha de controle de nível é composta pelo sensor ultrassônico HC-SR04, pelos Arduinos 1 e 2, por um circuito RC (resistor-capacitor) em série capaz de transformar um sinal PWM em uma tensão analógica, pelo ambiente Simulink e ainda pelo Circuito de Acionamento da bomba hidráulica.

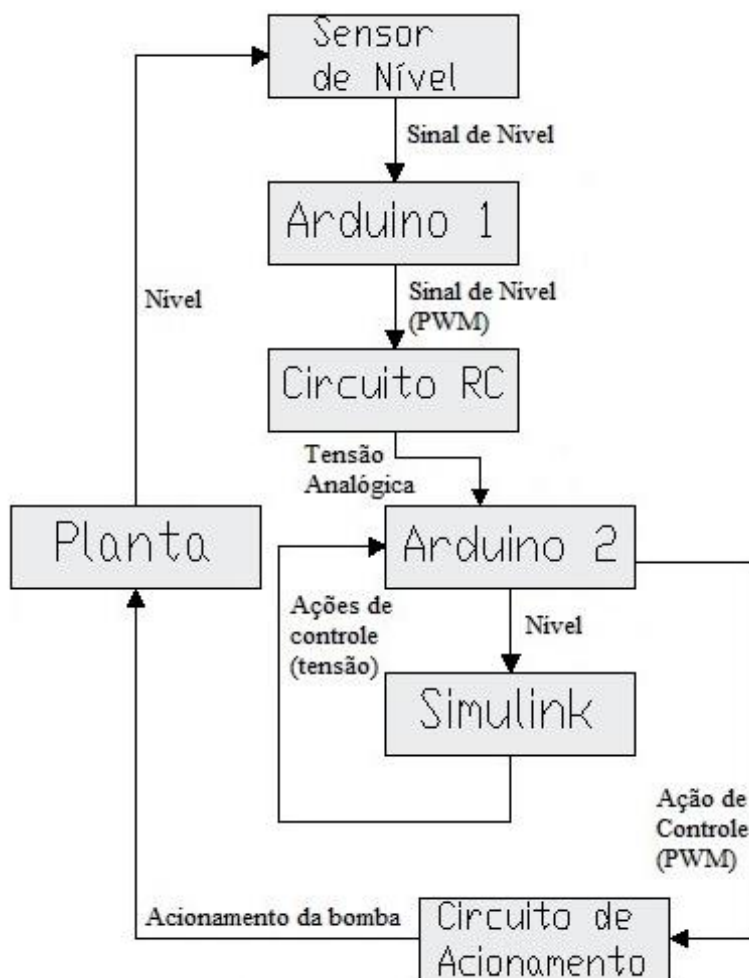


Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de controle de nível.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 abaixo apresenta o esquemático desenvolvido no Simulink, onde o nível é obtido analogicamente pelo pino 0 do Arduino e controlado através dos blocos de controle PID e MPC que geram como saída um sinal PWM, referente à tensão da bomba, no pino 3 do Arduino. Nota-se ainda a presença de duas chaves, CH1 e CH2, encarregadas de fazer a variação do *set point* e da técnica de controle aplicada ao sistema, respectivamente.

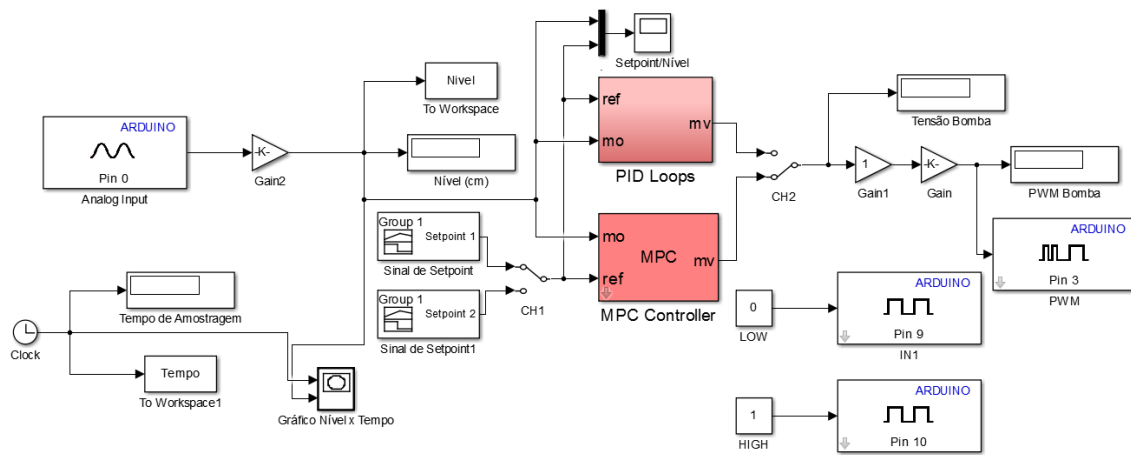


Figura 26 - Esquemático para o controle de nível via Simulink.

Fonte: Autoria própria.

Os sinais *low* e *high* (baixo e alto), aplicados aos pinos 9 e 10 do Arduino, definem o sentido de rotação da bomba.

6.5.1. Modelagem Matemática da Planta

Um ensaio em malha aberta foi realizado, aplicando-se uma tensão fixa de 2,3V à bomba, obtendo-se a resposta ao degrau conforme Figura 27.

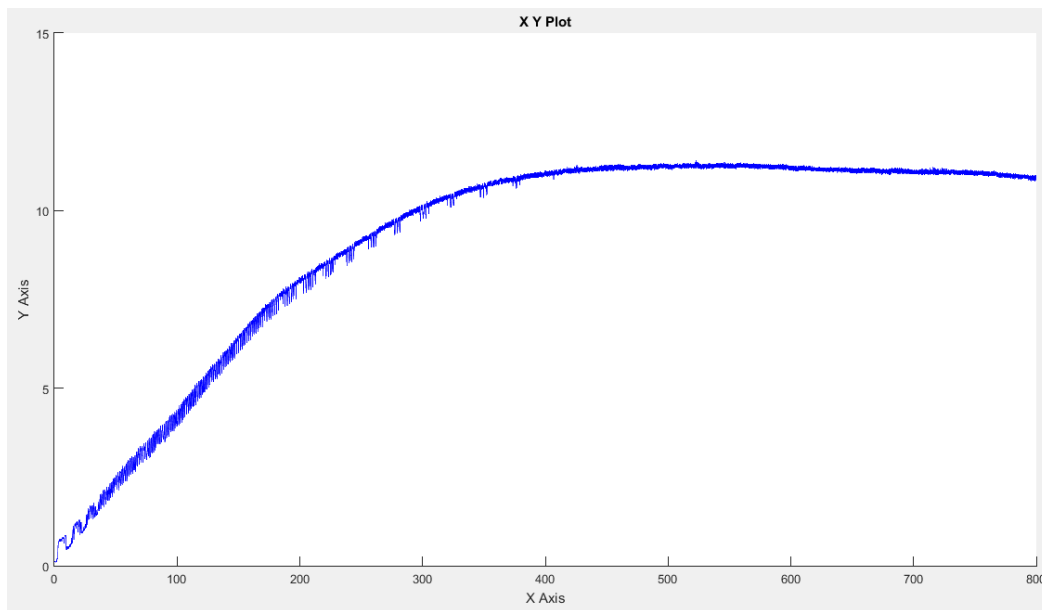


Figura 27 - Ensaio em malha aberta.

Fonte: Autoria própria.

Utilizando-se os métodos encontrados na seção 5.4.1.1. pode ser identificada a função de transferência do sistema em malha aberta $G(s)$, mostrada abaixo, servindo de base para a implementação das técnicas de controle propostas.

$$G(s) = \frac{11,75}{170s + 1} \quad (52)$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No seguinte capítulo, apresentam-se os resultados obtidos na prática para as duas técnicas de controle aplicadas ao sistema de nível, bem como discussões comparativas sobre o desempenho de ambas.

7.1.RESULTADOS CONTROLE PREDITIVO

O primeiro ensaio realizado aplicando-se a técnica de controle preditivo (MPC) teve um valor de *set point* definido em 8 centímetros, gerando o gráfico da Figura 28.

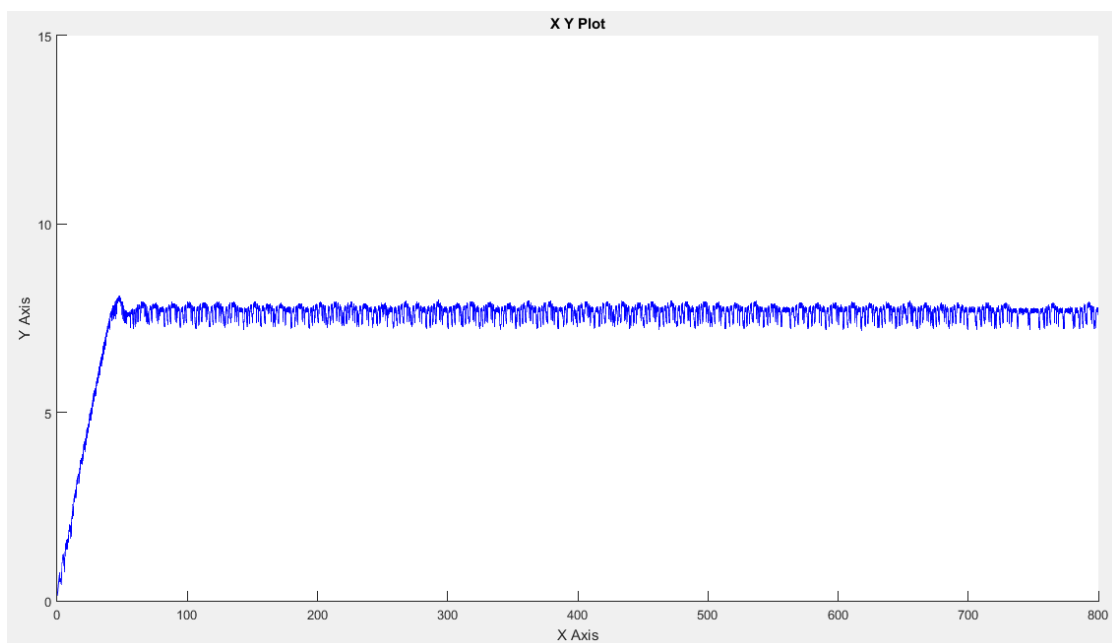


Figura 28 - Ensaio 1: Controle Preditivo.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que em aproximadamente 50 segundos após o início do ensaio o sistema atinge o nível desejado e entra em regime permanente.

Em seguida o *set point* foi ajustado para 11 centímetros e um segundo ensaio foi realizado, sendo obtido o gráfico da Figura 29, onde o regime permanente foi alcançado em torno de 80 segundos.

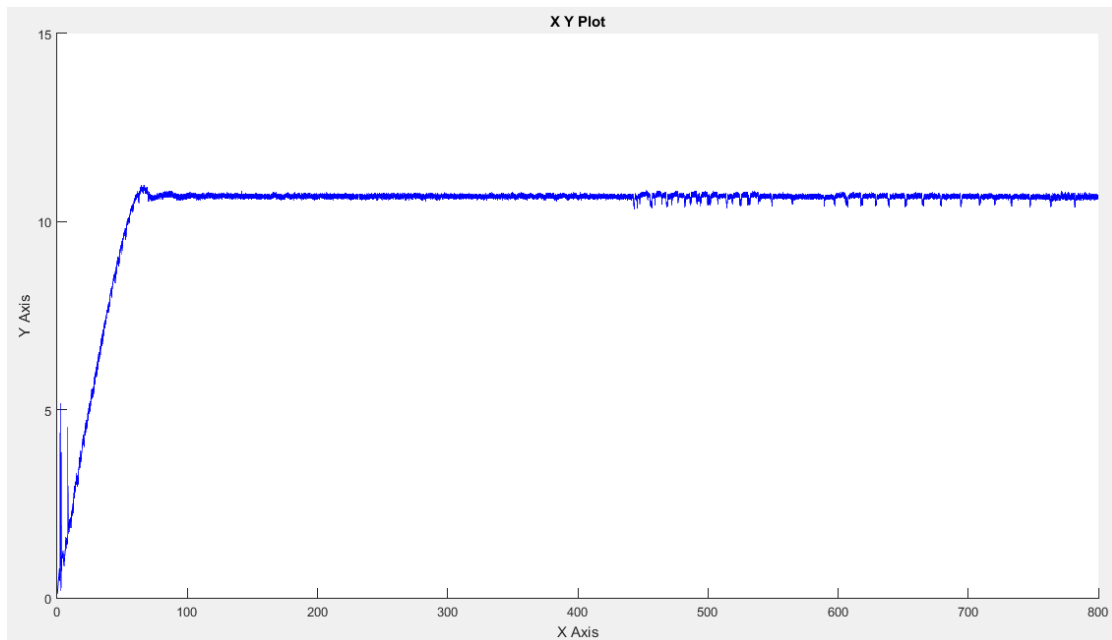


Figura 29 - Ensaio 2: Controle Preditivo.

Fonte: Autoria própria.

Outros dois ensaios foram realizados, utilizando-se o controle preditivo, com dois *set points* distintos. O primeiro, Ensaio 3, teve os *set points* definidos em ordem crescente, 8 e 11, obtendo-se a resposta conforme Figura 30.

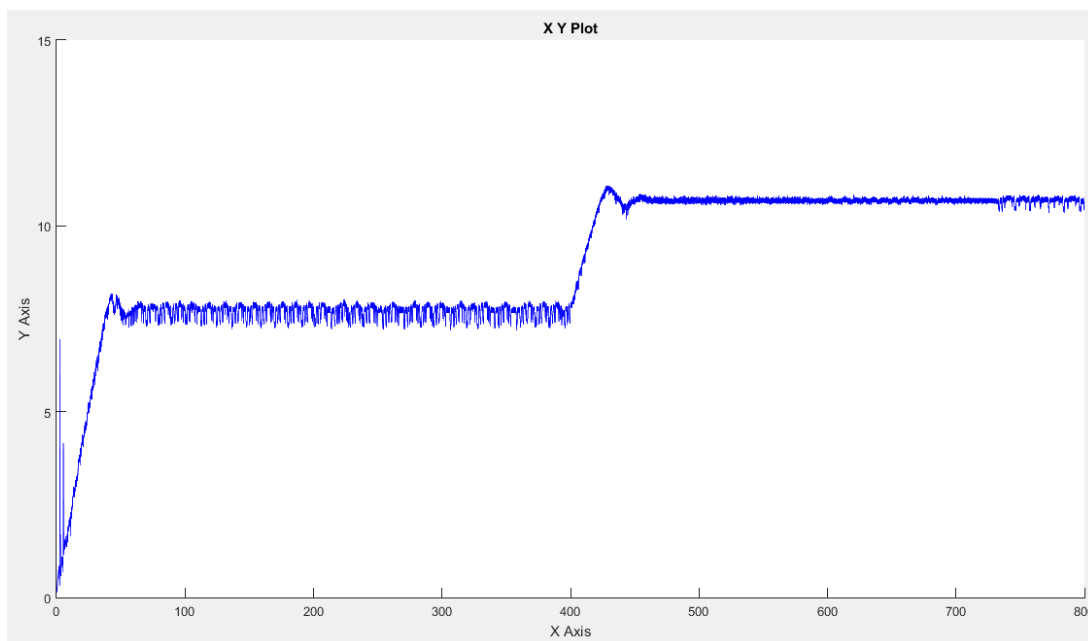


Figura 30 - Ensaio 3: Controle Preditivo Crescente.

Fonte: Autoria própria.

Já no Ensaio 4, o *set point* tem início em 11 centímetros e posteriormente, ao atingir metade do tempo de simulação, diminui para 8 centímetros. O resultado para este ensaio é mostrado na Figura 31 abaixo.

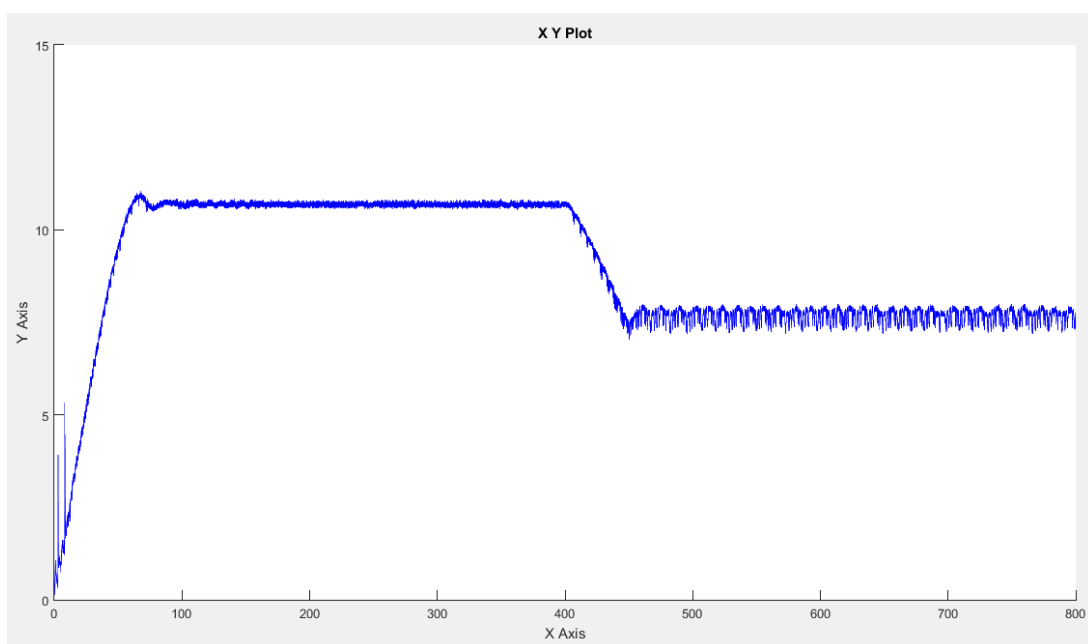


Figura 31 - Ensaio 4: Controle Preditivo Decrescente.

Fonte: Autoria própria.

7.2.RESULTADOS CONTROLE PI

Os mesmos ensaios realizados para o controle preditivo foram realizados aplicando o controle PI, suficiente para o controle satisfatório do sistema, conforme pode ser visto da Figura 32 a Figura 35.

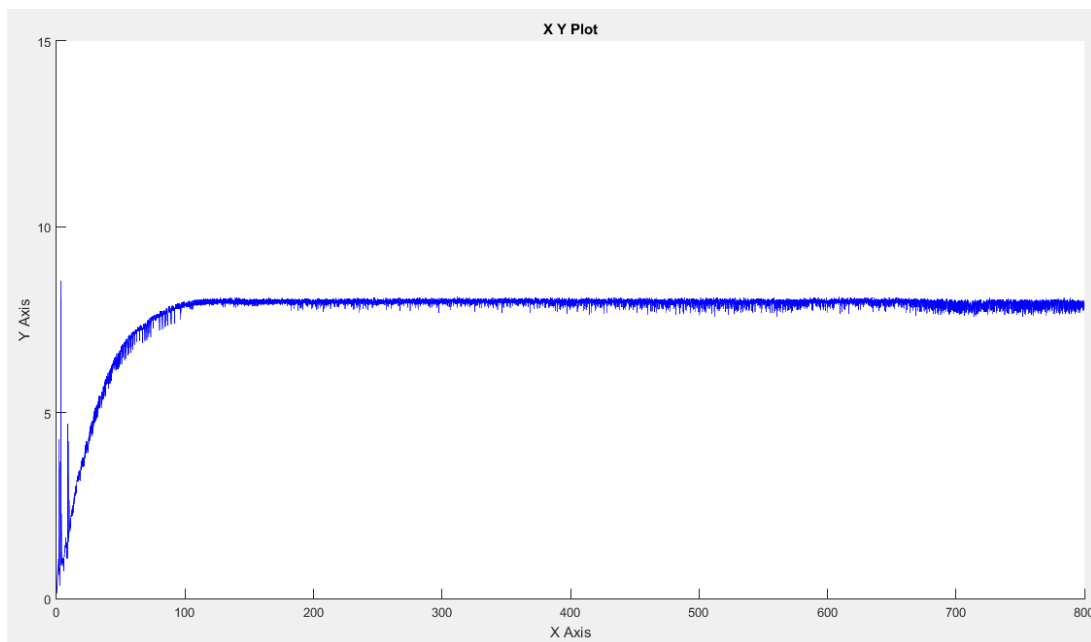


Figura 32 - Ensaio 5: Controle PI.

Fonte: Autoria própria.

No Ensaio 5, Figura 32, foram passados em torno de 100 segundos para que o *set point* de 8 centímetros fosse atingido e o sistema entrasse em regime permanente. A Figura 33 mostra o resultado do Ensaio 6, onde o regime permanente em 11 centímetros foi alcançado após 120 segundos.

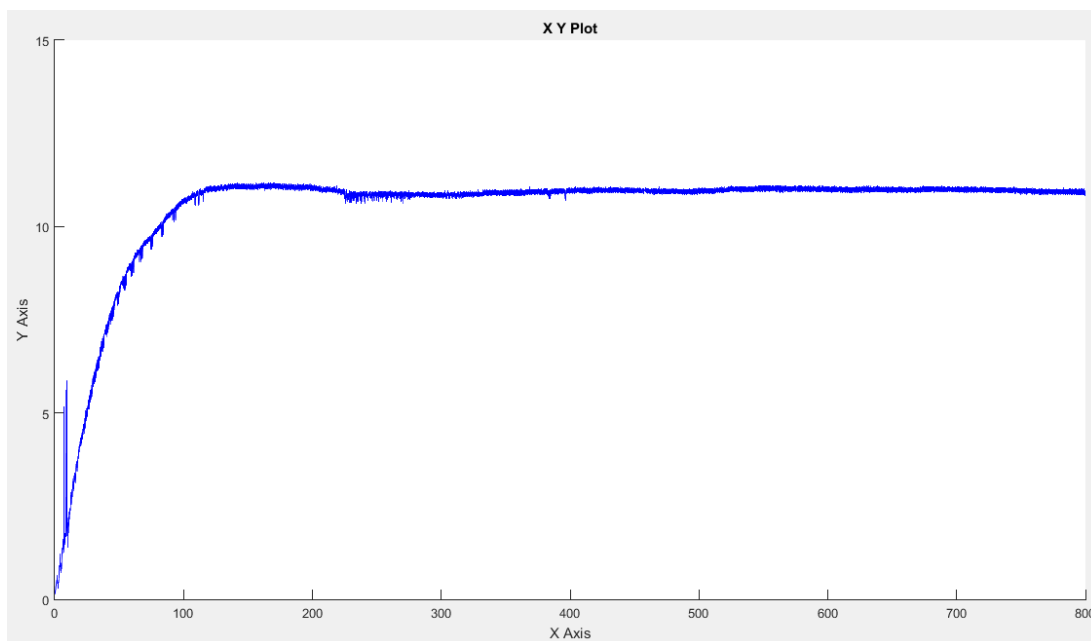


Figura 33 - Ensaio 6: Controle PI.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34 e Figura 35 apresentam-se os gráficos para os ensaios com a variação do *set point* em ordem crescente e decrescente, respectivamente.

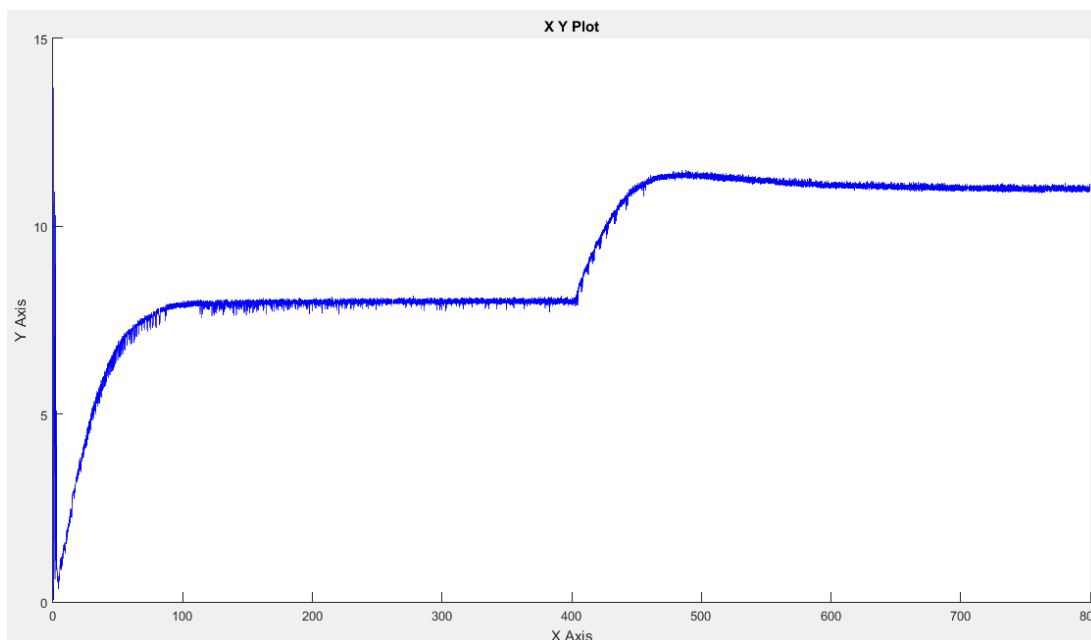


Figura 34 - Ensaio 7: Controle PI Crescente.

Fonte: Autoria própria.

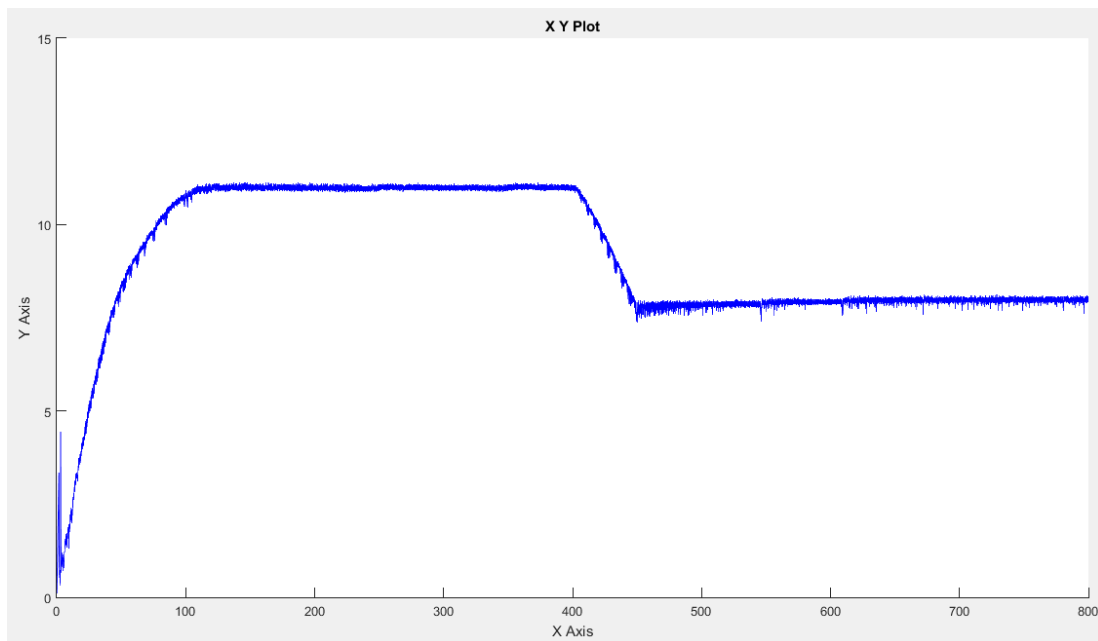


Figura 35 - Ensaio 8: Controle PI Decrescente.

Fonte: Autoria própria.

7.3.RESULTADOS MPC-PID

Foram realizados ainda ensaios onde além de variar o *set point* em ordem crescente e decrescente, como feito anteriormente, a técnica de controle também foi alterada simultaneamente, conforme apresentado a seguir.

No Ensaio 9 foi definido um *set point* de 8 centímetros a ser atingido com a utilização do controle preditivo, atingindo a metade do tempo de simulação o *set point* foi alterado para 11 centímetros e a técnica de controle PI aplicada, gerando a resposta vista na Figura 36.

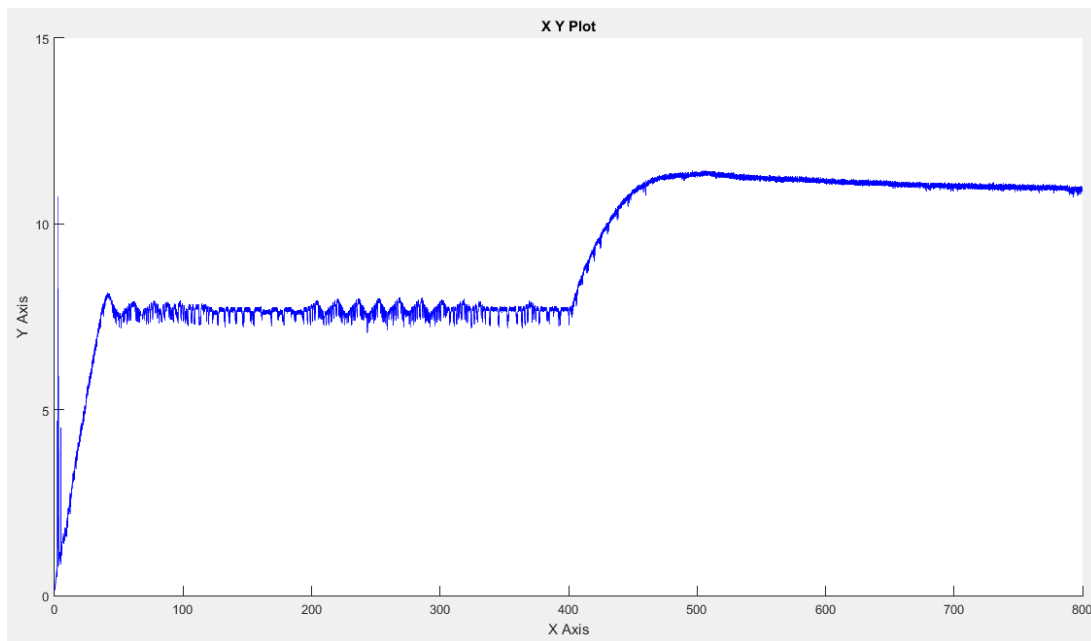


Figura 36 - Ensaio 9: Controle MPC-PI Crescente.

Fonte: Autoria própria.

Com a variação do *set point* sendo realizada da mesma forma e invertendo a ordem das técnicas de controle, começando com PI e mudando posteriormente para MPC, o Ensaio 10 gerou o resultado apresentado na Figura 37.

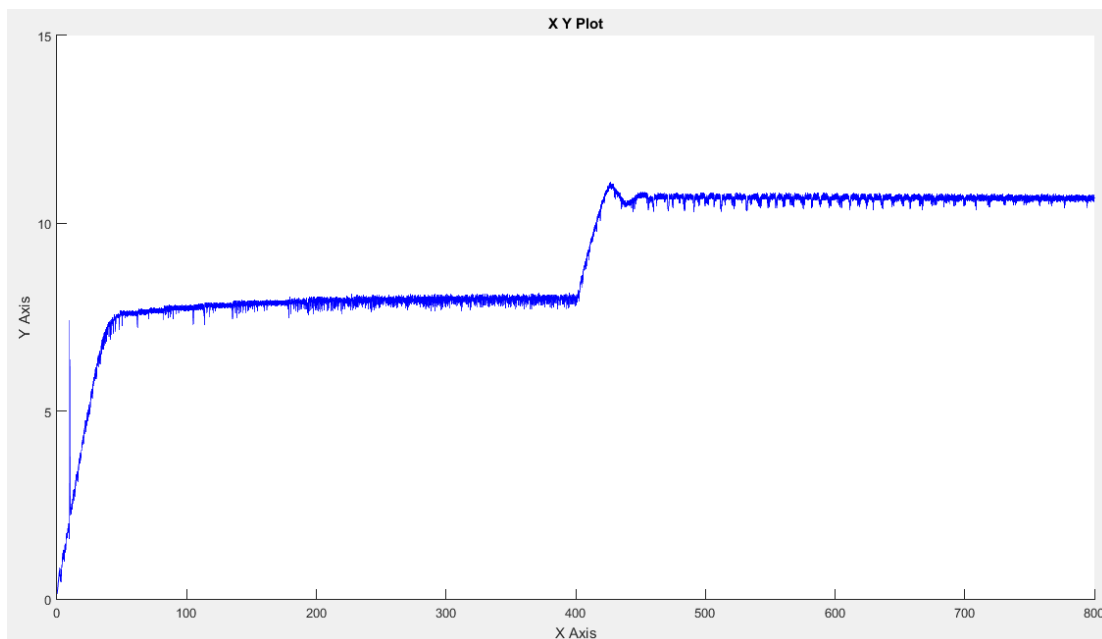


Figura 37 - Ensaio 10: Controle PI-MPC Crescente.

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, outro ensaio foi realizado onde o *set point* foi variado em ordem decrescente, 11 e 8, e a técnica de controle sendo inicialmente MPC e posteriormente PI, obtendo-se como resultado o gráfico da Figura 38.

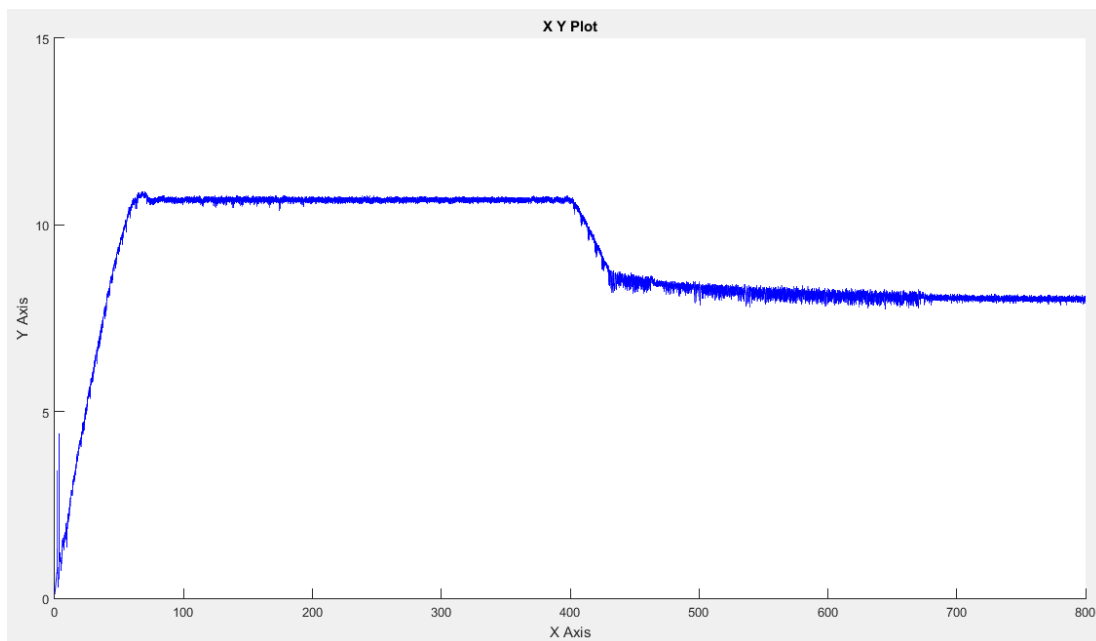


Figura 38 - Ensaio 11: Controle MPC-PI Decrescente.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, no Ensaio 12, a ordem das técnicas de controle foram alteradas, PI-MPC, a fim de controlar o nível de acordo com o *set point* definido em ordem decrescente. A Figura 39 apresenta o resultado do Ensaio 12.

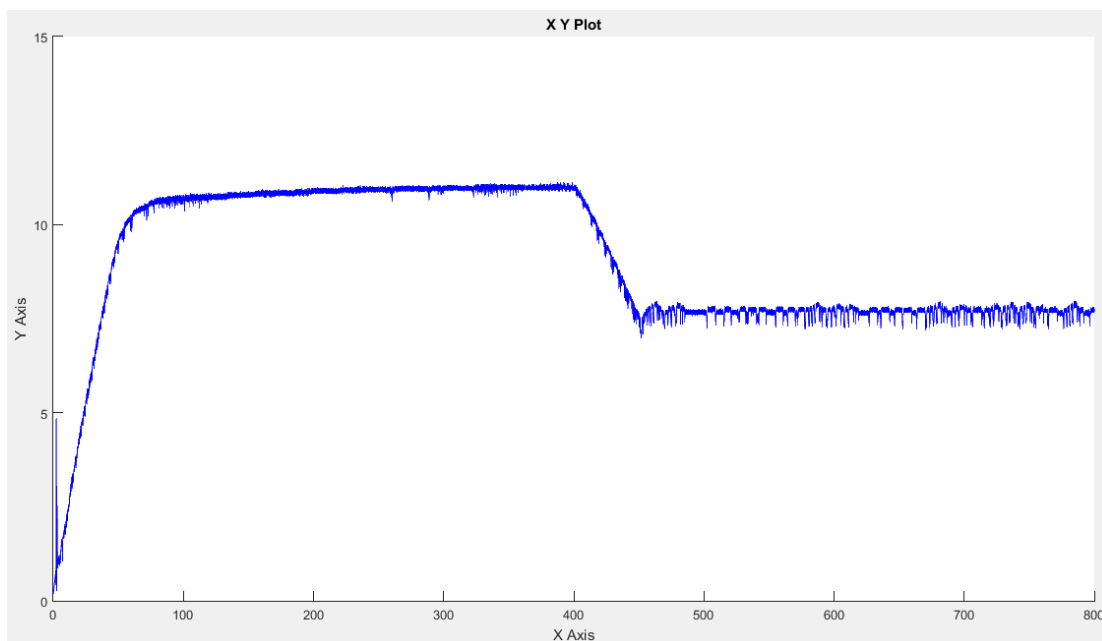


Figura 39 - Ensaio 12: Controle PI-MPC Decrescente.

Fonte: Autoria própria.

8. CONCLUSÕES

8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizado o estudo de duas técnicas de controle distintas, o controle preditivo baseado em modelo (MPC) e o controle clássico PI, bem como a utilização do software Simulink para aplicar, por meio de microcontroladores Arduino, tais técnicas ao nível de líquido em um sistema de tanques.

O suporte das bibliotecas do Simulink mostrou-se satisfatório no decorrer deste trabalho devido à sua compatibilidade com o Arduino e à simplicidade de sua metodologia de programação baseada em blocos, facilitando as ações de monitoramento e controle da planta.

Notou-se durante os ensaios uma leitura de nível apresentando certo ruído, o que pode vir a influenciar negativamente para o desempenho dos controladores.

Aplicando-se métodos de identificação de sistemas de primeira ordem à planta, um modelo matemático aproximado ao sistema real foi definido e utilizado para a definição de parâmetros cruciais na implantação das técnicas de controle propostas.

Com base nos resultados, as duas metodologias de controle mostraram-se válidas, garantindo o controle do nível em regime permanente conforme o *set point* definido. A tensão aplicada por ambos os métodos se mostrou satisfatória quanto a estabilidade, uma vez que muitas variações de tensão poderiam vir a danificar a bomba.

Comparando os resultados, o controle preditivo apresentou uma resposta notavelmente mais rápida, precisando de menos tempo para entrar em regime permanente, porém um pequeno *overshoot* foi registrado no sinal de nível, o que pode ser explicado devido à dinâmica rápida do sistema que faz com que o nível ultrapasse o *setpoint* antes de o controlador chegar na saída ideal para mantê-lo constante.

Por fim, pode-se concluir que os objetivos proposto neste trabalho foram alcançados, aplicando-se de maneira satisfatória as metodologias de controle estudadas e toda a comunicação entre *hardware* e *software*.

8.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, uma planta mais complexa pode ser utilizada, tratando de um sistema multivariável, o que pode potencializar as vantagens do controle preditivo frente a outras metodologias de controle.

Outra sugestão é a utilização de sensores mais precisos para a aquisição das variáveis do sistema a serem controladas, ou de filtros de sinais oferecidos pelo próprio Simulink, possibilitando assim um controle mais efetivo.

Pode-se também desenvolver o estudo de outras metodologias de controle, como o controle moderno por realimentação de estados, para efeito de comparação com o MPC.

REFERÊNCIAS

AGACHI, P. S.; NAGY, Z. K.; CRISTEA, V. **Model Based Control: Case Studies in Process Engineering**. WILEY-VCH, 2006.

ARDUINO. **Arduino Uno**. 2016. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 28 de out. 2016.

ARDUINO. **Arduino Mega 2560**. 2016. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 28 de out. 2016.

ARDUINO, e. C. **Controle de motor CC com o L293 – Ponte H**. 2016. Disponível em: <<http://www.arduinoocia.com.br/2014/04/control-de-motor-cc-com-o-l293d-ponte-h.html>>. Acesso em: 26 de out. 2016.

ASTROM, Karl J.; HAGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. United States of America: ISA, 1995.

CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. 2. ed. London, United Kingdom: Springer, 2007.

CARMO, M. J. d. **Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle**. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica Federal de Minas Gerais – CEFET, Juiz de Fora, MG, 2006.

CUTLER, C. R. & RAMAKER, B. L. (1979). Dynamic matrix control – a computer control algorithm. AIChE 86th National Meeting, Houston, TX.

CYTRON TECHNOLOGIES. **Product User Manual – HC-SR04 Ultrasonic Sensor**. Johor, Malaysia, May 2013. 10p.

DATAPOL, ELETRÔNICA. (2003a). **Módulo de Nível e Temperatura 2325: Manual de manutenção e calibração**. Itajubá, 2003. 37 p.

DATAPOL, ELETRÔNICA. (2003b). **Módulo de Nível e Temperatura 2325: Teoria de sistemas de controle**. Itajubá, 2003. 49 p.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ENGELL, S. **Feedback control for optimal process operation.** Proc IFAC *Symposium ADCHEM*, Gramado, 2006.

FRISTEC, T. **Aplicação: Sensor de distância HC-SR04.** 2016. Disponível em: <<http://fristec.blogspot.com.br/2011/01/14-aplicacao-sensor-de-distancia-hc.html>>. Acesso em: 27 de out. 2016.

MACIEJOWSKI, J. M. **Predictive Control with Constraints.** Essex, England: Prentice Hall, 2002.

MARTINS, S. B.; RANGEL, R. F.; MORAIS, F. d.; SILVA, S. A. d.; LIRA, V. V. Construção de um protótipo para o controle de temperatura. **V Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação CONNEPI**, Paraíba, 2010.

MATHWORKS. **Arduino Support from Simulink.** 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>>. Acesso em: 28 de out. 2016.

MATHWORKS. **MPC Modeling.** 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/mpc-modeling.html>>. Acesso em: 27 de nov. 2017.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico.** São Paulo: Novatec Editora, 2011.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H. **Process Dynamics Modeling and Control – Model Predictive Control.** New York – USA: Oxford University Press Inc, 1994.

PAREDE, I. M.; GOMES, L. E. L. **Eletrônica: Automação Industrial.** Centro Paula Souza - Governo do Estado de São Paulo. Fundação Padre Anchieta, 2011.

RAO, C. V.; RAWLINGS, J. B. **Linear programming and model predictive control.** Journal of Process Control, v.10, p.283-289, 2000.

RICHALET, J.; RAULT, A.; TESTUD, J. L.; & PAPON, J. (1976). Algorithmic control of industrial processes. Proceedings of the 4th IFAC symposium on identification and system parameter estimation, p. 1119-1167.

ST MICROELECTRONICS. **Dual Full – Bridge Driver L298**. Italy, 2000. 13 p.

APÊNDICE A – CÓDIGO SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04 (ARDUINO 1)

```
// Código Implementado para o Arduino 1

// Aquisição dos dados do sensor ultrassônico, que passará por
// um circuito RC, onde será feita a conversão do nível em forma
// de tensão, e enviado ao Arduino 2, que esta conectado diretamente
// ao Simulink.

// UTILIZANDO COM6

# define trigPin 4

# define echoPin 5

void setup () {

  Serial.begin(9600); //Inicializa a serial

  pinMode (9, OUTPUT); //Saída Simulink

  pinMode(trigPin, OUTPUT); // TRIG Sensor Nível

  pinMode(echoPin, INPUT); // ECHO sensor Nível

}

void loop (){

  float Temp, Dist, nivel1, sin1; // definição das variáveis

  digitalWrite (trigPin, LOW); // pino TRIG em nível baixo

  delayMicroseconds(2);
```

```
digitalWrite(trigPin, HIGH); // pino TRIG em nível alto

delayMicroseconds(10);

digitalWrite(trigPin, LOW); // pino TRIG em nível baixo

Temp = pulseIn(echoPin, HIGH); // aquisição dos dados do pino ECHO

Dist = (Temp/2)/ 29.1; // Cálculo da distância em centímetros

nivel1 = 16-Dist; // Conversão do sentido dos dados da distância

sin1 = nivel1*12.75; // Conversão do Nível em PWM: nivel1*255/20

analogWrite (9, sin1); // sinal do pino ECHO enviado para o circuito TRC

Serial.print(Dist); // Mostra na porta serial

Serial.print("cm");

Serial.println();

delay(25);

}
```

APÊNDICE B – CÓDIGO IMPLEMENTAÇÃO MPC MATLAB SIMULINK (ARDUINO 2)

```

% TCC Carlos Henrique

% MPC - Controlador Preditivo - Código de Implementação

clear all; close all; clc;

FT=tf([11.75],[170 1]); % Função Transferência da Planta

Ta = 25e-3; % Tempo de Amostragem

horizonte_predicao = 4;

horizonte_controle = 2;

peso=struct('ManipulatedVariables',0.2,'ManipulatedVariablesRate',0.5,'OutputVariables',1); % Definição dos Pesos

restricao_entrada=struct('Min',0,'Max',6,'RateMin',-Inf,'RateMax',Inf); % Restrições de saturação de entrada (em Tensão)

restricao_saida=struct('Min',0,'Max',16); % Restrições de saturação de saída (em Centímetros)

mpc_carlos =
mpc(FT,Ta,horizonte_predicao,horizonte_controle,peso,restricao_entrada,restricao_saida); % Definições do MPC

setname(mpc_carlos,'input',1,'Restrição Entrada'); % Nomeia Entrada

setname(mpc_carlos,'output',1,'Restrição Saída'); % Nomeia Saída

open_system('MPCNivel'); % Abrir simulink com o esquema

```

```
set_param('MPCNivel', 'SimulationCommand', 'start') % Iniciar controle
```