

ANDREA DAVI CARRER
ISABELLE COELHO FRANCO
JEAN HIDEYUKI SATO

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BARICENTRO
NA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DA PLANTA
PILOTO DE pH

São Paulo
2022

ANDREA DAVI CARRER
ISABELLE COELHO FRANCO
JEAN HIDEYUKI SATO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BARICENTRO
NA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DA PLANTA
PILOTO DE pH**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Automação e Controle.

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Carrer, Andrea Davi

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BARICENTRO NA OTIMIZAÇÃO DO
CONTROLE DA PLANTA PILOTO DE pH / A. D. Carrer, I. C. Franco, J. H.
Sato -- São Paulo, 2022.

78 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Otimização 2.Planta Industrial 3.Controle 4.Tratamento pH
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t. III.Franco, Isabelle Coelho
IV.Sato, Jean Hideyuki

ANDREA DAVI CARRER
ISABELLE COELHO FRANCO
JEAN HIDEYUKI SATO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BARICENTRO
NA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DA PLANTA
PILOTO DE pH**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Automação e Controle.

Área de Concentração:

Laboratório de Automação e Controle

Orientadores:

Claudio Garcia

Felipe Miguel Pait

São Paulo
2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos orientadores, Prof. Dr. Claudio Garcia e Prof. Dr. Felipe Miguel Pait, por compartilhar conhecimento e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos nossos familiares, por todo incentivo e apoio durante a graduação.

Aos colaboradores do LCPI, pelo auxílio e esclarecimentos acerca do funcionamento da Planta Piloto de Tratamento de pH.

RESUMO

O Método do Baricentro, recentemente desenvolvido para otimização direta, é uma forma de otimização sem derivadas, cujo objetivo é encontrar pontos extremos de uma função conhecida com precisão. Neste projeto foi utilizada a Planta Piloto de Tratamento de pH, instalada no Laboratório de Controle de Processos Industriais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que representa um processo industrial de controle de pH. Suas principais variáveis controladas são pH, nível e temperatura. Foi estudada a variável pH.

Palavras-Chave – Otimização, Planta Industrial, Tratamento de pH, Controle.

ABSTRACT

The newly developed Centroid Method for direct optimization is a derivativeless form of optimization whose objective is to find extreme points of a known function with precision. In this project, the pH Treatment Pilot Plant was used, installed in the Industrial Process Control Laboratory of the Polytechnic School of the University of São Paulo, which represents an industrial pH control process. Its main controlled variables are pH, level and temperature. The variable pH was studied.

Keywords – Optimization, Industrial plant, pH treatment, Control.

LISTA DE FIGURAS

1	Curva de titulação de pH	18
2	Planta Piloto de Tratamento de pH	21
3	Tanques de Ácido Principal e Secundário localizados na parte Superior da Planta de Controle de pH	22
4	Tanque de Ácido Primário Intermediário	23
5	Tanque de Ácido Secundário Intermediário	23
6	Tanque de Base para Bomba	24
7	P&ID da Planta Piloto de Tratamento de pH	25
8	Gêmeo Digital da Planta Piloto de Tratamento de pH desenvolvido no Simulink®	26
9	Malha de controle do nível no Gêmeo Digital da Planta Piloto de Trata- mento de pH no Simulink	26
10	Malha de controle de pH no Gêmeo Digital da Planta Piloto de Tratamento de pH no Simulink®	27
11	Gráfico da estimativa do valor mínimo da função $f = x^2$ pelo Método do Baricentro	29
12	Gráfico da estimativa de Kc e Ti na quarta versão do código do Método do Baricentro	32
13	Control Builder	33
14	Engineering Workplace em operação	34
15	Diagrama do Simulink	34
16	Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro	35
17	MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro	35

18	Erro da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro	36
19	Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório	37
20	MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório	37
21	Erro da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório	38
22	Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório	39
23	MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório	40
24	Erro da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório	40
25	Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro	41
26	MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro	42
27	Erro da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro	42
28	Setpoint e PV (pH medido) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório	44
29	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório	44
30	Erro da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório	45
31	Setpoint e PV (pH medido) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro	46
32	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro	46

33	Erro da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro	47
34	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	48
35	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	49
36	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	49
37	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	50
38	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	50
39	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	51
40	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	51
41	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	52
42	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	52
43	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	53
44	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	53
45	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	54
46	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	54

47	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7 . . .	55
48	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	55
49	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	56
50	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	56
51	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9 .	57
52	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	57
53	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9	58
54	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	58
55	Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9 . . .	59
56	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	59
57	MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9	60
58	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	61
59	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	62
60	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5 . . .	62

61	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	63
62	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	63
63	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5 .	64
64	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5	64
65	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5	65
66	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	65
67	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	66
68	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7 . . .	66
69	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	67
70	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	67
71	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7 .	68
72	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7	68
73	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7	69

74	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	69
75	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9	70
76	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9 . . .	70
77	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9	71
78	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	71
79	Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9 .	72
80	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9	72
81	MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9	73

LISTA DE TABELAS

1	Sintonias do controlador PI para as cinco faixas de pH	19
2	Resultados da segunda versão do código do Método do Baricentro	30
3	Resultados da terceira versão do código do Método do Baricentro com 75 iterações, com diferentes desvios da distribuição aleatória	31
4	Resultados da simulação do gêmeo digital com os valores de PI da planta física e com os valores da quarta versão do código do Método do Baricentro	31
5	Resultados da operação na planta física com os valores de PI utilizados na planta física no laboratório e com os valores da quarta versão do código do Método do Baricentro	38
6	Resultados da operação na planta física no modo servo com os dois tanques de ácido ativos	43
7	Resultados da simulação na planta digital ajustada	47
8	Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 5 . . .	60
9	Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 7 . . .	61
10	Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 9 . . .	61
11	Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 5 . . .	73
12	Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 7 . . .	73
13	Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 9 . . .	74

SUMÁRIO

1	Introdução	14
2	Objetivo	15
3	Revisão da Literatura	16
3.1	Literatura referente ao Método do Baricentro	16
3.2	Literatura referente ao controle de pH	17
3.2.1	Faixas de pH	18
4	Planta Piloto de Tratamento de pH	20
4.1	Descrição Funcional	20
4.2	Malha de Controle de pH	25
4.3	Gêmeo Digital	25
5	Projeto de sintonia do Controlador PI	28
5.1	Método do Baricentro	28
5.1.1	Desenvolvimento do código do Método do Baricentro	28
5.1.1.1	Primeira versão	28
5.1.1.2	Segunda versão	29
5.1.1.3	Terceira versão	30
5.1.1.4	Quarta versão	31
5.1.2	Resultados do Método	32
5.2	Validação do Método de Baricentro na Planta Piloto de Tratamento de pH	33
5.2.1	Laboratório de Controle de Processos Industriais	33
5.2.2	Experimento na planta com um tanque de ácido ativo	34

5.2.3	Experimento na planta com os dois tanques de ácido ativos	38
5.2.4	Resultado dos Experimentos no Laboratório	43
5.2.5	Ajuste do gêmeo digital	43
5.2.6	Diferentes faixas de pH	47
6	Conclusões	75
7	Referências	76

1 INTRODUÇÃO

O Laboratório de Controle de Processos Industriais, LCPI, é vinculado ao Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da USP. Foi inaugurado em 2010 e analisa métodos de controle de processos em condições reais de operação, como são encontradas em chão de fábrica. O objetivo das plantas piloto é oferecer infraestrutura para desenvolvimento de pesquisas sobre controle de processos industriais. O laboratório é composto por equipamentos que atuam com o máximo de precisão para controlar diversas variáveis como pressão, nível, vazão, temperatura e pH de fluidos, para isso possui sensores, atuadores e sistemas digitais de controle.

A proposta deste TCC é aplicar o Método do Baricentro, desenvolvido e estudado pelo Professor Felipe Miguel Pait, na otimização do controle da Planta Piloto de pH, focando no controle da variável pH.

2 OBJETIVO

Este trabalho possui dois objetivos principais, o primeiro de realizar simulações computacionais do método de otimização do baricentro para sintonizar os parâmetros de um controlador do tipo Proporcional Integrativo no gêmeo digital da Planta Piloto de Tratamento de pH, a fim de controlar a variável pH e avaliar se o desempenho desse método para sintonizar o controlador PI será melhor do que a sintonia atualmente utilizada nessa planta. Também tem por objetivo aplicar as sintonias encontradas pelo método do baricentro na planta física, para a verificação dos resultados obtidos nas simulações.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por finalidade apresentar o estudo que foi feito das referências bibliográficas, com o propósito de construir a base científica necessária a este trabalho. A revisão está estruturada em duas seções, sendo a primeira referente ao Método do Baricentro e a segunda à literatura de Controle de pH.

3.1 Literatura referente ao Método do Baricentro

O Método do Baricentro (Pait, 2022) trata-se de um método de otimização direta não derivativo, seu algoritmo se apresenta de forma recursiva e é capaz de encontrar pontos extremos de uma expressão matemática não conhecida com exatidão, uma vez que utiliza apenas os valores de sua função. Uma outra vantagem de sua aplicação é para funções não diferenciais e pode ser considerado resistente a ruídos de medições.

O método consiste em minimizar uma função denominada função custo, Equação 3.1, por meio do uso da fórmula do centro de massa de n pontos de teste x_i , fazendo uma ponderação com o expoente do valor da função em cada um desses pontos. Nos pontos onde a função de custo for maior, significando uma boa estimativa, a ponderação atribui peso maior do que nos pontos onde a função de custo for menor.

$$\hat{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^n x_i e^{-\nu f(x_i)}}{\sum_{i=1}^n e^{-\nu f(x_i)}} \quad (3.1)$$

Onde x_n representa a sequência de valores de teste, ν é uma constante real positiva, \hat{x}_n representa o centro de massa e f a função custo que se deseja minimizar.

Além de sua expressão analítica, o método também pode ser descrito de forma recursiva, usando as Equações 3.2 e 3.3, consideradas equivalentes.

$$m_n = m_{n-1} + e^{-\nu f(x_n)} \quad (3.2)$$

$$\hat{x}_n = \frac{1}{m_n}(m_{n-1}\hat{x}_{n-1} + e^{-\nu f(x_n)}x_n) \quad (3.3)$$

A Equação 3.4 é essencial ao Método do Baricentro, uma vez que demonstra que a busca aleatória feita com o algoritmo segue a direção do gradiente médio negativo da função custo a ser minimizada.

$$E[\Delta\hat{x}_n] = E[F_n(z)]\bar{z} - \nu\Sigma E[\bar{F}_n(z)\nabla f(\hat{x}_{n-1} + z)] \quad (3.4)$$

Onde z é o termo de exploração, $F_n(z)$ é dada pela Equação 3.5, $\bar{F}_n(z)$ pela Equação 3.6, levando em consideração o teorema de distribuição Gaussiana e tomando como prova a função de densidade de probabilidade.

$$F_n(z) = \frac{e^{-\nu f(\hat{x}_{n-1}+z)}}{m_{n-1}+e^{-\nu f(\hat{x}_{n-1}+z)}} \quad (3.5)$$

$$\hat{F}_n(z) = \frac{m_{n-1}e^{-\nu f(\hat{x}_{n-1}+z)}}{(m_{n-1}+e^{-\nu f(\hat{x}_{n-1}+z)})^2} \quad (3.6)$$

O Método do Baricentro é igualmente confiável em comparação a outros métodos conhecidos e consolidados na área de controle. Detalhes de sua aplicação e implementação são apresentados nos capítulos seguintes deste trabalho.

3.2 Literatura referente ao controle de pH

De acordo com (SERRANO, 2020), verificou-se a existência de cinco faixas de pH e cinco controladores diferentes, para operar em cada faixa. Dessa forma, se mostra necessário aplicar o Método do Baricentro, de forma que se encontrem cinco sintonias de controladores e se obtenha uma melhor operação da planta.

3.2.1 Faixas de pH

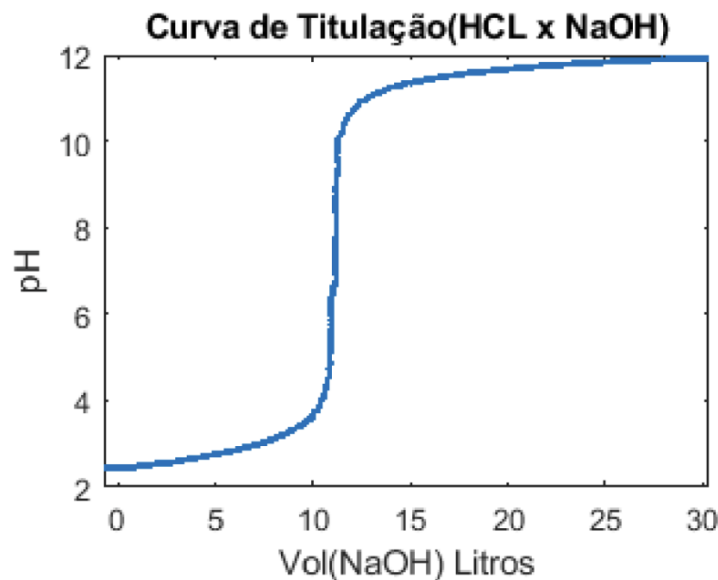
A titulação é um método preciso e confiável para se medir a concentração de uma solução, onde um reagente conhecido (titulante) é adicionado a uma solução (titulada), a qual se deseja determinar a sua concentração.

Tomando como base a Planta Piloto de Tratamento de pH, foi realizada a curva de titulação ácido-base do processo industrial de controle de pH, com o objetivo de encontrar as faixas de operação da planta, onde a referência foi a variável pH.

Este experimento foi realizado por (SERRANO,2020), que começou com uma solução titulante ácida de HCl no Tanque Reator (TR) e foi adicionando titulado básico NaOH, de forma a mapear todo o comportamento do pH na faixa de 2 a 12.

Dado que o processo de controle de pH é não linear, encontrar as faixas de pH onde o comportamento seja linear, se faz de suma importância para estabelecer um melhor controlador. Através da curva de titulação, Figura 1, destacaram-se cinco regiões lineares, que são as faixas escolhidas para os controladores: 2,25 a 3,5; 3,5 a 6,5; 6,5 a 7,6; 7,6 a 10,5; 10,5 a 11,94.

Figura 1: Curva de titulação de pH



Fonte: SERRANO, 2020.

A sintonia dos controladores PI foi feita pelo método de Ziegler-Nichols de Oscilações Contínuas e os parâmetros encontrados para controle estão na Tabela 1.

Tabela 1: Sintonias do controlador PI para as cinco faixas de pH

pH					
Ganhos	2,5 <pH <3,5	3,5 <pH <6,5	6,5 <pH <7,4	7,4 <pH <10,5	10,5 <pH <12,5
Kp	220,3	17,46	24,8	10,2	152,5
Ti	500	345	166,66	98,3	453

Fonte: SERRANO, 2020.

Este grupo tomou como base os parâmetros obtidos na Tabela 1 para aplicar o Método do Baricentro, tendo estes valores de sintonia como ponto de partida para as iterações do método.

4 PLANTA PILOTO DE TRATAMENTO DE pH

Este capítulo tem por objetivo descrever a Planta Piloto de Tratamento de pH, sendo dividido em três seções. A primeira seção apresenta uma descrição funcional da planta, a segunda a descrição da malha de controle de pH e, a terceira, a descrição do gêmeo digital da planta física.

Potencial hidrogeniônico de uma solução, aqui denotado por pH, representa uma escala numérica da medida da acidez ou basicidade dessa solução, sendo medido através da concentração de íons de hidrogênio (H^+). Considera-se um pH neutro o da água destilada, em que os íons de hidrogênio (H^+) têm a mesma concentração dos íons de hidroxila (OH^-) e o valor do pH é igual a 7. Partindo disso, soluções que possuam pH menor que 7 são tidas como ácidas e as que possuam pH maior que 7 são tidas como básicas. O pH pode ser expresso pela Equação 4.1.

$$pH = -\log(H) \quad (4.1)$$

4.1 Descrição Funcional

A Planta Piloto de Tratamento de pH, exibida na Figura 2, está localizada no Laboratório de Controle de Processos Industriais do prédio de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo. Realiza o processo industrial de neutralização de pH, por meio do ajuste das variáveis controladas de nível, temperatura, pressão e vazão.

O controle das malhas é feito por um Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), que executa as lógicas de controle e, em seguida, envia o sinal para os atuadores.

Figura 2: Planta Piloto de Tratamento de pH



Fonte: Autores.

Os dois tanques na plataforma superior, Figura 3, são iguais em capacidade e material e identificados por TAP (Tanque de Ácido Principal), o da esquerda, e TAS (Tanque de Ácido Secundário), o da direita, onde são preparadas uma solução com ácido clorídrico e água.

A mistura da solução ocorre através de sopradores de ar, que garantem uma mistura homogênea. Duas chaves de alto nível, uma em cada tanque, identificam o enchimento máximo dos tanques.

Nas entradas e saídas dos tanques de ácido existem válvulas solenoides para entrada de água e saída da solução ácida, respectivamente.

A vantagem de se ter dois tanques separados é possibilitar a preparação de soluções com concentração ácida diferentes, para o caso de um experimento de processo com perturbações, ou então concentrações iguais, para quando for realizado um experimento muito

longo e que utilize além da capacidade máxima do tanque principal.

Figura 3: Tanques de Ácido Principal e Secundário localizados na parte Superior da Planta de Controle de pH

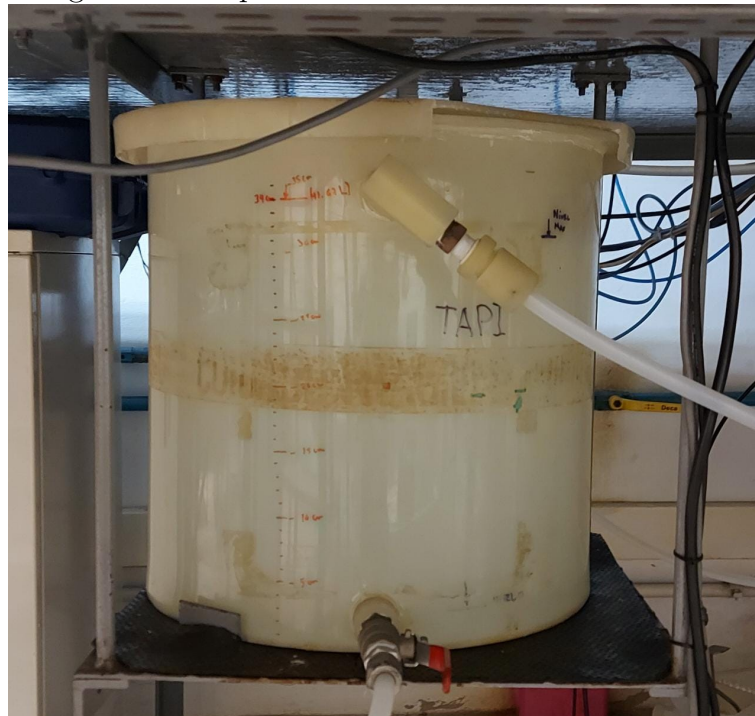


Fonte: Autores.

Os tanques superiores têm por função realizar armazenamento de solução ácida que irão alimentar dois tanques intermediários através da saída da solução pelas válvulas solenoides. Sob a plataforma superior, estão suspensos os tanques intermediários. Eles possuem controle de nível, são idênticos e possuem em suas saídas válvulas de controle manual. Esses tanques bloqueiam a entrada de fluido através de controle de nível. Isto ocorre de forma a manter o nível constante e, por consequência, pressão constante na saída dos tanques.

O tanque intermediário, localizado na esquerda da planta, é identificado como TAPI (Tanque de Ácido Principal Intermediário), Figura 4, e o tanque da direita da planta como TASI (Tanque de Ácido Secundário Intermediário), na Figura 5.

Figura 4: Tanque de Ácido Primário Intermediário



Fonte: Autores.

Figura 5: Tanque de Ácido Secundário Intermediário



Fonte: Autores.

A solução básica utiliza NaOH e é preparada no tanque TBB (Tanque de Base para Bomba), representado na Figura 6. O tanque possui uma entrada de água através de uma válvula solenoide e uma válvula para saída da solução básica, que alimenta uma bomba dosadora.

O nível do tanque é controlado por um sistema de segurança, através de uma chave de nível alto e baixo, uma vez que o tanque não pode estar vazio quando a bomba desodora entrar em operação, o que poderia danificar o equipamento.

De forma a manter a solução básica homogênea, o tanque TBB possui um soprador de agitação, mesmo mecanismo utilizado pelos Tanques de Ácido.

Figura 6: Tanque de Base para Bomba



Fonte: Autores.

Finalmente, na parte inferior central está o tanque TR (Tanque Reator), é onde ocorre a mistura das soluções ácidas e básica, que vêm dos tanques TAPI, TASI e TBB, respectivamente. Um agitador mecânico garante agitação no fundo do tanque, de forma a proporcionar homogeneização da mistura. Neste tanque são medidas as variáveis pH, temperatura, condutividade e nível.

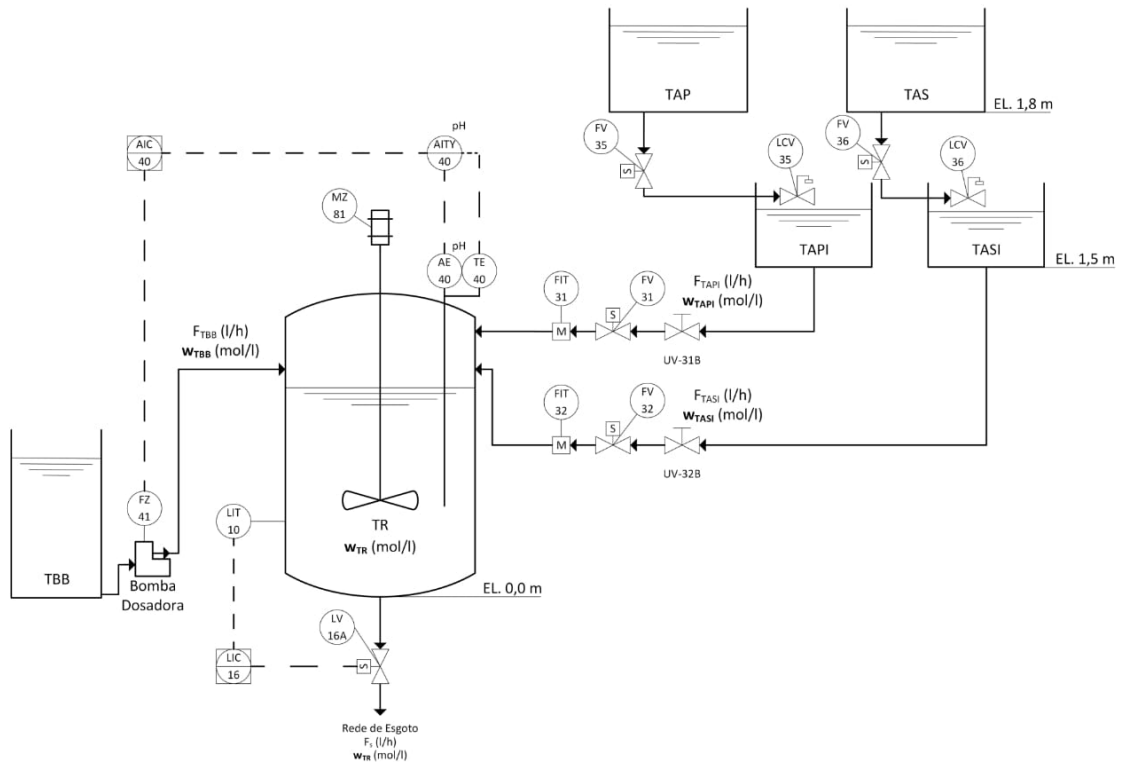
As soluções ácidas chegam ao Tanque Reator através de duas válvulas solenoides, que estão ligadas às válvulas manuais nas saídas dos tanques TAPI e TASI.

A solução básica é injetada no tanque através de uma válvula globo de controle, ligada à bomba dosadora.

Água fria é injetada no tanque através de outra válvula solenoide, de forma a permitir o controle de temperatura e condutividade. Além disso, para controle de temperatura, também há uma resistência que aquece a mistura.

Em (MARQUES, 2015) é apresentado o P&ID (do Inglês, *Piping and Instrumentation Diagram*) da Planta Piloto de Tratamento de pH, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: P&ID da Planta Piloto de Tratamento de pH



Fonte: Marques (2015).

4.2 Malha de Controle de pH

A malha de controle de pH tem como a variável de processo o valor do pH medido no tanque reator e a variável manipulada é o valor do sinal de acionamento da bomba dosadora de base. O modo do controlador é de ação reversa, porque com a diminuição do pH, a bomba deve aumentar a sua vazão de dosagem, para enviar mais solução básica para o tanque reator, e com o aumento do pH a vazão deve diminuir para enviar menos solução básica.

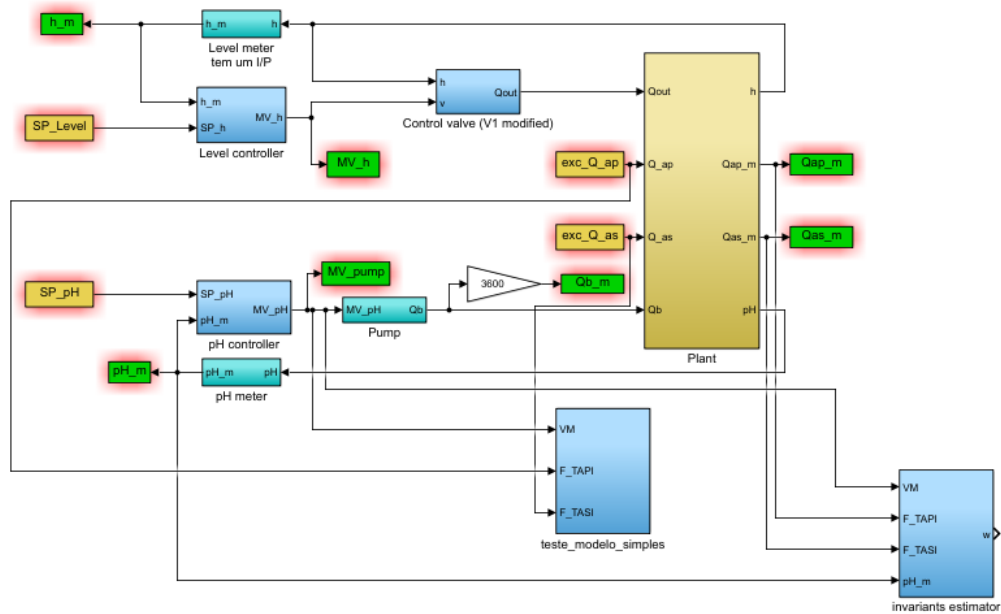
4.3 Gêmeo Digital

O gêmeo digital da Planta Piloto de Tratamento de pH, mostrado na Figura 8 em ambiente Simulink[®], é o modelo matemático desenvolvido por (MARQUES, 2015). Esse modelo foi utilizado nesse projeto e o seu controlador foi modificado, de acordo com a

sintonia do Método do Baricentro.

No gêmeo digital é possível configurar os valores desejados ($setpoint = SP$) de nível e pH. A planta, juntamente com o controlador, fornece valores de nível, pH e vazão como saída. As variáveis terminadas em $_m$ são as medidas por sensores, enquanto que as que começam com $MV_$, são as variáveis manipuladas.

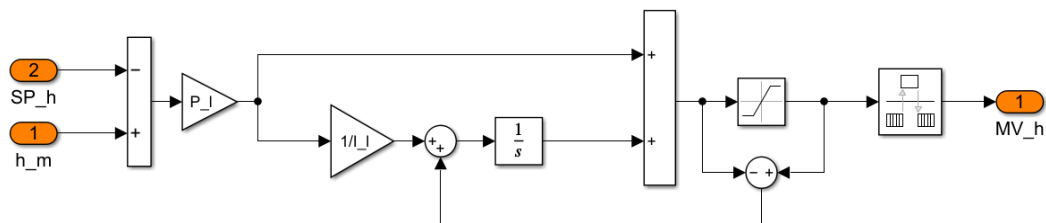
Figura 8: Gêmeo Digital da Planta Piloto de Tratamento de pH desenvolvido no Simulink®



Fonte: Marques (2015)

O modelo digital utiliza um controlador Proporcional-Integral (PI) para o controle das variáveis nível e pH. As malhas estão representadas respectivamente nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Malha de controle do nível no Gêmeo Digital da Planta Piloto de Tratamento de pH no Simulink



Fonte: Marques (2015)

5 PROJETO DE SINTONIA DO CONTROLADOR PI

Neste capítulo são apresentados o desenvolvimento dos códigos do Método do Baricentro para sintonia de um controlador PI e a sua aplicação na Planta Piloto de Tratamento de pH.

5.1 Método do Baricentro

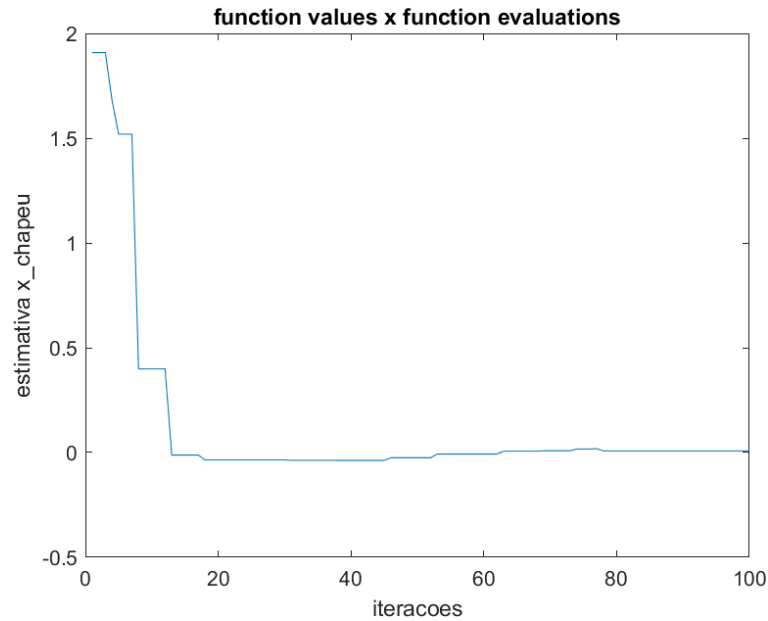
5.1.1 Desenvolvimento do código do Método do Baricentro

Ao longo do projeto, foram desenvolvidas 4 versões de código do Método de Otimização do Baricentro no MATLAB®.

5.1.1.1 Primeira versão

O método consiste em minimizar uma função custo. Com base nisso, foi desenvolvida uma primeira versão do código, que visa encontrar o mínimo de uma função custo desejada. Para um primeiro teste, utilizou-se a função $f = x^2$, que posteriormente é substituída pela função custo do erro. Ao simular o código desenvolvido, foi possível obter o gráfico da Figura 11, que leva os valores da estimativa para zero, conforme esperado.

Figura 11: Gráfico da estimativa do valor mínimo da função $f = x^2$ pelo Método do Baricentro



Fonte: Autores

5.1.1.2 Segunda versão

Dado os resultados apresentados, foi desenvolvida uma segunda versão, que é integrada ao gêmeo digital da Planta Piloto de Tratamento de pH, a fim de utilizar o sinal de erro entre o *setpoint* e o valor medido da variável pH na função custo.

Nesta nova versão, a cada iteração do Método do Baricentro, é realizada uma simulação no gêmeo digital, com um valor aleatório definido pela função *randn*, utilizada para selecionar aleatoriamente valores dos parâmetros de ganho (K_c) e tempo de integração (T_i) do controlador PI da variável pH, o que resulta em um valor de erro, que é utilizado como parte da função custo, que calcula o peso dos parâmetros aleatórios.

A função custo utilizada é $\int e^2(t)$ (integral do erro ao quadrado), equivalente ao valor do índice ISE (Integral Square Error). Portanto, basta comparar os índices ISE para cada par de valores de K_c e T_i resultante do método, a fim de avaliar o seu desempenho.

Foram realizadas simulações com esta versão, definindo como valores iniciais $K_c = 0$ e $T_i = 1$, tempo de simulação do gêmeo digital em 10.000 segundos, número de iterações em $n = 35$. Cada simulação resultou em valores diferentes de baricentro estimado, porque a função randômica realiza escolhas diferentes e o baricentro resultante acaba sendo diferente também. Uma terceira simulação foi realizada, aumentando o número de iterações ($n = 50$).

Os resultados estão resumidos na Tabela 2 e foram utilizados cada um dos pares para simular o controlador no gêmeo digital, obtendo-se os valores de ISE registrados na mesma tabela.

A partir dos valores da Tabela 2, é perceptível que um maior número de iterações proporciona uma melhor busca do baricentro.

Tabela 2: Resultados da segunda versão do código do Método do Baricentro

	Kc	Ti	ISE
Controlador pré-configurado no gêmeo digital	1.5	200	673.3589
1a Simulação com 35 iterações	3.0	7.8	487.9603
2a Simulação com 35 iterações	3.8	0.25	1384.4
3a Simulação com 50 iterações	6.33	7.87	348.4129

Fonte: Autores

5.1.1.3 Terceira versão

Dados os resultados da segunda versão e a forma como o baricentro é calculado pelo método, decidiu-se realizar mais simulações com um número maior de iterações ($n = 75$) e, dessa forma, otimizar o Método do Baricentro. Um maior número de iterações proporciona mais valores com seus respectivos pesos calculados, possibilitando um cálculo mais acurado do baricentro.

Nesta versão foi substituída a função *randn* do Matlab pela função *random*. Ambas geram uma sequência de números aleatórios normalmente distribuídos, porém com a segunda opção é possível controlar o desvio padrão σ da distribuição normal, o que possibilita buscas mais bruscas, com maiores desvios, ou mais finas, com menores desvios.

Foram realizadas 3 simulações com esta versão, com desvios da distribuição aleatória diferentes. A primeira simulação foi com o desvio de $\sigma=1.0$, que seria igual à versão anterior, a segunda foi com o desvio menor, $\sigma=0.2$, que proporciona uma busca mais fina, com valores aleatórios mais próximos do baricentro, e a terceira foi com o desvio maior, $\sigma=5.0$, que possibilita uma busca mais brusca, com valores aleatórios mais amplos e mais distantes do baricentro.

Para o cálculo do baricentro nas três situações, foi considerado como chute inicial do par de parâmetros do controlador os valores de $Kc = 6.33$ e $Ti = 7.87$, que foi o par de parâmetros resultado da versão anterior com o melhor desempenho. Os resultados dos valores ISE foram conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da terceira versão do código do Método do Baricentro com 75 iterações, com diferentes desvios da distribuição aleatória

	Kc	Ti	ISE
Melhor valor da versão anterior	6.33	7.87	348.4129
$\sigma=1.0$	6.94	9.99	320.3650
$\sigma=0.2$	6.23	7.81	324.6411
$\sigma=5.0$	3.90	20.96	314.3074

Fonte: Autores

5.1.1.4 Quarta versão

Na última versão desenvolvida, a fim de realizar uma busca mais fina e precisa pelo baricentro, a quantidade de iterações foi aumentada para 300 e modificou-se a forma da busca aleatória. A cada iteração no método, os valores de desvio padrão da aleatoriedade σ são modificados, começando com 5 e diminuindo até 0.1. Para o parâmetro de média μ da distribuição, adotou-se uma média variável no tempo, determinada pela diferença entre o valor de baricentro da iteração atual e o valor de baricentro de k iterações anteriores, multiplicado por um fator de esquecimento ρ e dividido por k (Equação 5.1). O código foi modificado, baseada neste método.

$$\mu = \frac{\hat{x}(n) - \hat{x}(n-k)}{k} \rho \quad (5.1)$$

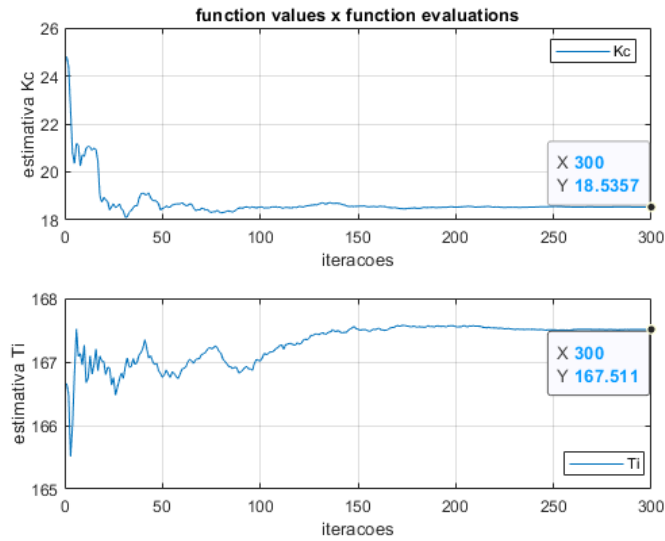
No momento que se chegou a esta versão do método, o grupo obteve acesso ao LCPI e à planta física e estava no processo de aprendizado de operação da planta. Fez-se então uma nova busca do baricentro, considerando como valores iniciais $Kc = 24.8$ e $Ti = 166.66$ dos parâmetros do controlador PI, extraído de (SERRANO, 2020), que obteve estes valores a partir de testes com a planta física. A simulação com 300 iterações levou cerca de 2 horas para ser concluída. Com isso, obteve-se o resultado da Figura 12 e a Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da simulação do gêmeo digital com os valores de PI da planta física e com os valores da quarta versão do código do Método do Baricentro

	Kc	Ti	ISE
Valores utilizados no PI da planta física	24.8	166.66	437.7698
Valores com a 4a versão do Método do Baricentro	18.5357	167.511	416.5057

Fonte: Autores

Figura 12: Gráfico da estimativa de K_c e T_i na quarta versão do código do Método do Baricentro



Fonte: Autores

5.1.2 Resultados do Método

A primeira versão do código desenvolvida pelos autores foi de suma importância para o entendimento de como o método busca minimizar a função custo no cálculo da fórmula do baricentro.

As versões posteriores foram integradas ao gêmeo digital da planta, com o intuito de utilizar o sinal do erro, entre o *setpoint* e o valor medido do pH, na função custo, a fim de minimizar este erro.

Na terceira versão, a forma de busca aleatória foi modificada, alterando as variâncias da distribuição gaussiana da aleatoriedade, com objetivo de entender como isso afeta o método do baricentro. Isso mostrou que uma variância maior nos proporciona uma busca mais brusca, enquanto que uma variância menor resulta numa busca mais refinada.

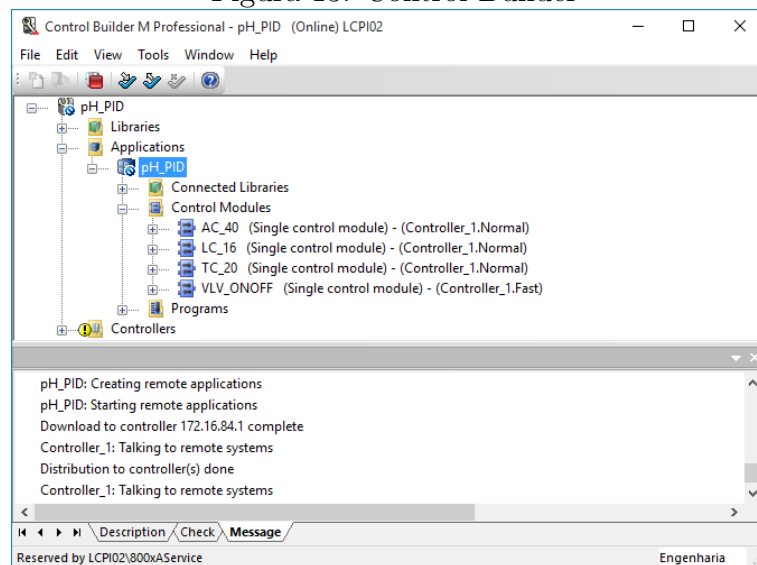
Na última versão, alterou-se a busca aleatória com a finalidade de que a média e variância da aleatoriedade gaussiana fossem adaptadas a cada iteração. A variância seria reduzida ao longo das iterações e a média seria variável, de forma a direcionar a busca pelo baricentro.

5.2 Validação do Método de Baricentro na Planta Piloto de Tratamento de pH

5.2.1 Laboratório de Controle de Processos Industriais

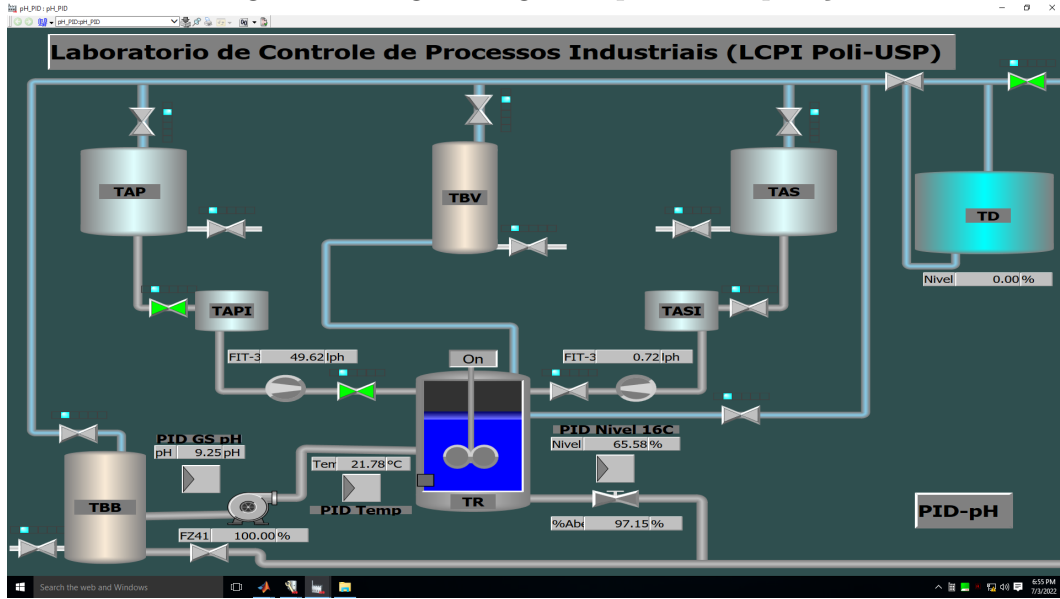
Foram realizadas visitas ao Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no qual foram feitos testes com a Planta Piloto de Tratamento de pH. Com o auxílio de dispositivos como Controlador Lógico Programável (CLP), Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) e servidor OPC (*Open Platform Communications*, ou Plataforma Aberta de Comunicações, em Português), é possível comandar a operação da planta através de um computador, utilizando os programas *Control Builder*, *Engineering Workplace* e *Matlab* (Figuras 13 a 14).

Figura 13: Control Builder



Fonte: Autores

Figura 14: Engineering Workplace em operação

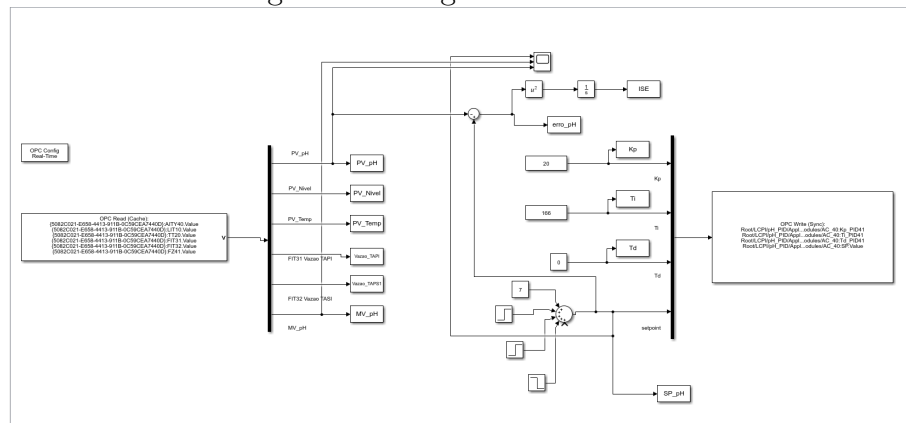


Fonte: Autores

5.2.2 Experimento na planta com um tanque de ácido ativo

Utilizamos o controlador já existente no *Engineering Workplace* e o Simulink® foi integrado através do OPC para definir os parâmetros do controlador juntamente ao *setpoint* e para obter os sinais PV (variável de processo) e MV (variável manipulada), conforme a Figura 15.

Figura 15: Diagrama do Simulink

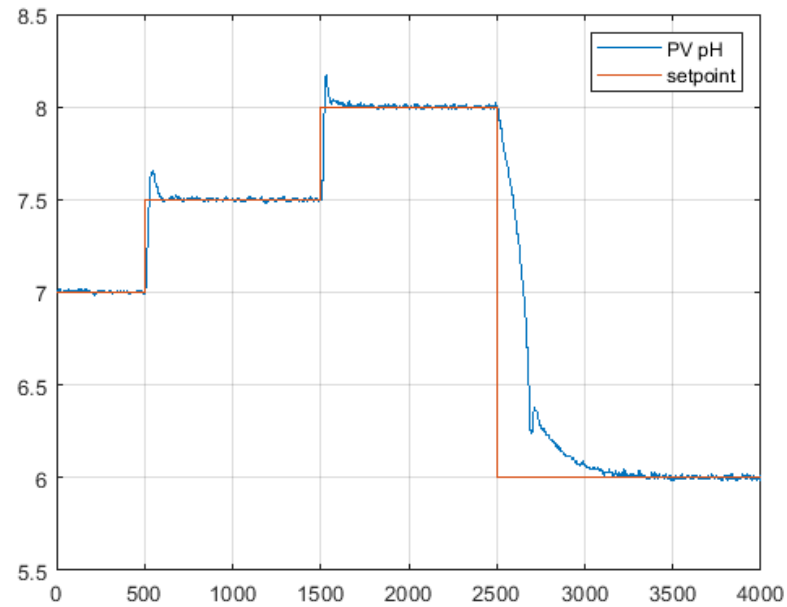


Fonte: Autores

Com o diagrama desenvolvido, realizamos a operação no modo servo com os parâmetros do controlador obtidos pelo Método do Baricentro na Tabela 4. Para realizar o experimento no modo servo, foi criado um *setpoint* variável de 4.000 segundos. O resultado foi

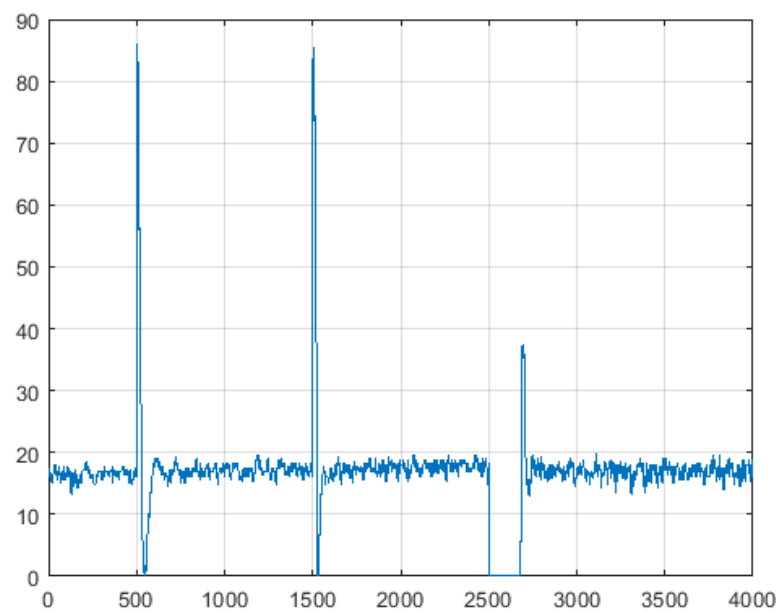
conforme as Figuras 16, 17 e 18 para os valores obtidos com o método.

Figura 16: Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro



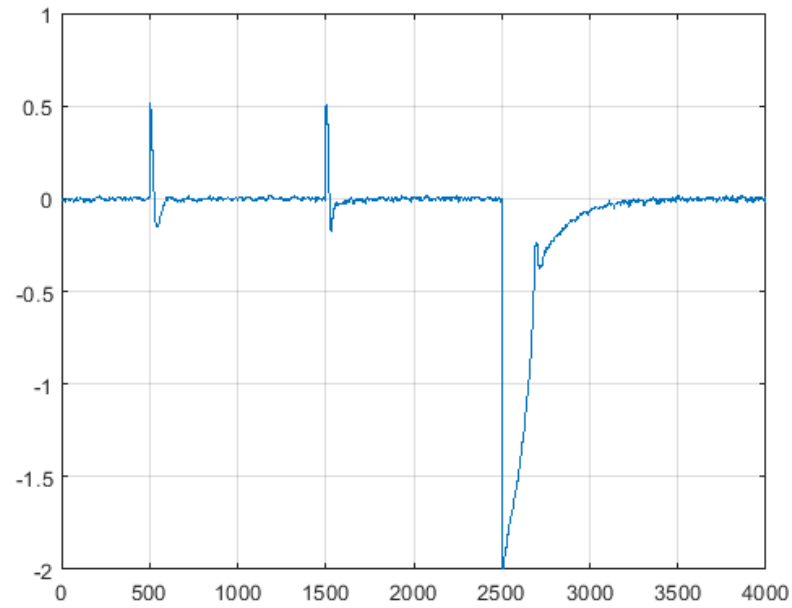
Fonte: Autores

Figura 17: MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro



Fonte: Autores

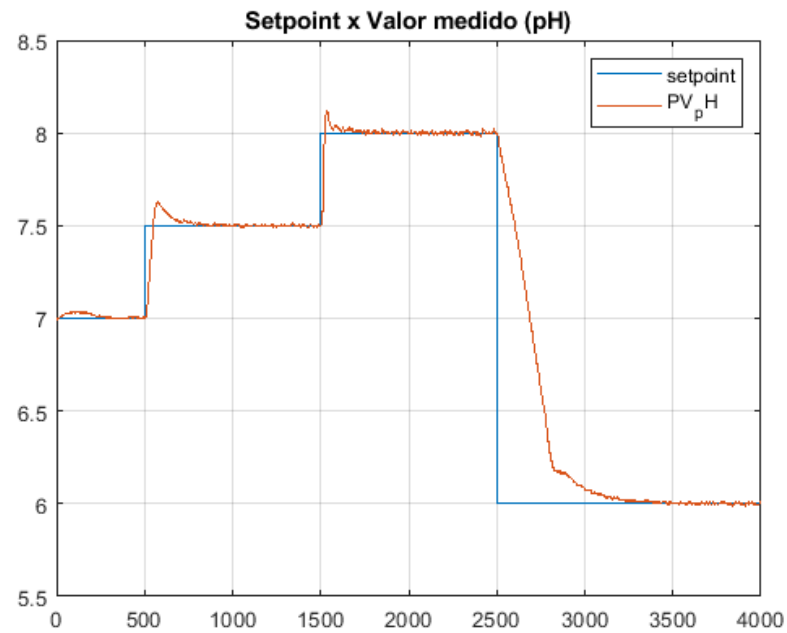
Figura 18: Erro da operação na planta física no modo servo com os valores do Método de Baricentro



Fonte: Autores

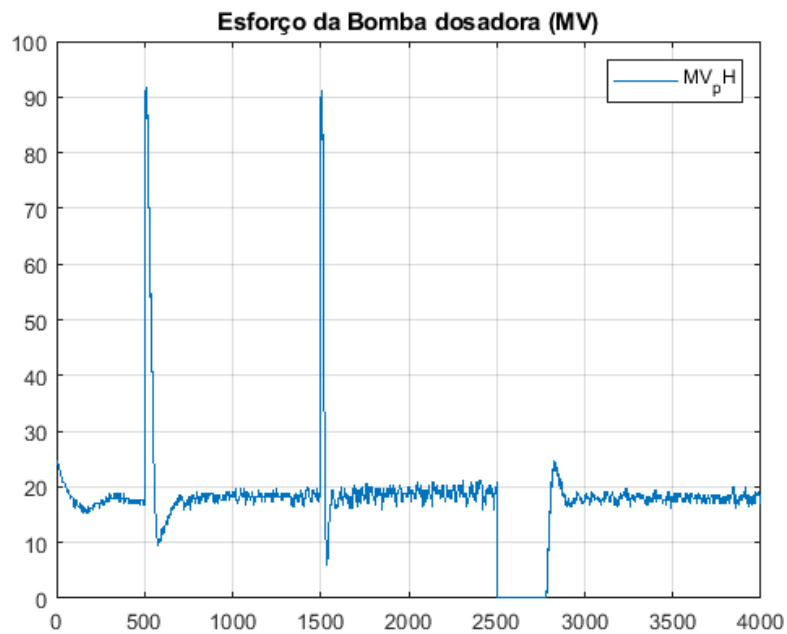
Foi realizada também a operação no modo servo com os valores já utilizados na planta para comparação. O *setpoint* variável foi o mesmo utilizado para a operação anterior. O resultado foi conforme as Figuras 19, 20 e 21.

Figura 19: Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório



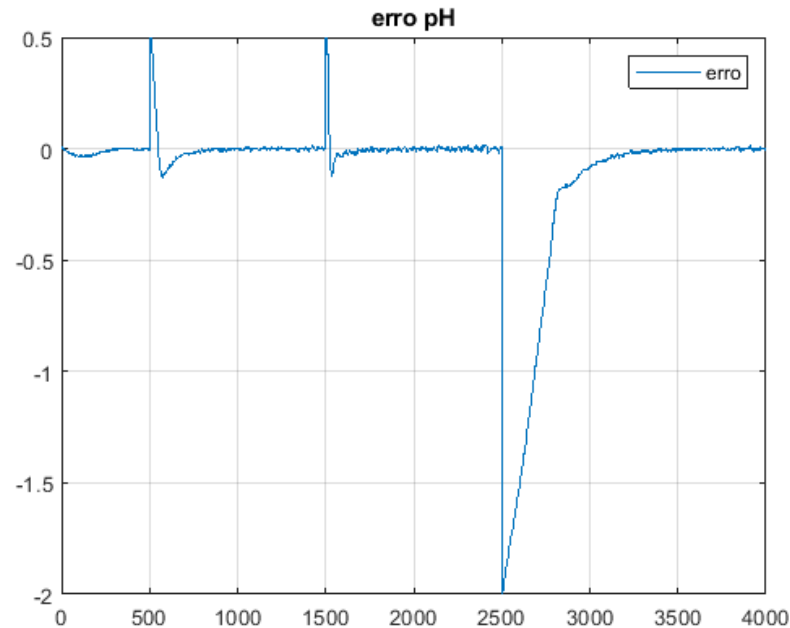
Fonte: Autores

Figura 20: MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório



Fonte: Autores

Figura 21: Erro da operação na planta física no modo servo com os valores do Laboratório



Fonte: Autores

Com as operações realizadas, foi possível obter o ISE de cada uma para avaliar o desempenho. Os resultados estão na Tabela 5. Conforme visto na simulação do método do baricentro, foi obtido um menor ISE com os valores do controlador calculados pelo Método do Baricentro, portanto o método se mostrou eficiente.

Tabela 5: Resultados da operação na planta física com os valores de PI utilizados na planta física no laboratório e com os valores da quarta versão do código do Método do Baricentro

	Kc	Ti	ISE
Valores do controlador utilizados no Laboratório	20	166	525.9131
Valores do controlador calculados com a 4a versão do Método do Baricentro	18.5357	167.511	429.3544

Fonte: Autores

5.2.3 Experimento na planta com os dois tanques de ácido ativos

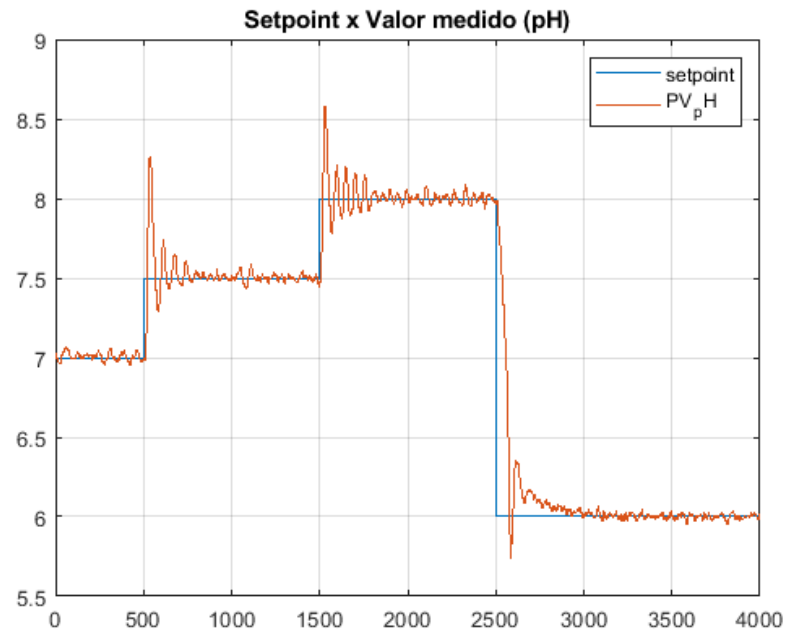
O experimento na planta física demonstrou um comportamento diferente do esperado na descida do setpoint, em que a variável de processo teve uma queda lenta. Isso significa que a vazão do tanque de ácido não está sendo suficientemente grande para que o pH da

variável de processo acompanhe a descida brusca do *setpoint*.

Dado isso, foi planejado a realização da mesma experiência com os dois tanques de ácido ativos, aumentando a vazão de ácido no tanque reator em duas vezes. Para o experimento no modo servo, o *setpoint* variável foi o mesmo.

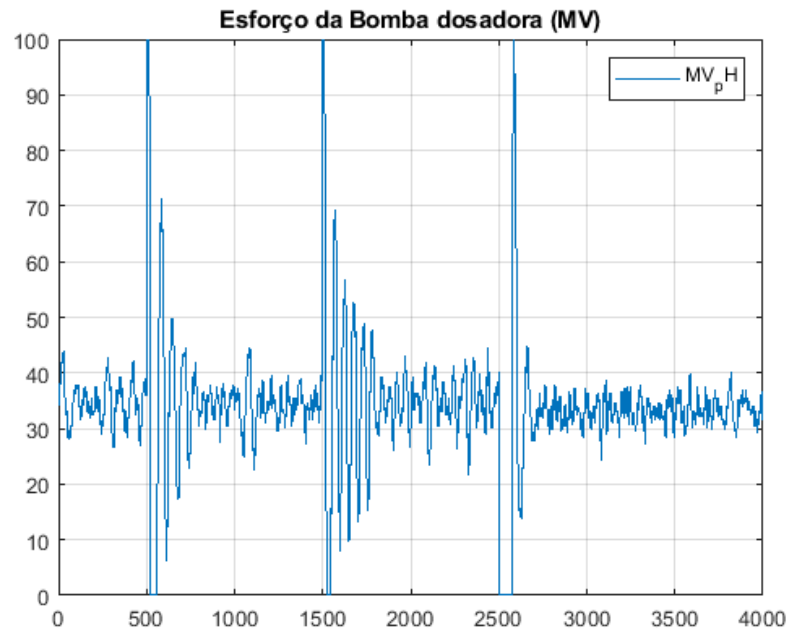
O resultado do experimento no modo servo com os parâmetros do controlador utilizados no laboratório e com os dois tanques de ácido ativos, foi conforme as Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22: Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório



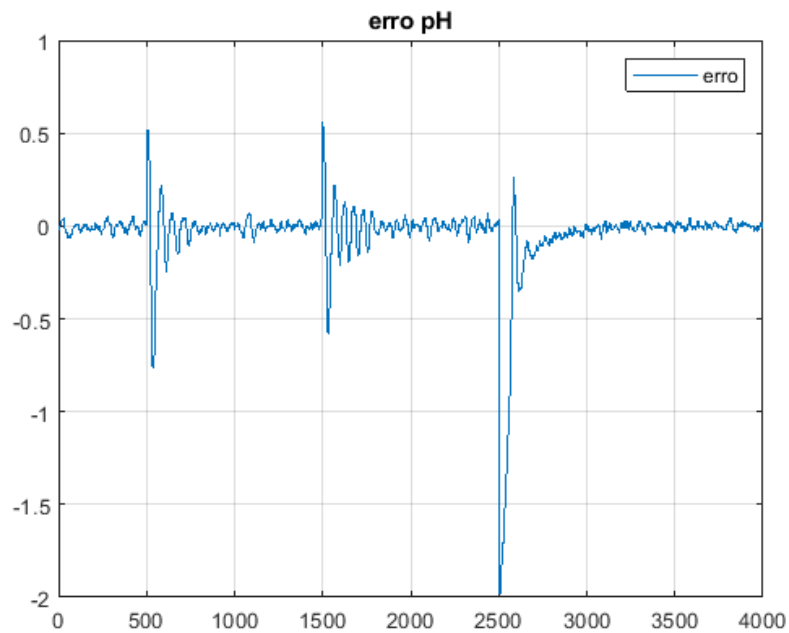
Fonte: Autores

Figura 23: MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório



Fonte: Autores

Figura 24: Erro da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Laboratório



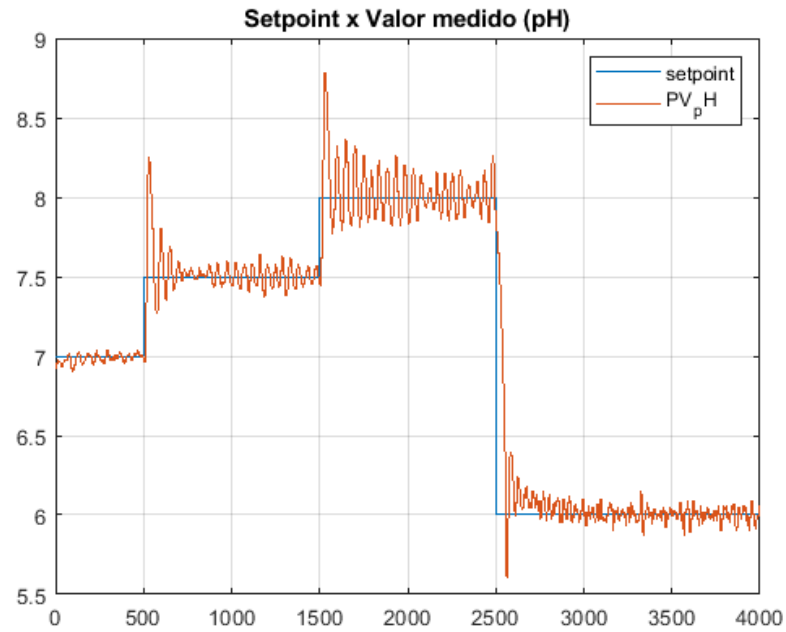
Fonte: Autores

Com os dois tanques ativos é possível identificar uma queda mais rápida e do PV na

queda do *setpoint* e o acionamento da bomba dosadora mais frequente, como esperado, já que com uma maior vazão de ácido é necessário uma maior vazão de solução básica.

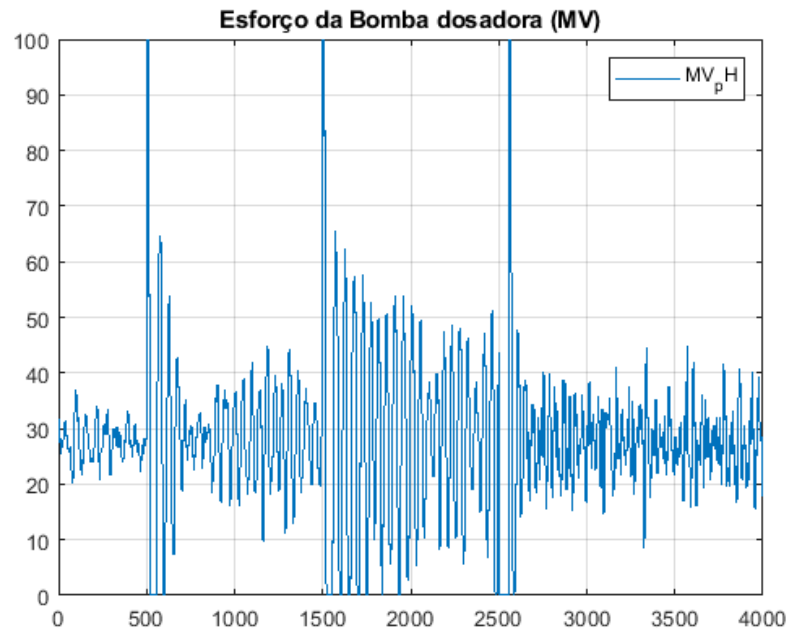
Foi realizado o mesmo experimento na planta física com dois tanques de ácido ativos para os valores dos parâmetros do controlador obtidos com o Método do Baricentro. O resultado se encontra nas Figuras 25, 26 e 27.

Figura 25: Setpoint e PV (pH medido) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro



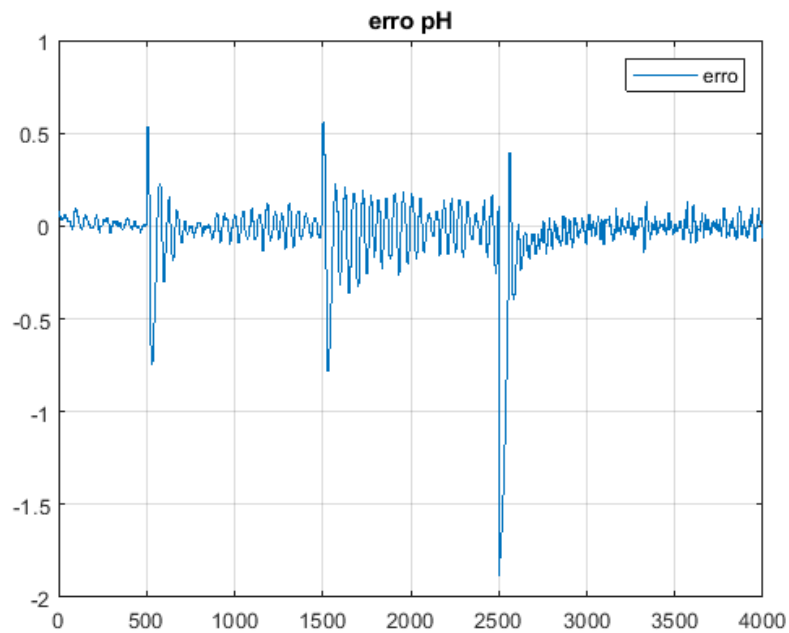
Fonte: Autores

Figura 26: MV (acionamento da bomba dosadora) da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro



Fonte: Autores

Figura 27: Erro da operação na planta física no modo servo com dois tanques de ácido ativos e com os valores do Método do Baricentro



Fonte: Autores

Os resultados do índice ISE se encontram na Tabela 6 para comparação.

Tabela 6: Resultados da operação na planta física no modo servo com os dois tanques de ácido ativos

	Kc	Ti	ISE
Valores utilizados no Laboratório	20	166	201.6912
Valores com a 4a versão do Método do Baricentro	18.5357	167.511	165.2809

Fonte: Autores

O valor do índice ISE calculado com o dobro de vazão de ácido se mostrou menor do que nos experimentos anteriores.

5.2.4 Resultado dos Experimentos no Laboratório

Os experimentos realizados com os parâmetros do controlador PI calculados pelo Método do Baricentro resultaram num menor índice ISE quando comparados aos experimentos com parâmetros já utilizados no Laboratório. O que mostra a eficiência do método em encontrar valores que reduzem a função custo.

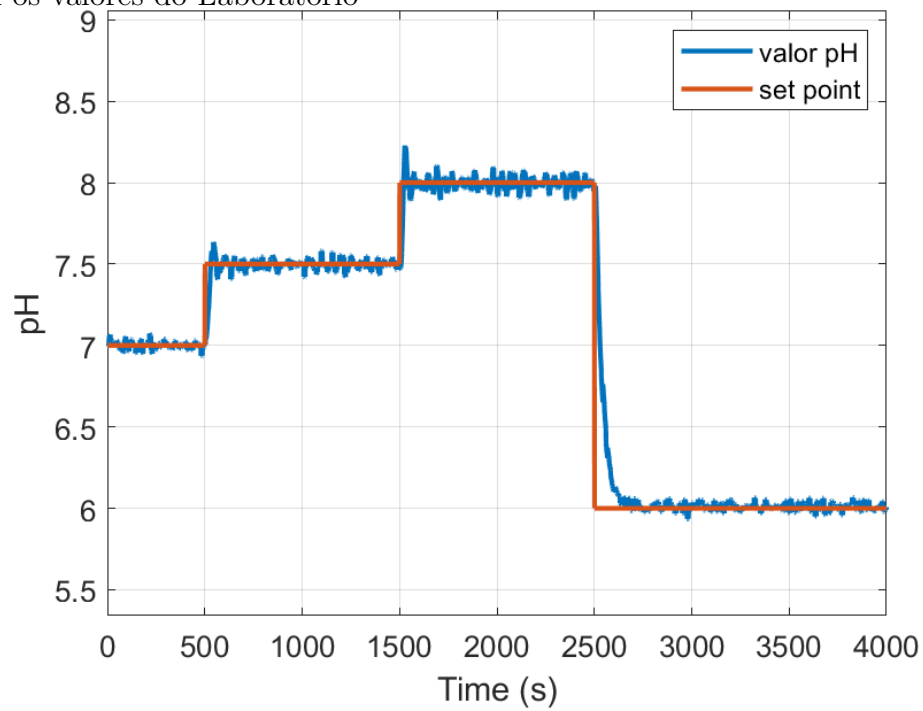
As experiências com dois tanques ativados, duplicando a vazão do ácido, acabou mostrando uma maior oscilação da variável de projeto, porém resultou em índices de ISE menores. Isso se explica pela reação mais rápida do pH no tanque reator nos momentos de queda do *setpoint* de pH, que resulta em um menor erro acumulado.

5.2.5 Ajuste do gêmeo digital

Dado o experimento na planta física, percebemos que seriam necessários alguns ajustes na planta do modelo digital, de modo que o resultado das simulações se aproxime do modelo físico. Com isso foi também necessário recalcularmos os parâmetros do controlador. Foram ajustadas as propriedades do bloco *PID Controller* no *Simulink* do modelo digital, tomando como referência o resultado do experimento físico.

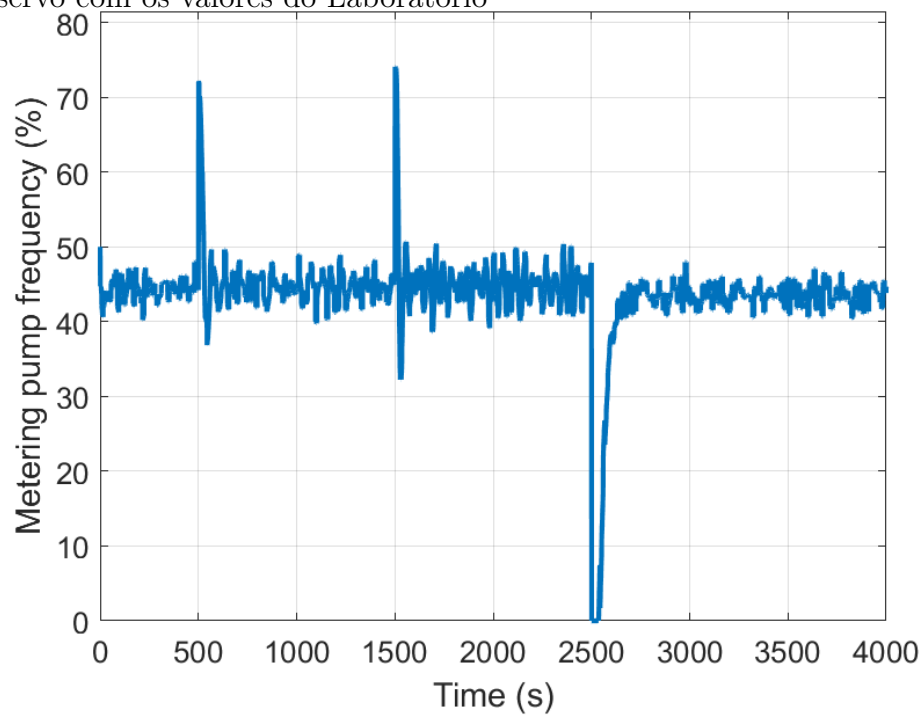
Após os ajustes, realizamos uma nova simulação no modelo digital no modo servo com o mesmo *setpoint* variável. O resultado foi conforme as Figuras 28, 29 e 30.

Figura 28: Setpoint e PV (pH medido) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório



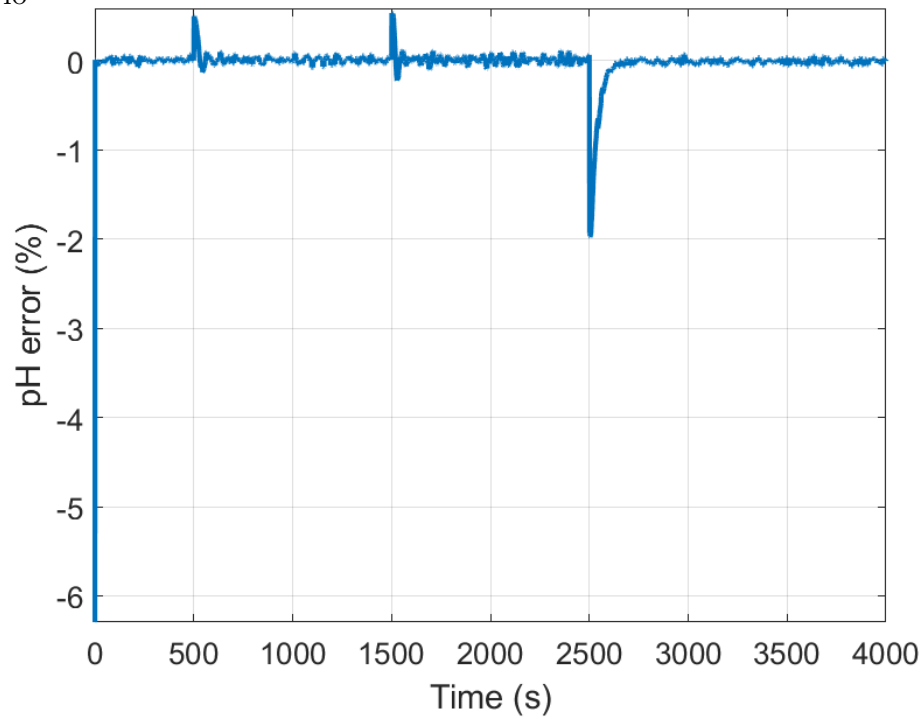
Fonte: Autores

Figura 29: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório



Fonte: Autores

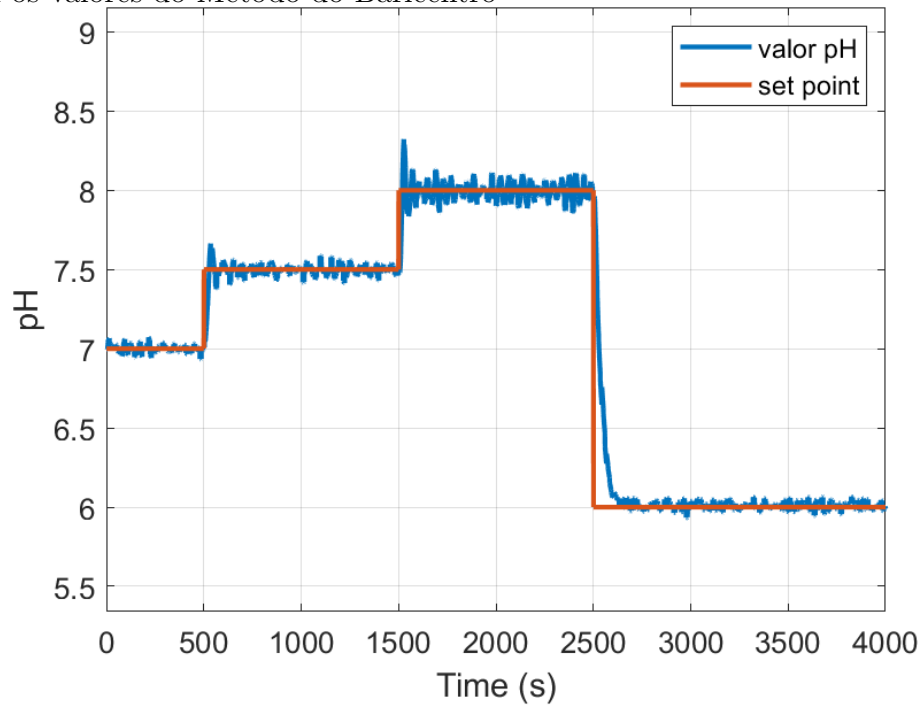
Figura 30: Erro da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Laboratório



Fonte: Autores

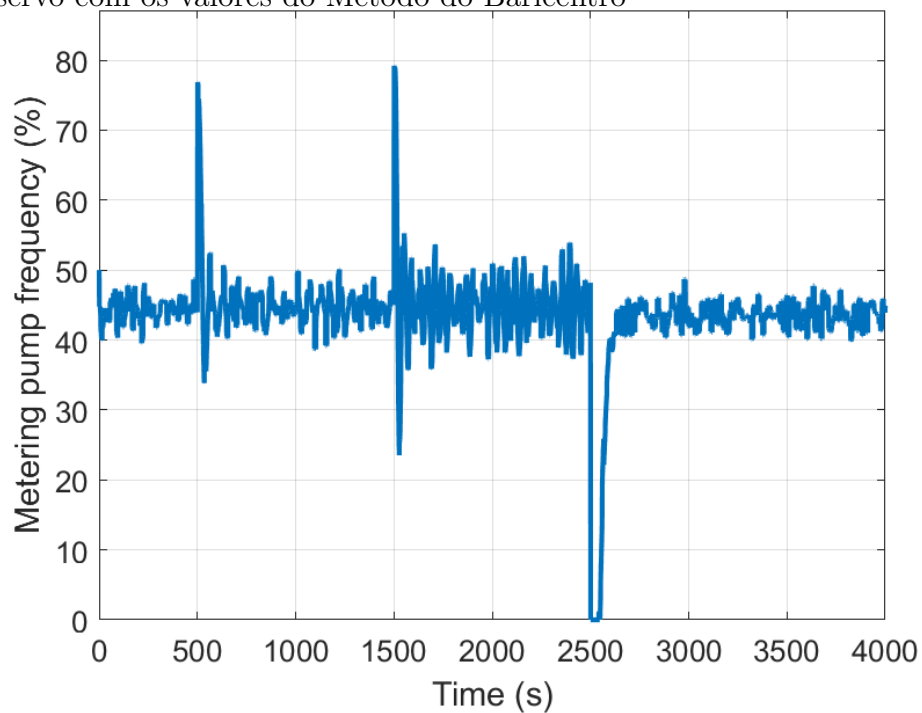
Com este modelo ajustado foi realizado um novo cálculo dos parâmetros do controlador com a planta digital ajustada. Obtiveram-se os parâmetros $K_c = 23.5590$ e $T_i = 164.1295$ para o controlador PI. Simulando a planta digital com estes parâmetros, foram obtidos os seguintes resultados, conforme as Figuras 31, 32 e 33.

Figura 31: Setpoint e PV (pH medido) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro



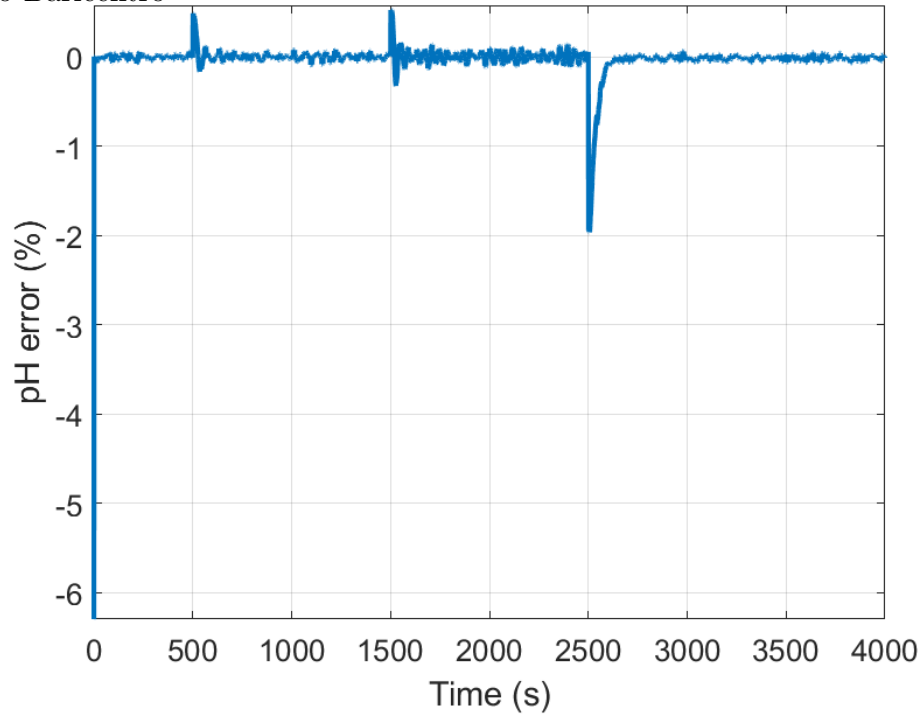
Fonte: Autores

Figura 32: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro



Fonte: Autores

Figura 33: Erro da simulação na planta digital ajustada no modo servo com os valores do Método do Baricentro



Fonte: Autores

Os desempenhos calculados pelo índice ISE foram conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Resultados da simulação na planta digital ajustada

	K_c	T_i	ISE
Valores utilizados no Laboratório	20	166	154.0943
Valores com a 4a versão do Método do Baricentro	23.5590	164.1295	153.2826

Fonte: Autores

O ajuste foi fundamental para a realização das simulações para o controle adaptativo, uma vez que, na busca pelo baricentro, utiliza um *setpoint* variável com degraus pequenos, sendo necessário maior precisão na simulação.

5.2.6 Diferentes faixas de pH

Foram feitos experimentos no modo regulatório e no modo servo para diferentes faixas de pH.

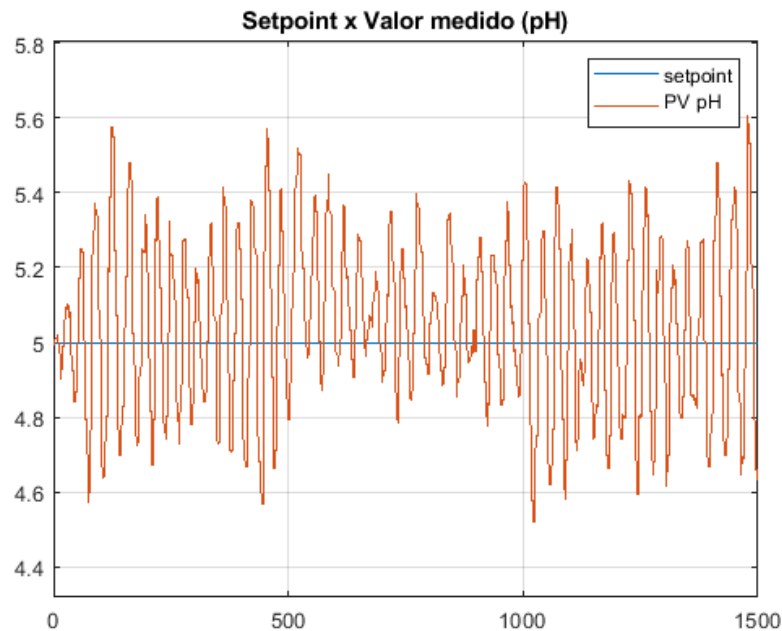
No modo regulatório, os dois tanques de ácido permanecem com vazão constante por 500 segundos, momento em que um dos tanques é fechado. Em seguida, essa situação permanece por mais 500 segundos e, então, o segundo tanque é reaberto. Observa-se como o esforço de controle varia nesse cenário para rastrear o *setpoint*.

No modo servo, a vazão de ácido permanece constante todo o experimento. Aos 500 segundos o *setpoint* aumenta em 0,5, depois de mais 500 segundos ele retorna ao valor original, com mais 500 segundos o *setpoint* diminui 0,5 e, por fim, passados mais 500 segundos retorna ao *setpoint* original.

Foram realizados ensaios na faixas de pH 5, 7 e 9. Para cada faixa, foi calculado um par de valores de controlador (ganho proporcional e tempo de integração) com o Método do Baricentro e os ensaios foram realizados tanto com os valores calculados, quanto com os valores já utilizados no Laboratório.

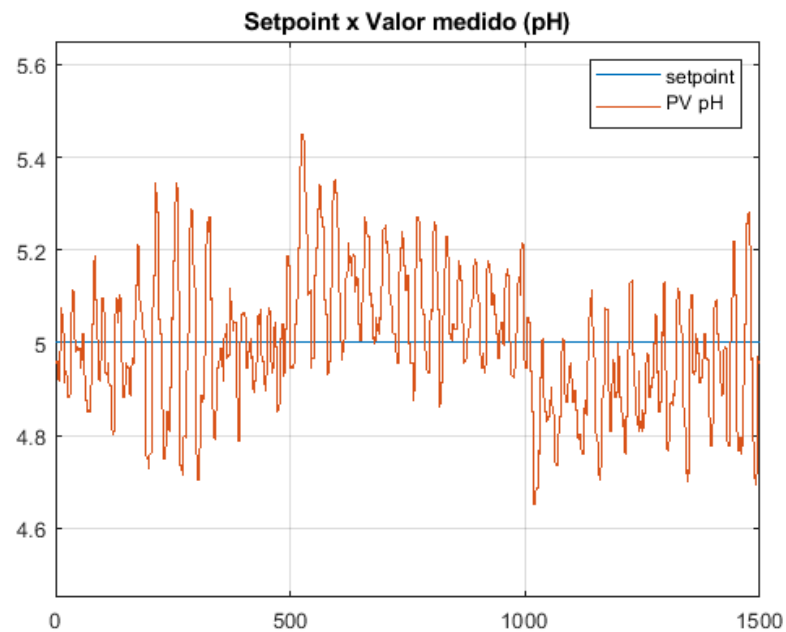
Os resultados são apresentados a seguir, em forma de gráficos do pH e do esforço de controle.

Figura 34: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



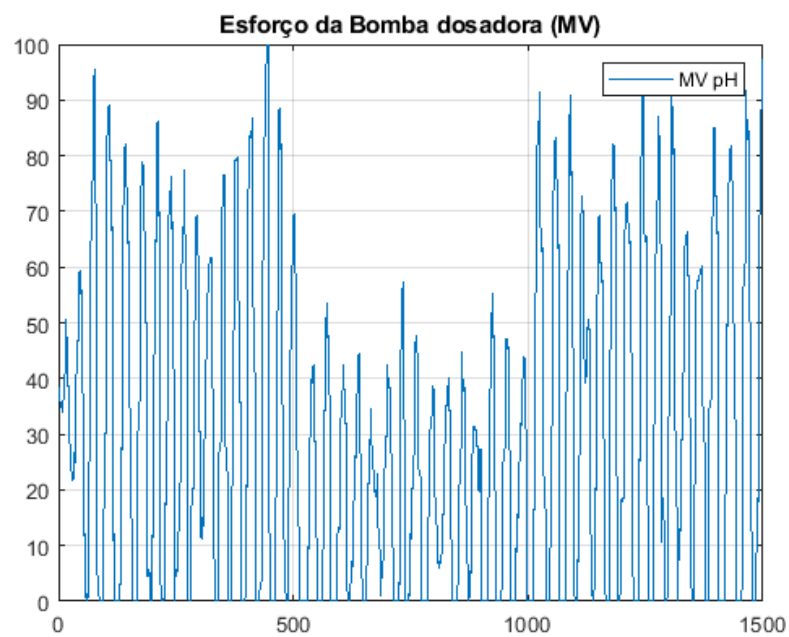
Fonte: Autores

Figura 35: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



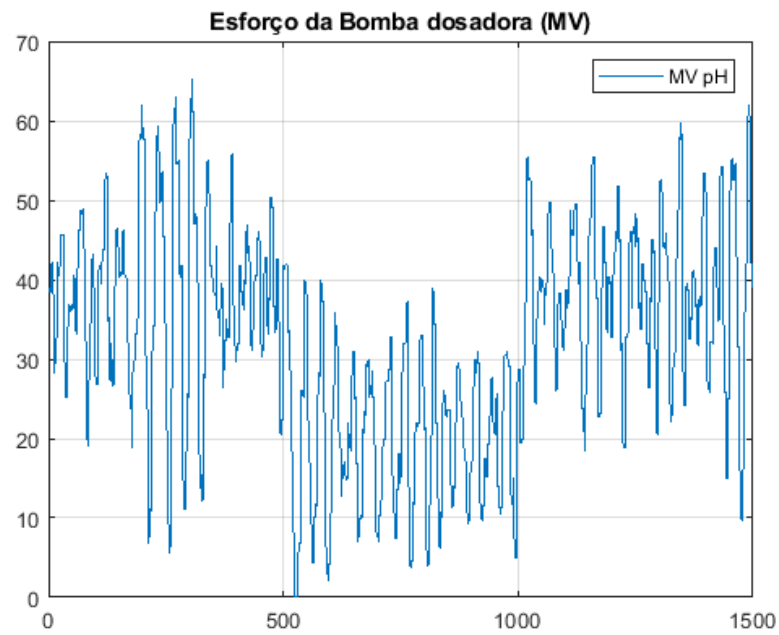
Fonte: Autores

Figura 36: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



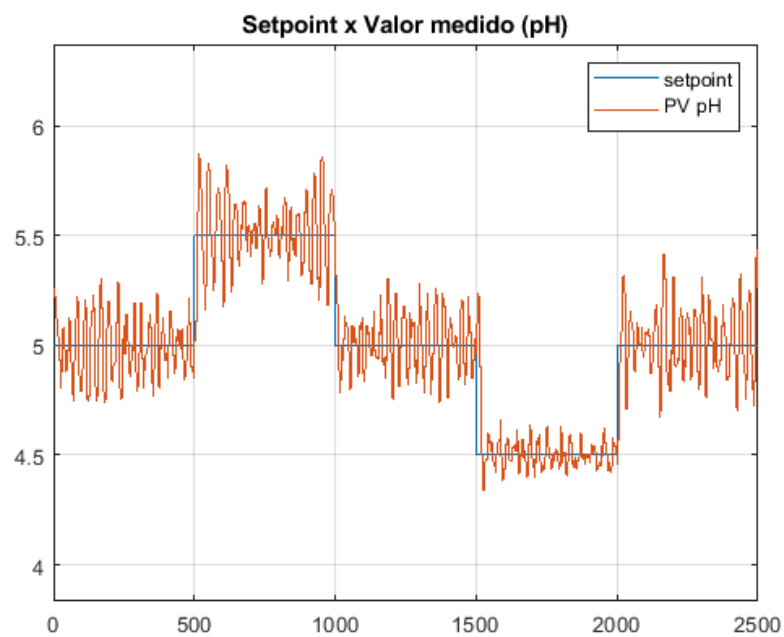
Fonte: Autores

Figura 37: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



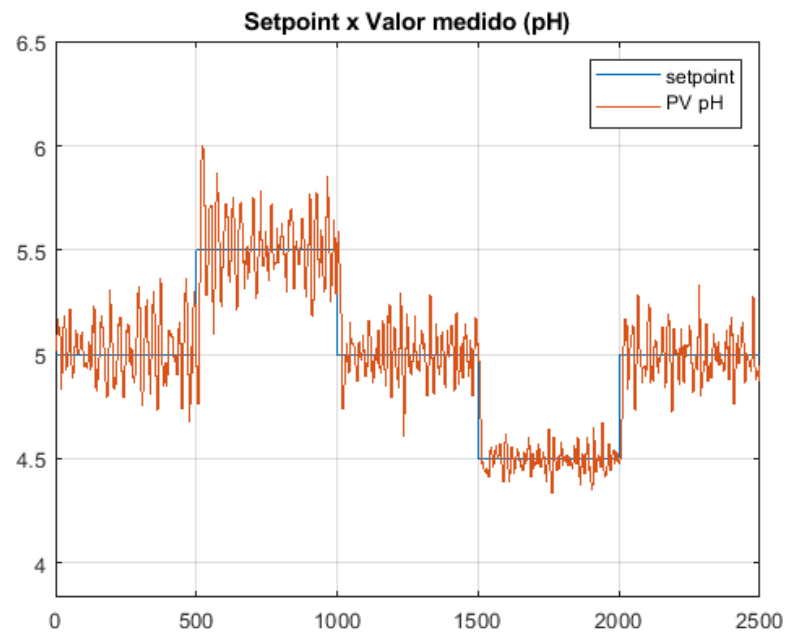
Fonte: Autores

Figura 38: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



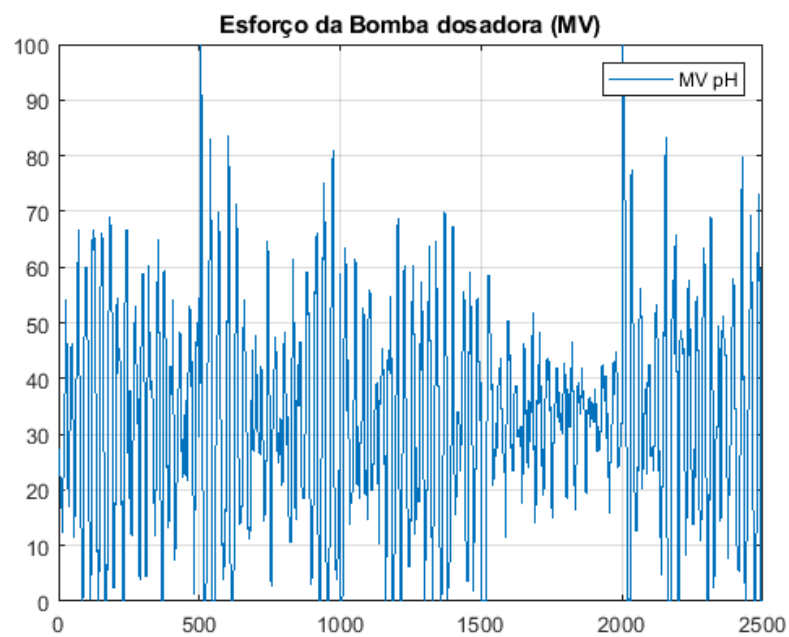
Fonte: Autores

Figura 39: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



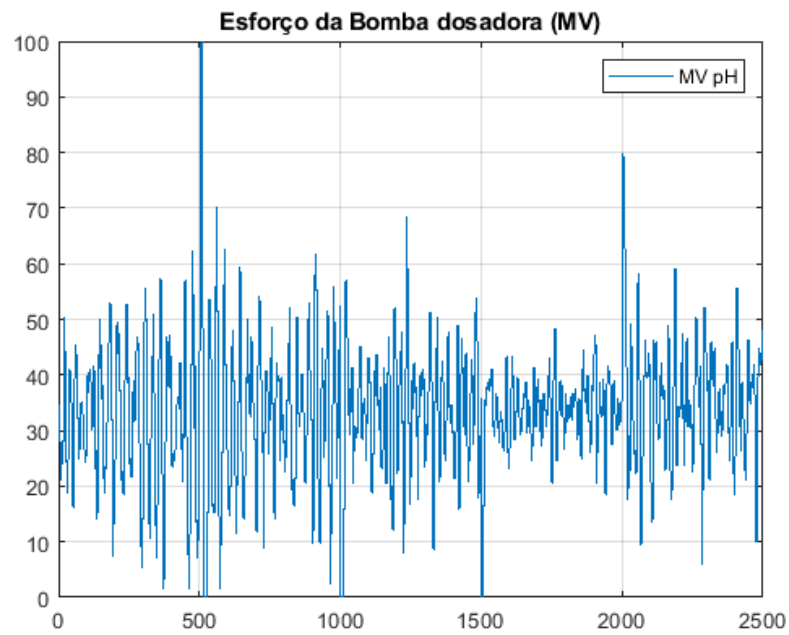
Fonte: Autores

Figura 40: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



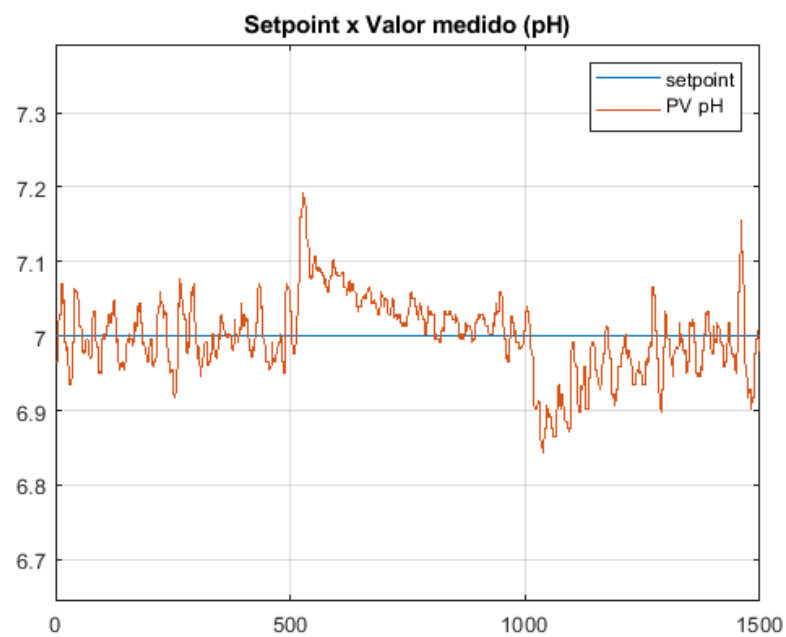
Fonte: Autores

Figura 41: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



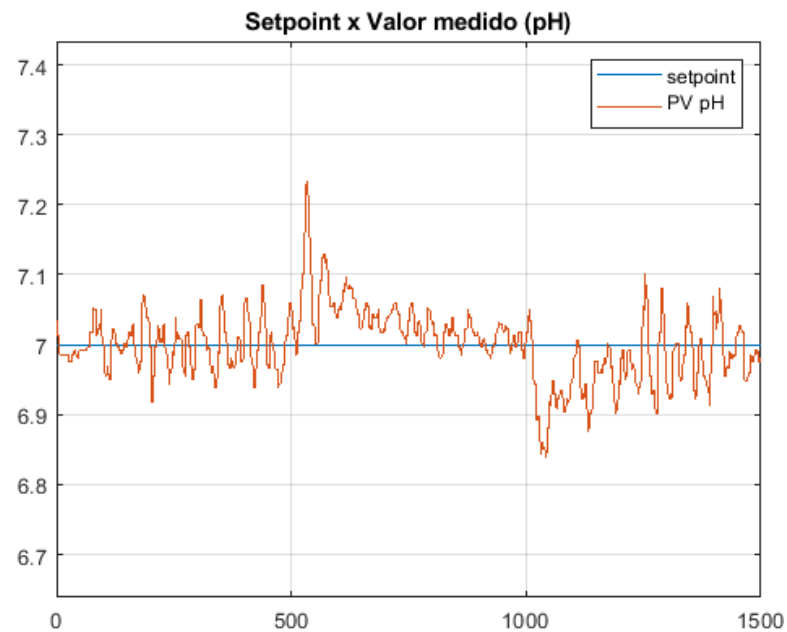
Fonte: Autores

Figura 42: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



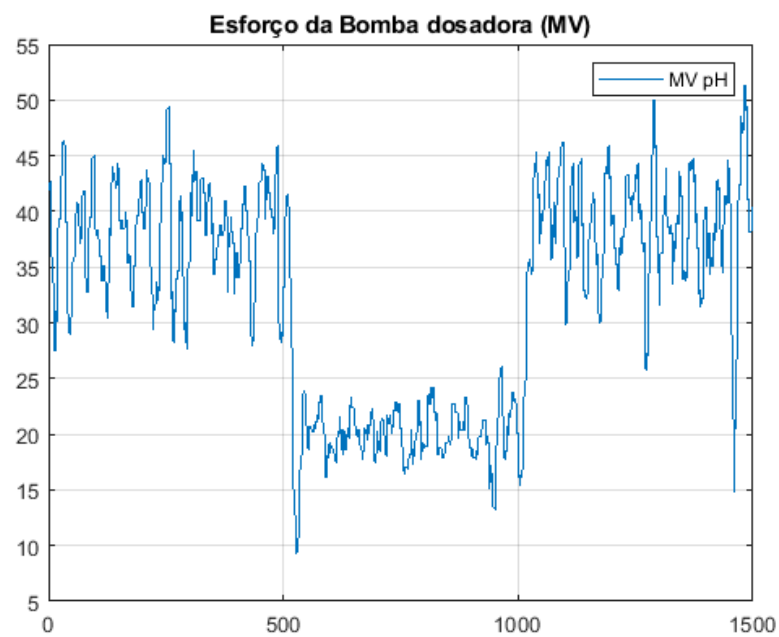
Fonte: Autores

Figura 43: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



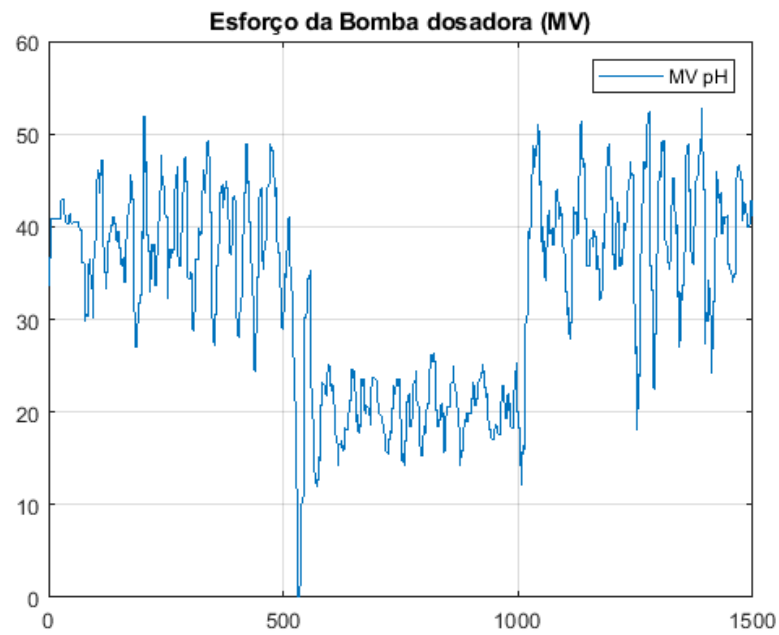
Fonte: Autores

Figura 44: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



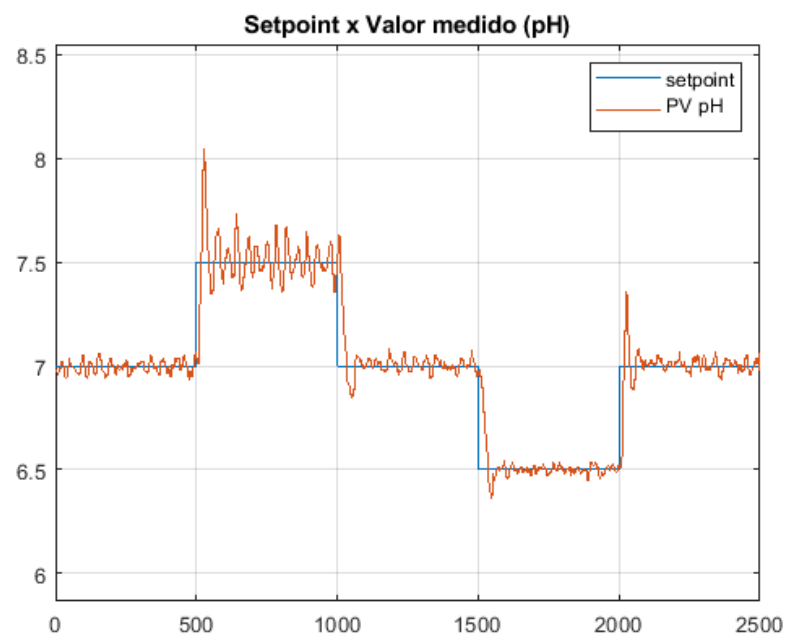
Fonte: Autores

Figura 45: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



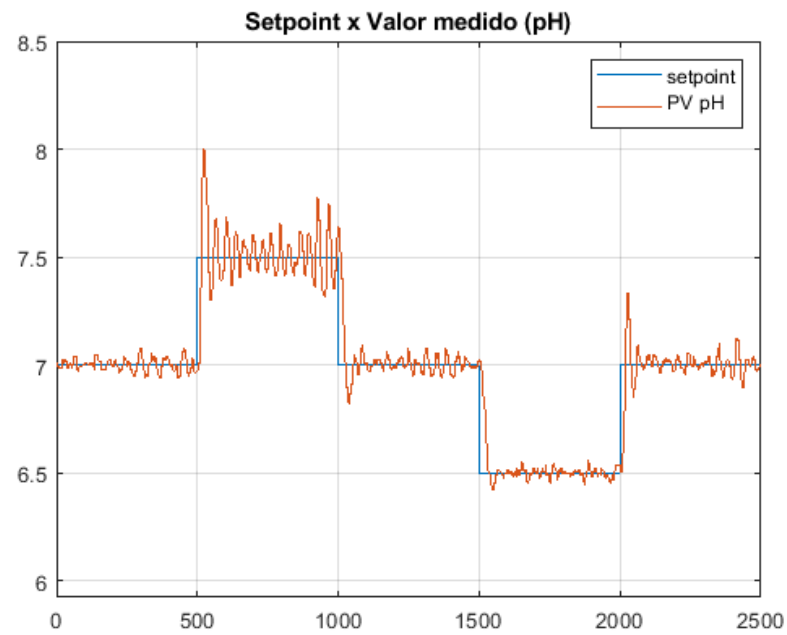
Fonte: Autores

Figura 46: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



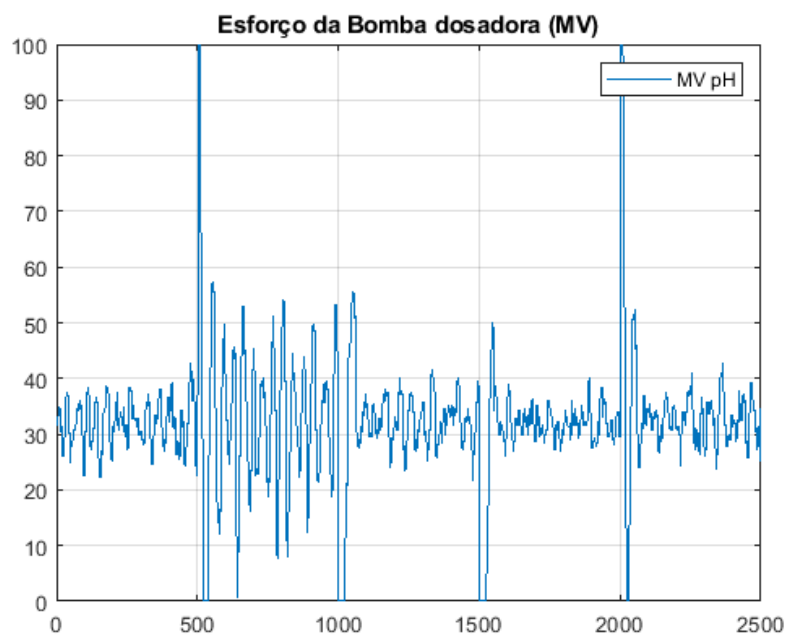
Fonte: Autores

Figura 47: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



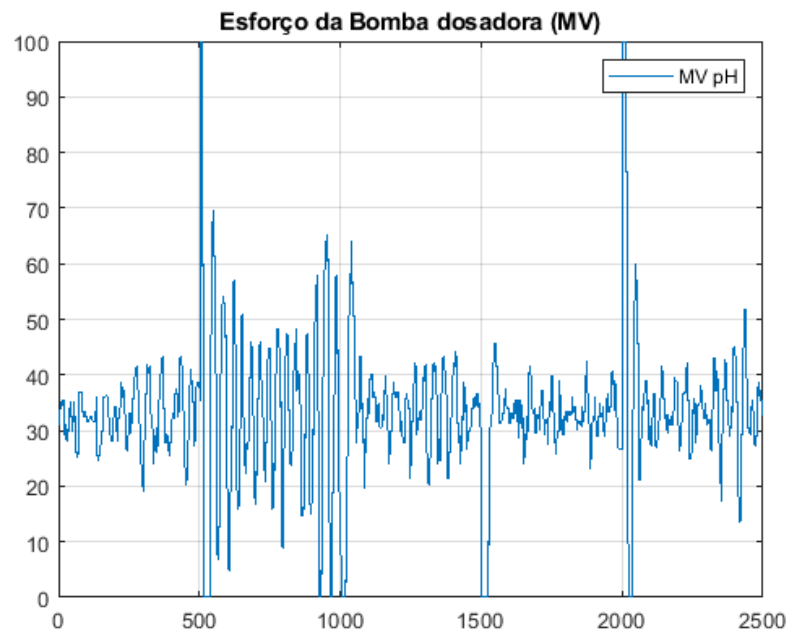
Fonte: Autores

Figura 48: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



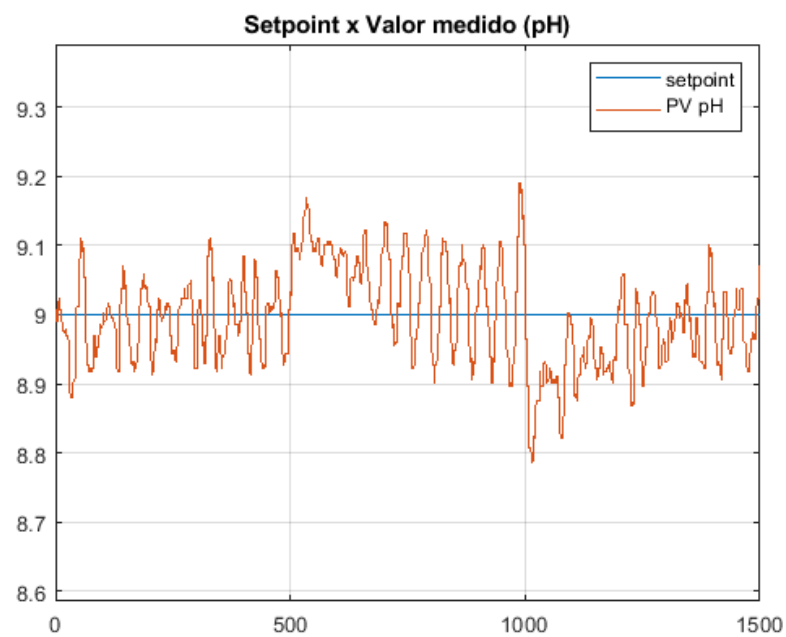
Fonte: Autores

Figura 49: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



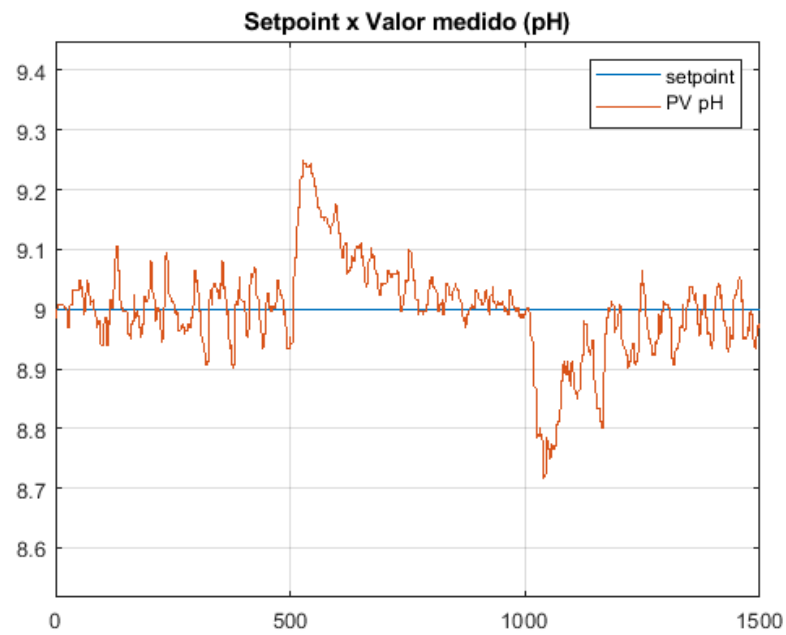
Fonte: Autores

Figura 50: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



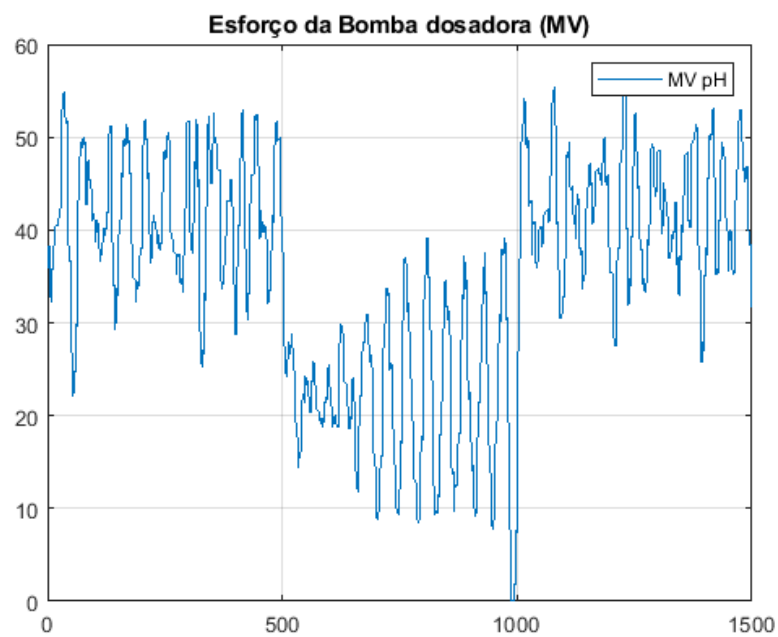
Fonte: Autores

Figura 51: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



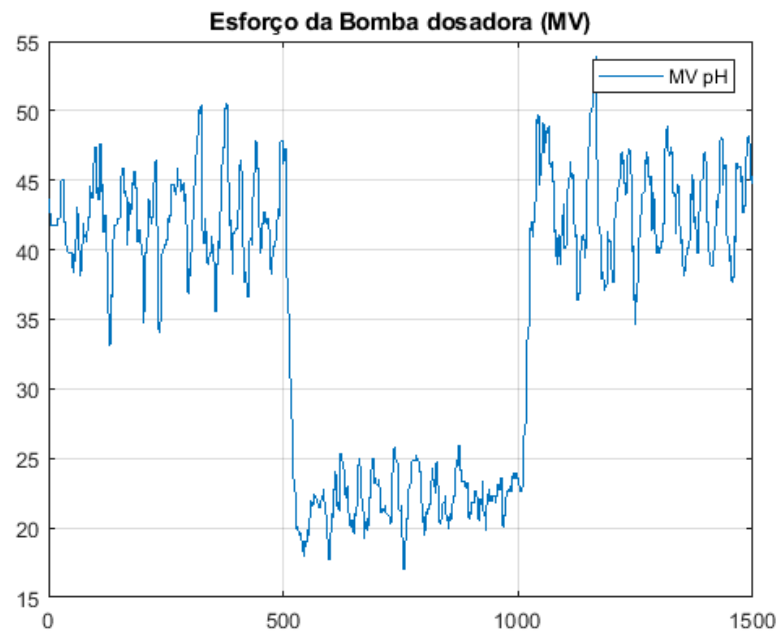
Fonte: Autores

Figura 52: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



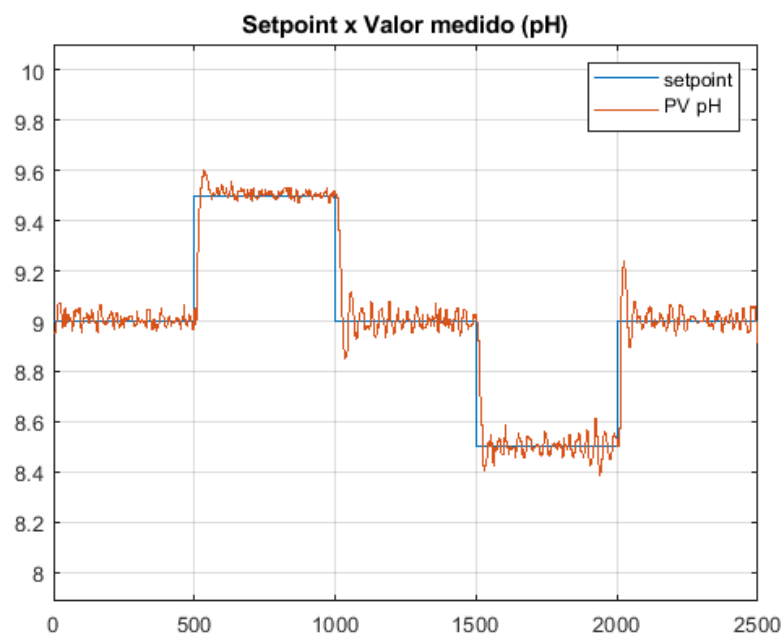
Fonte: Autores

Figura 53: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



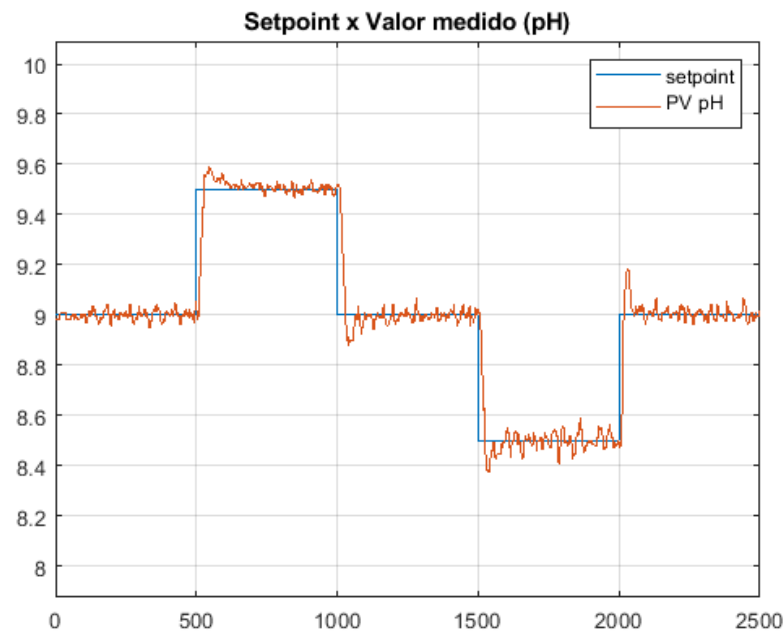
Fonte: Autores

Figura 54: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



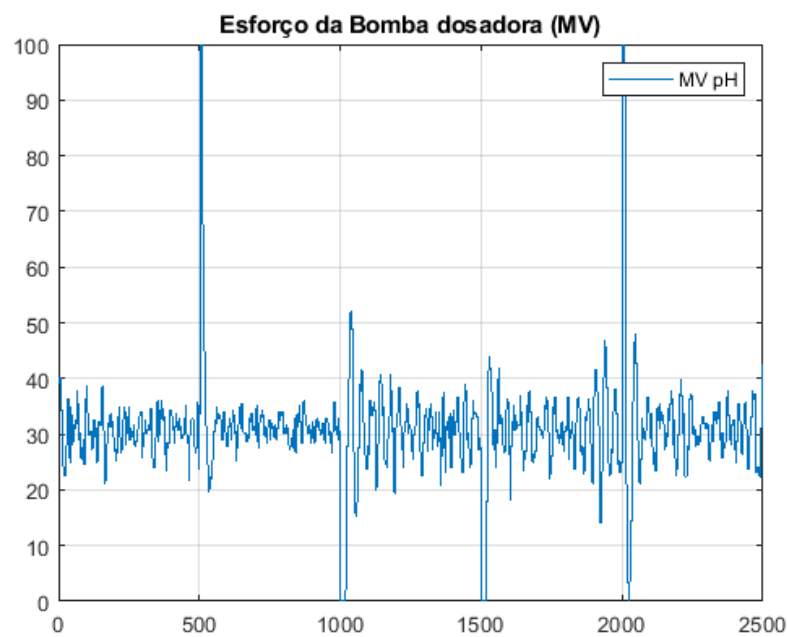
Fonte: Autores

Figura 55: Setpoint e PV (pH medido) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



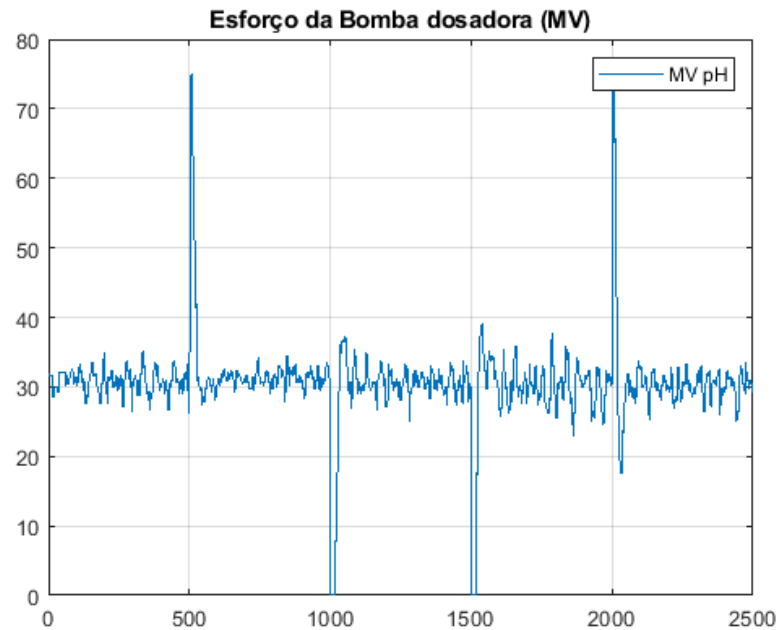
Fonte: Autores

Figura 56: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



Fonte: Autores

Figura 57: MV (acionamento da bomba dosadora) do ensaio no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



Fonte: Autores

Com os ensaios realizados, foi possível concluir que os valores de sintonia do controlador PI obtidos pelo Método do Baricentro são tão melhores quanto os atuais usados no laboratório para a faixa de pH 7. Já para a faixa de pH 5 e 9, percebe-se uma melhoria nos índices de desempenho dos índices IAE e ISE.

Abaixo são apresentados os valores de K_c e T_i do controlador PI para as sintonias do LCPI e do Método do Baricentro. Para caráter comparativo, apresentam-se também os valores de IAE e ISE obtidos em cada caso.

Tabela 8: Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 5

Controle	Sintonia	K_c	T_i	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	80.4797	290.5936
	Baricentro	12.3954	338.9585	32.0954	175.7959
Servo	LCPI	20	166	55.6107	285.7822
	Baricentro	12.3954	338.9585	50.8643	259.6645

Tabela 9: Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 7

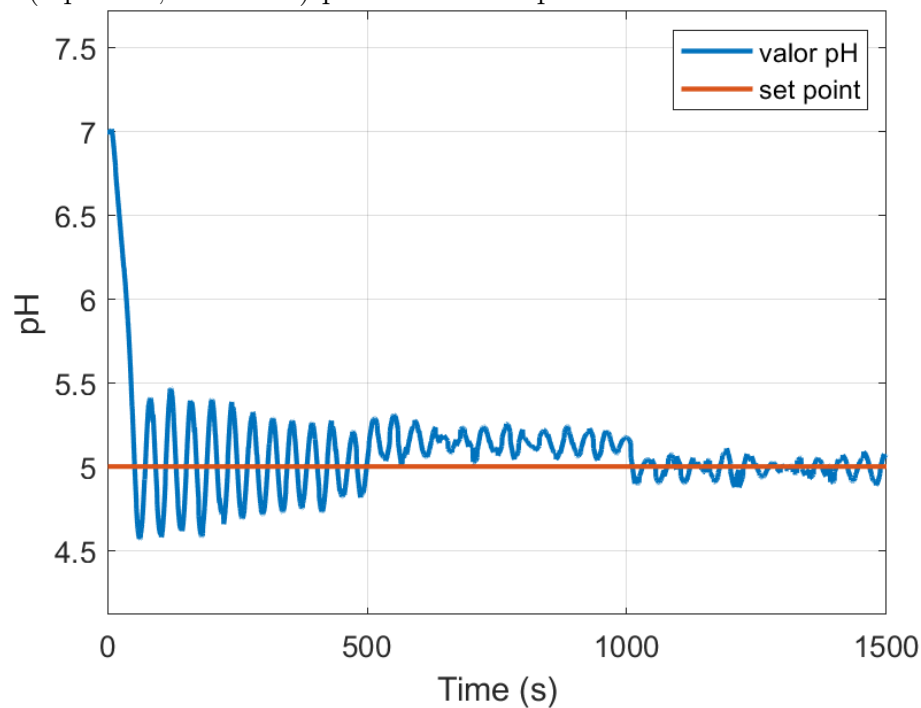
Controle	Sintonia	Kc	Ti	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	4.0593	59.3212
	Baricentro	23.2857	164.5946	3.7143	55.8692
Servo	LCPI	20	166	26.4226	127.0364
	Baricentro	23.2857	164.5946	26.3954	131.2807

Tabela 10: Índices de desempenho ISE e IAE do ensaio na planta física com pH 9

Controle	Sintonia	Kc	Ti	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	7.3175	85.9909
	Baricentro	11.5017	126.7284	9.7320	82.4908
Servo	LCPI	20	166	16.1805	92.5490
	Baricentro	11.5017	126.7284	17.0765	85.5967

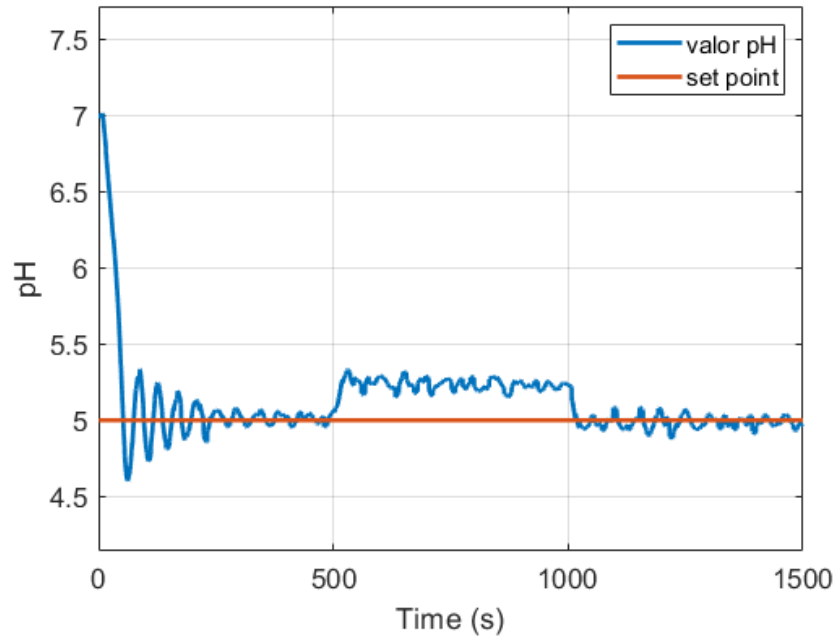
Também foram feitas simulações no Gêmeo Digital da planta para o modo regulatório nas mesmas faixas de pH, como pode ser observado nas Figuras 58 a 81.

Figura 58: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



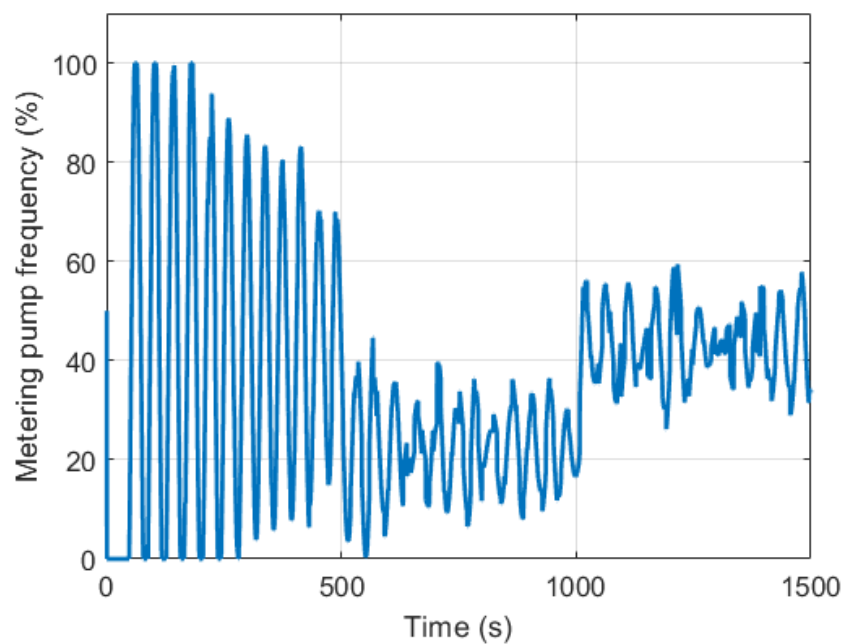
Fonte: Autores

Figura 59: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



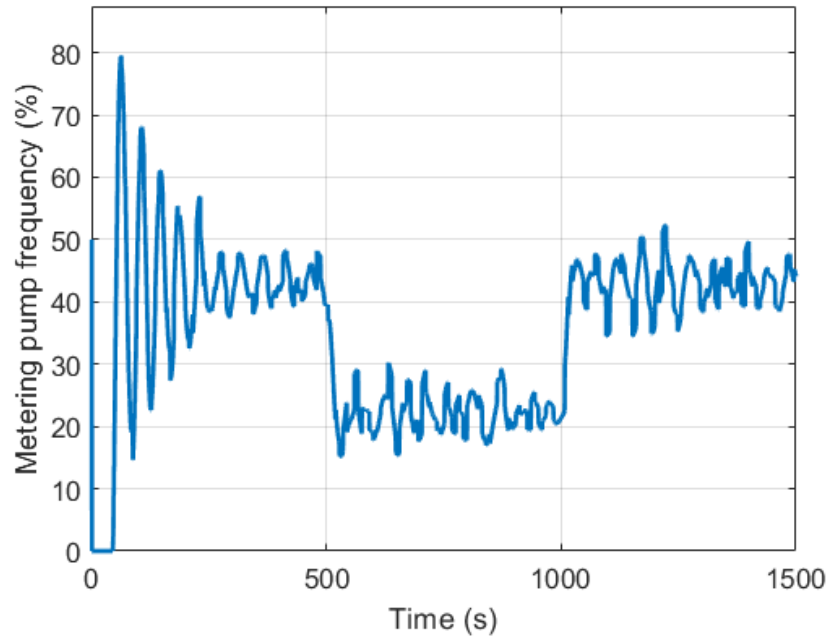
Fonte: Autores

Figura 60: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



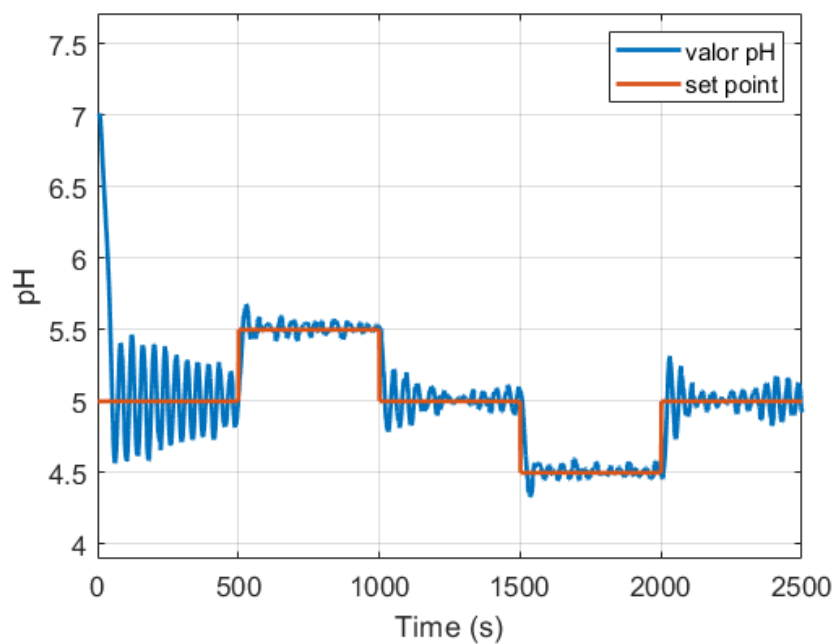
Fonte: Autores

Figura 61: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



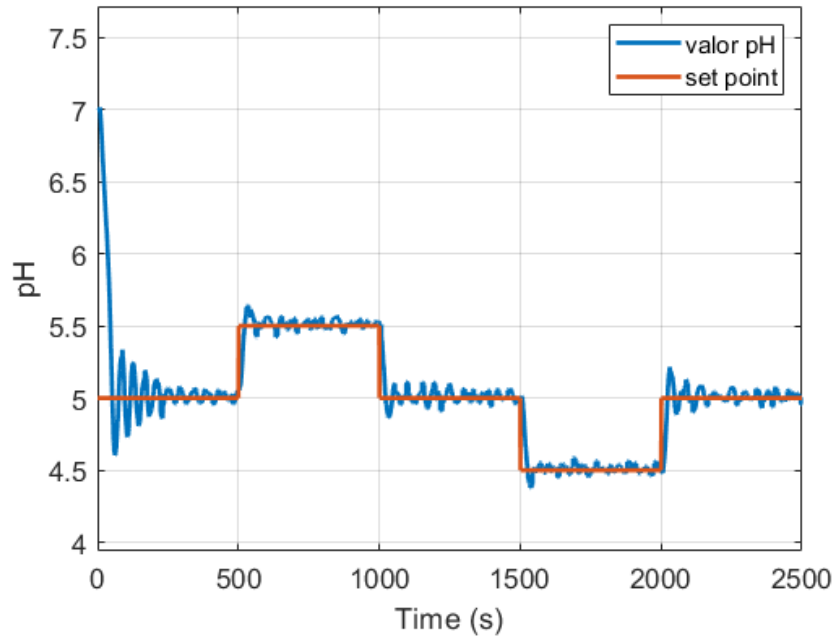
Fonte: Autores

Figura 62: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



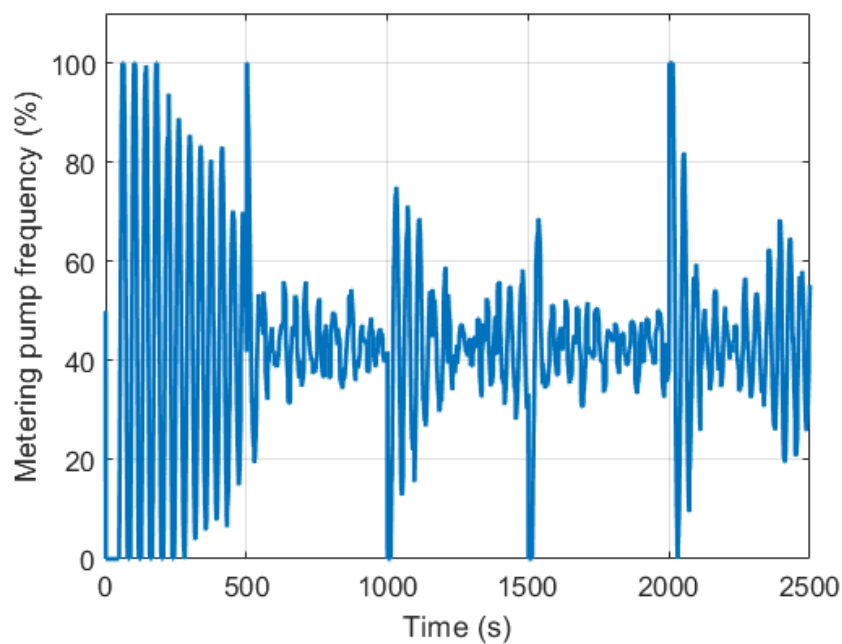
Fonte: Autores

Figura 63: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



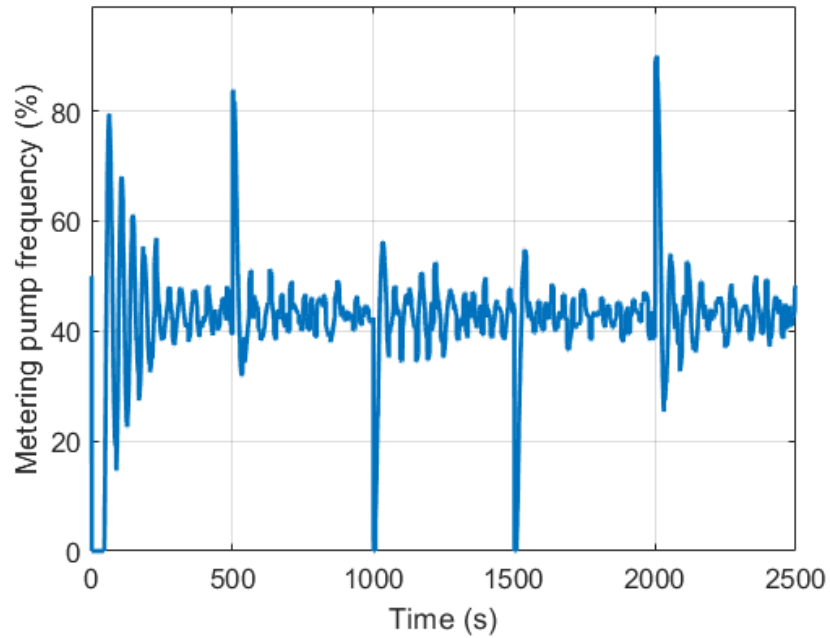
Fonte: Autores

Figura 64: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 5



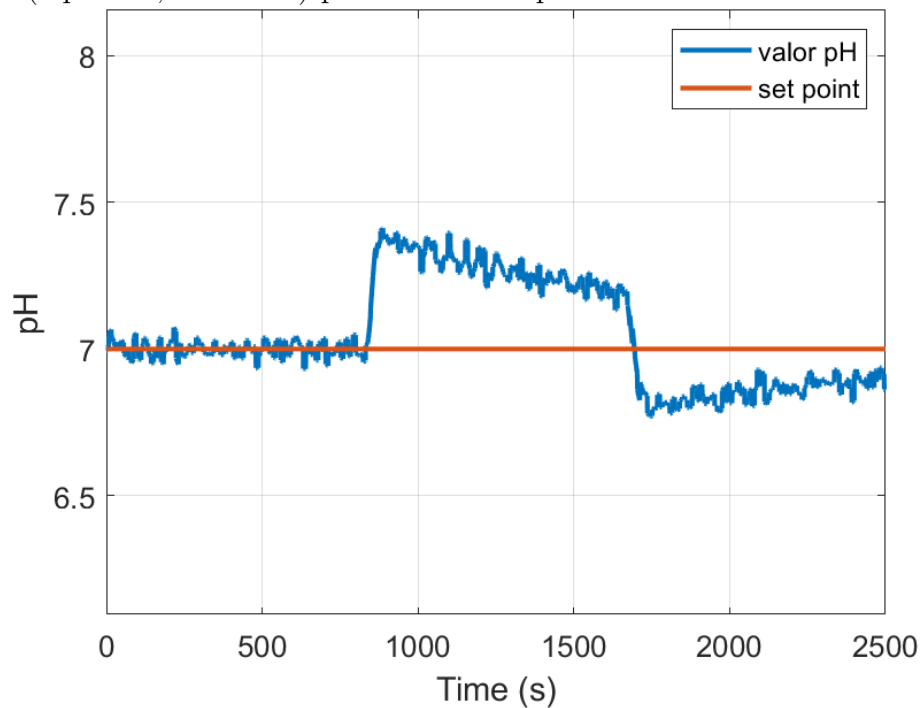
Fonte: Autores

Figura 65: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 12.3954$, $T_i = 338.9585$) para a faixa de pH 5



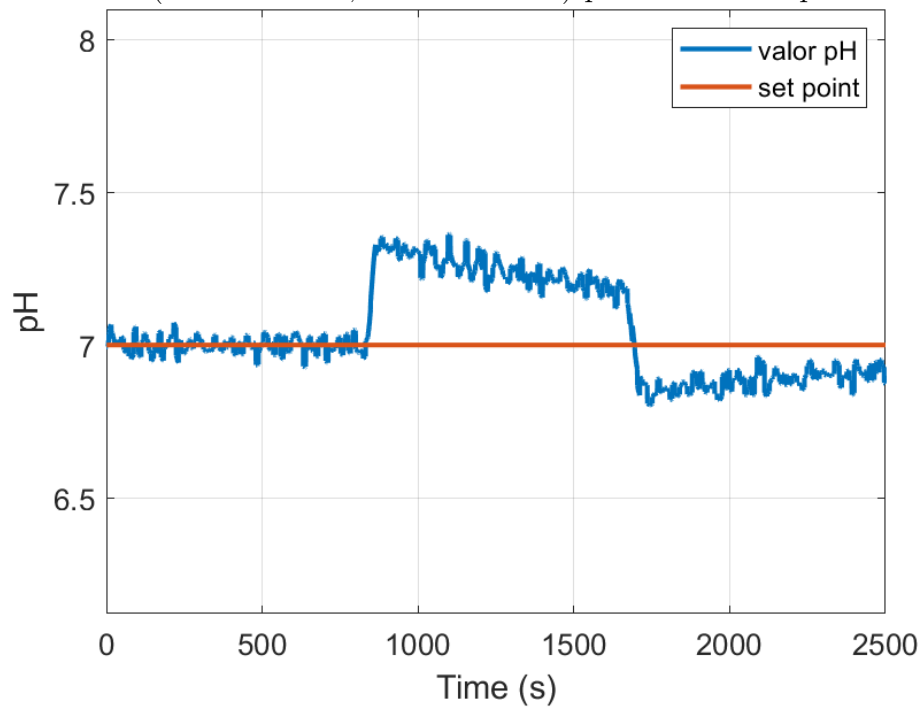
Fonte: Autores

Figura 66: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



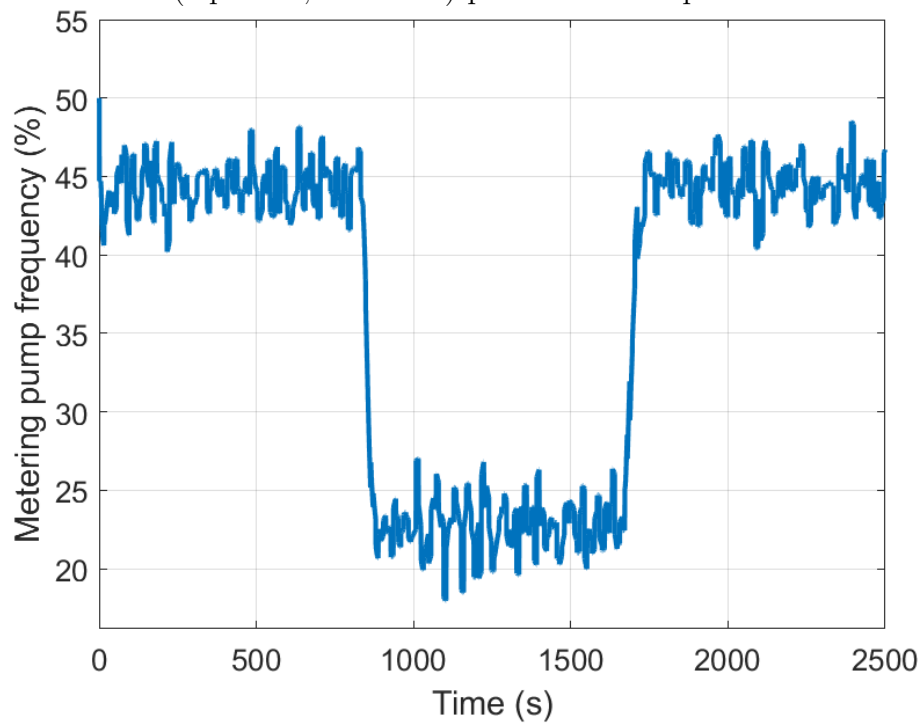
Fonte: Autores

Figura 67: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



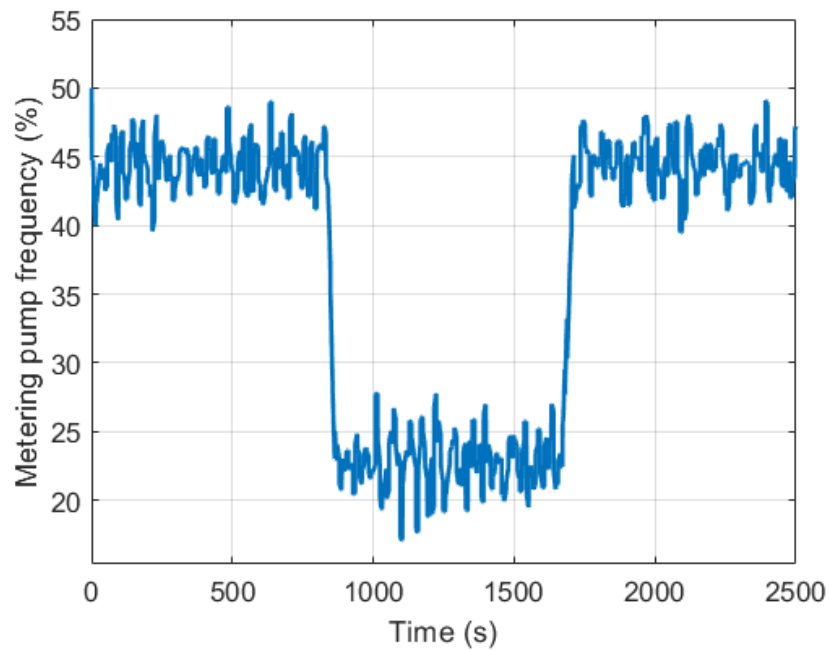
Fonte: Autores

Figura 68: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



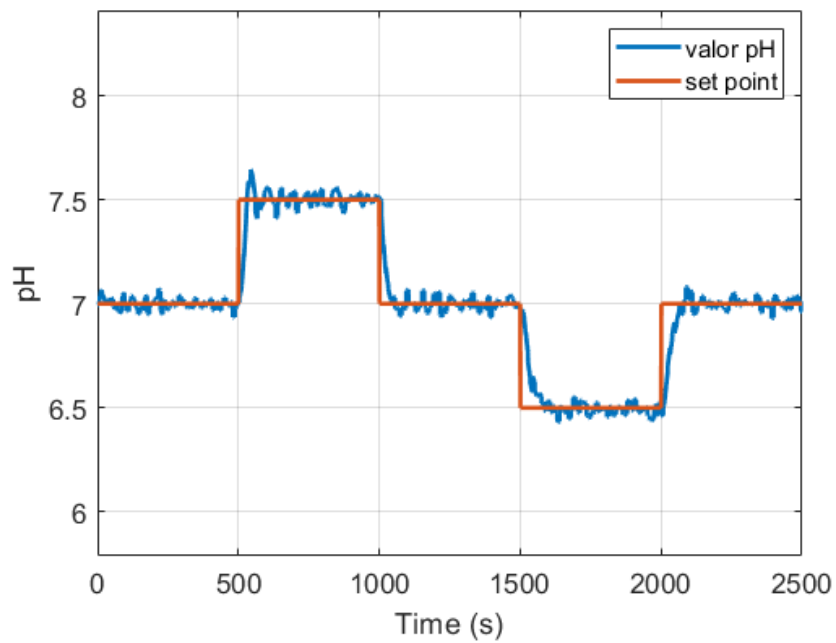
Fonte: Autores

Figura 69: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



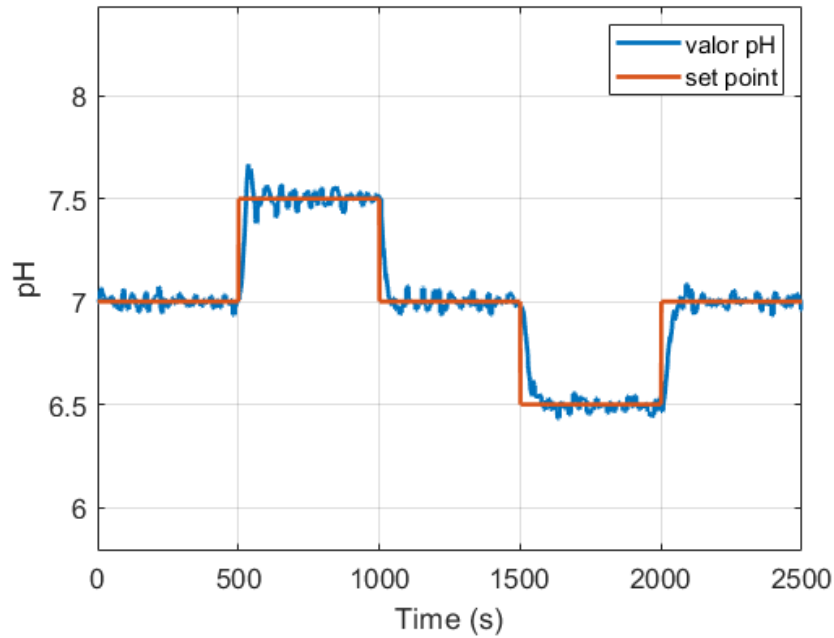
Fonte: Autores

Figura 70: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



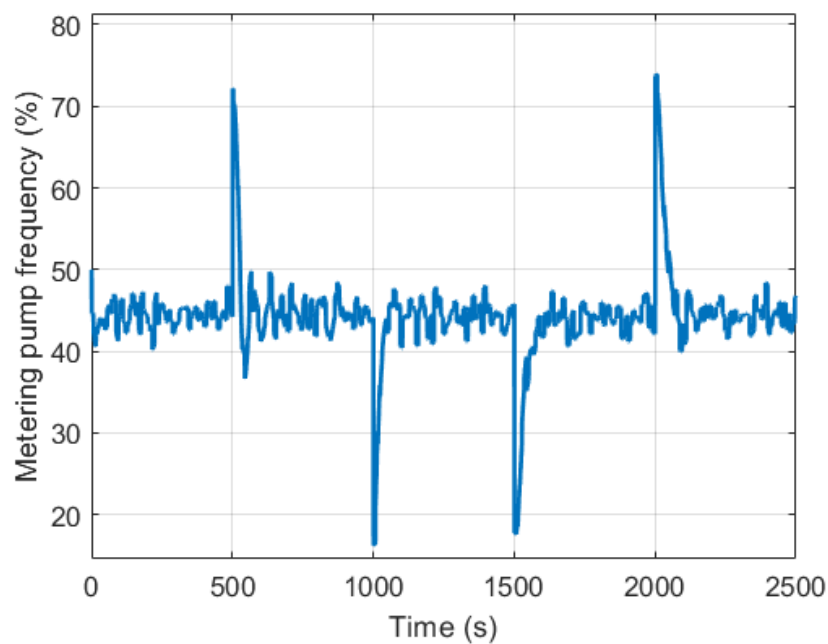
Fonte: Autores

Figura 71: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



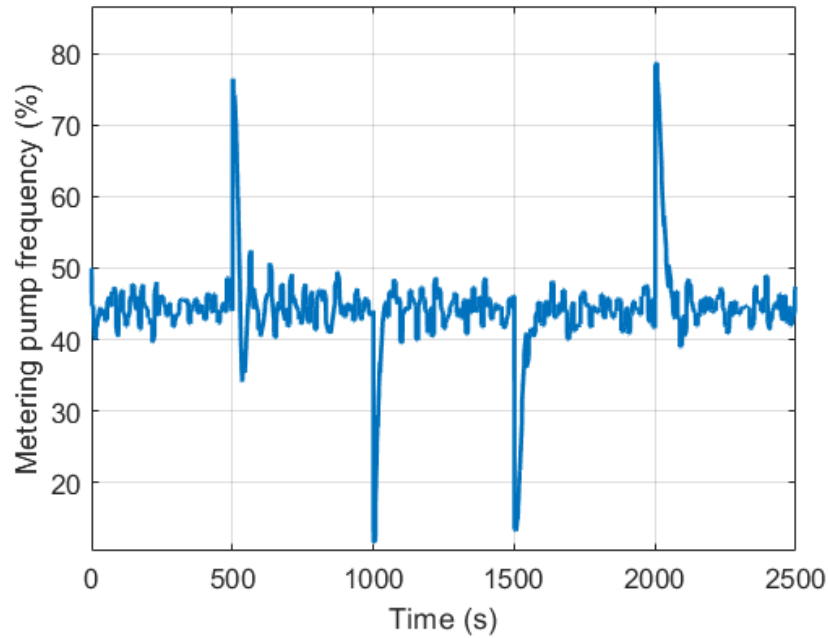
Fonte: Autores

Figura 72: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 7



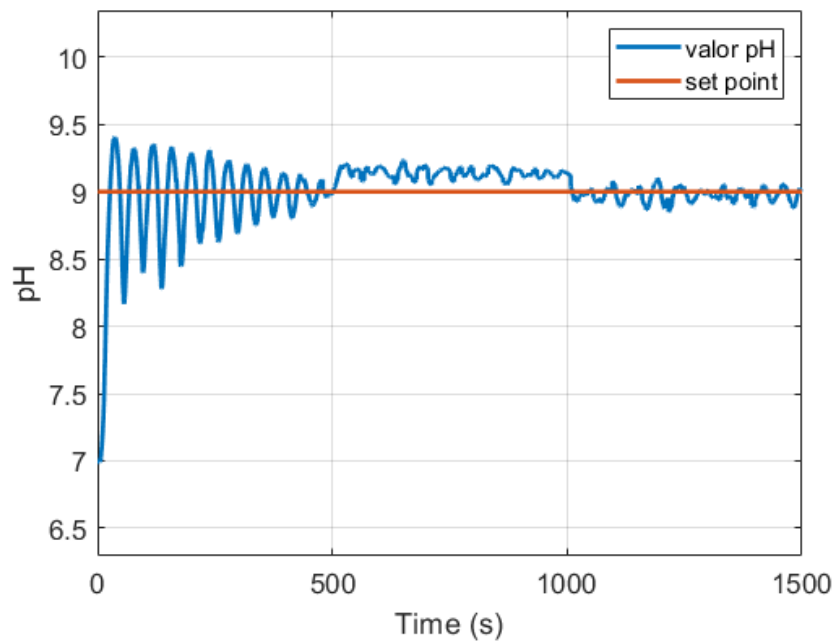
Fonte: Autores

Figura 73: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 23.2857$, $T_i = 164.5946$) para a faixa de pH 7



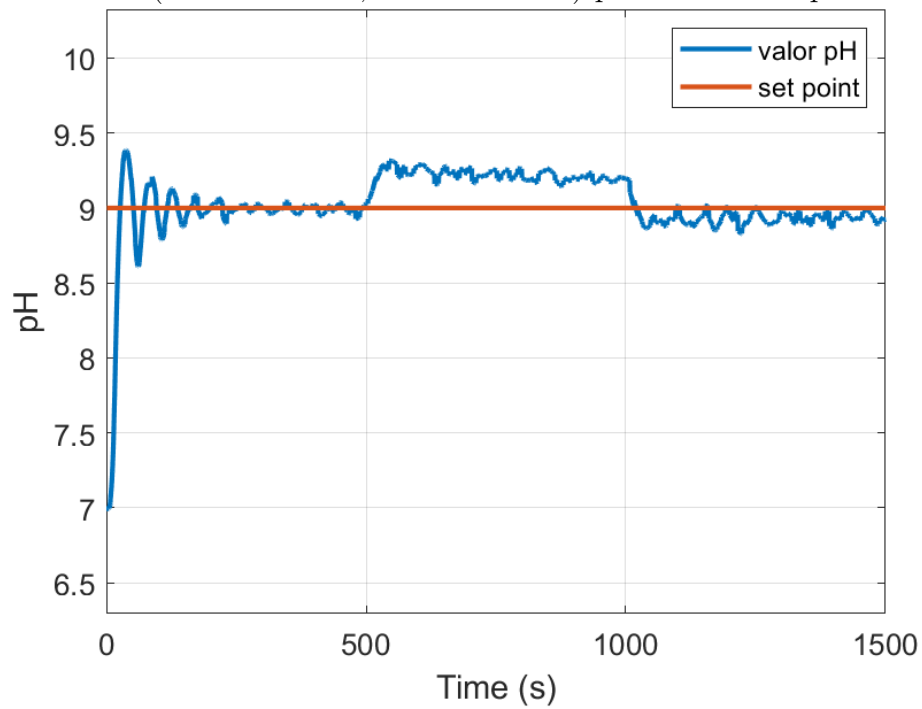
Fonte: Autores

Figura 74: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



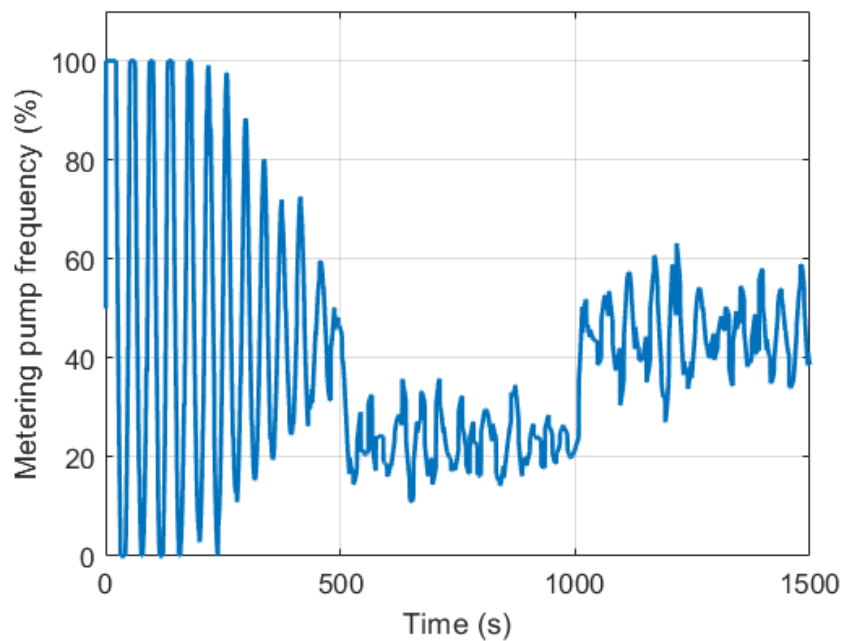
Fonte: Autores

Figura 75: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



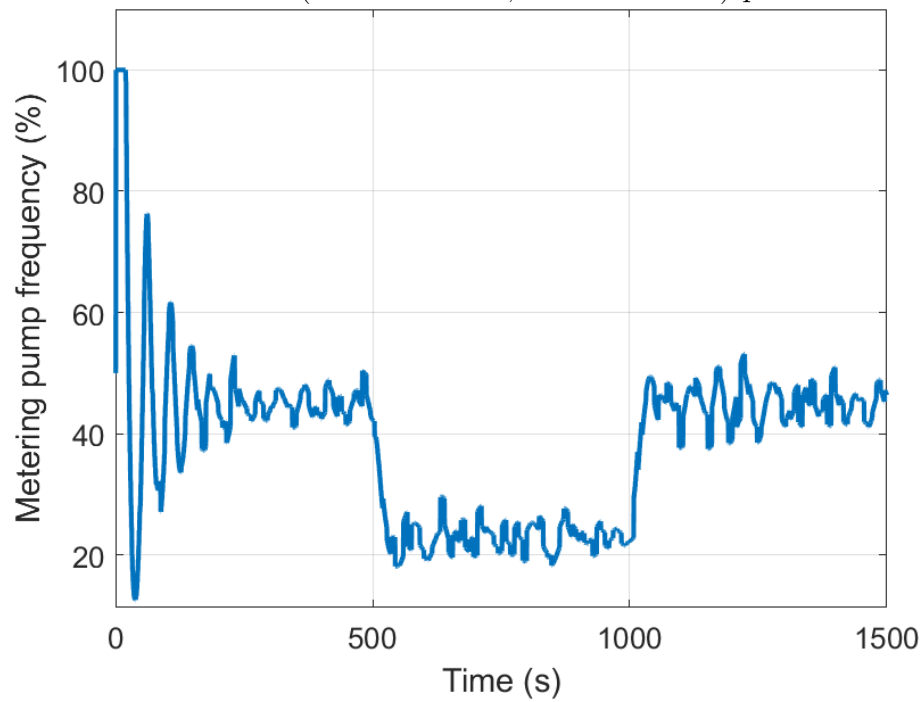
Fonte: Autores

Figura 76: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



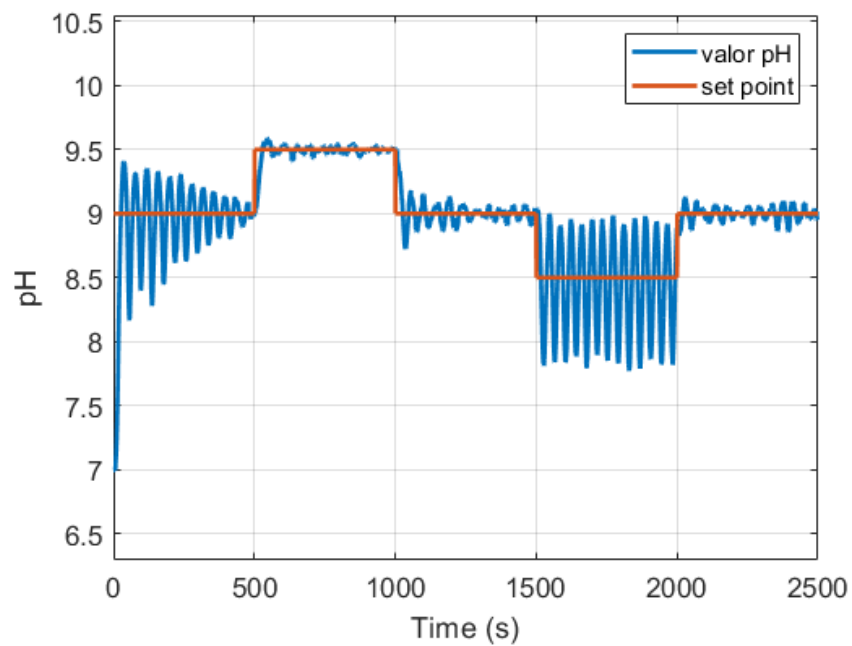
Fonte: Autores

Figura 77: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo regulatório com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



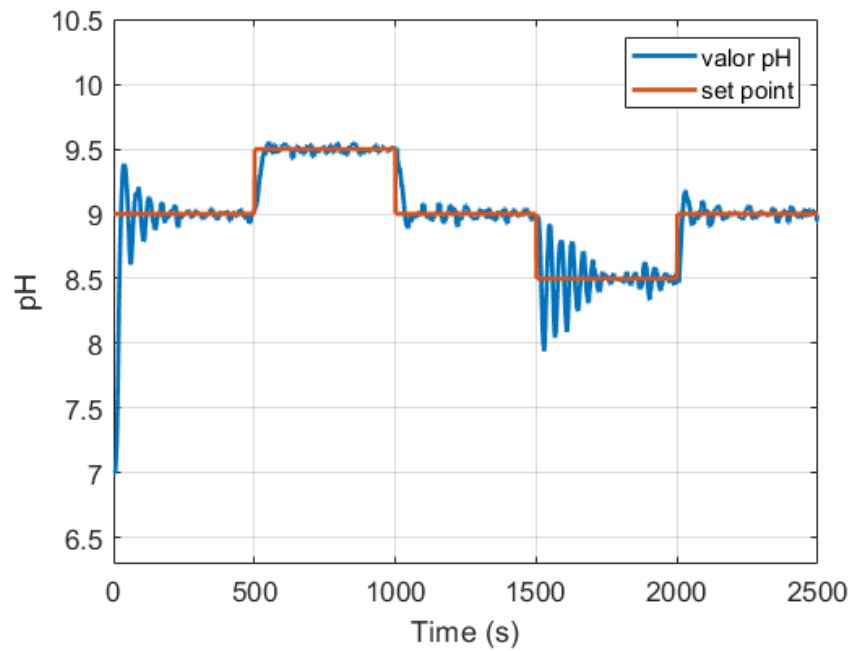
Fonte: Autores

Figura 78: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



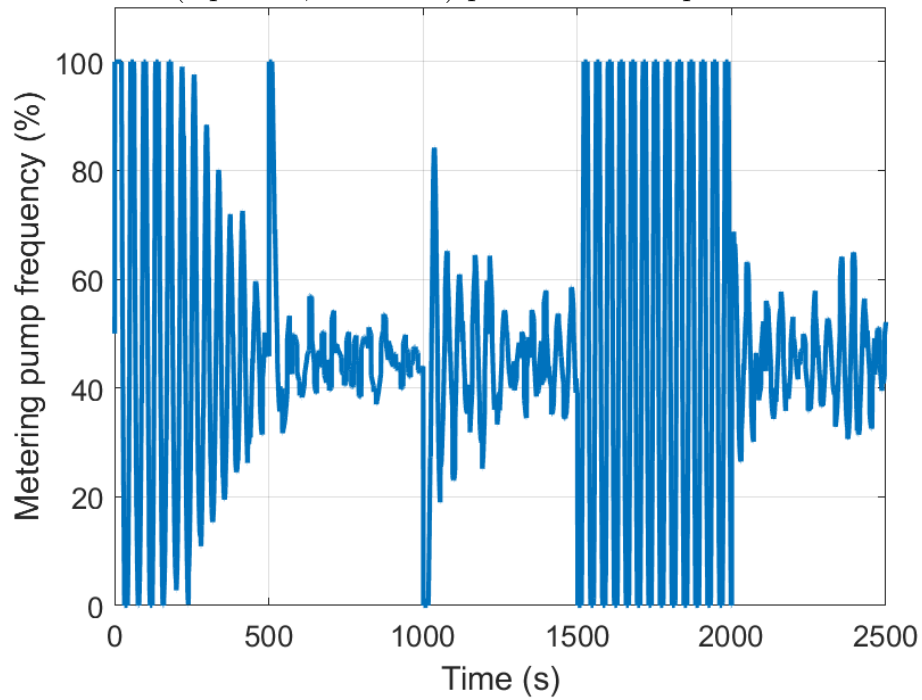
Fonte: Autores

Figura 79: Setpoint e PV (pH medido) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



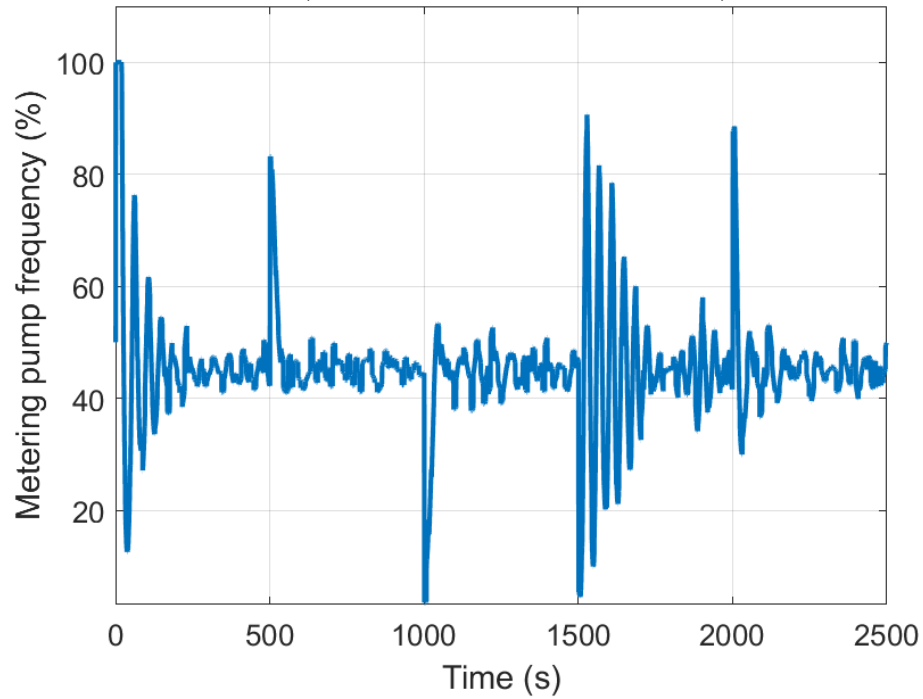
Fonte: Autores

Figura 80: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do laboratório ($K_p = 20$, $T_i = 166$) para a faixa de pH 9



Fonte: Autores

Figura 81: MV (acionamento da bomba dosadora) da simulação no modo servo com valores do baricentro calculado ($K_c = 11.5017$, $T_i = 126.7284$) para a faixa de pH 9



Fonte: Autores

Tabela 11: Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 5

Controle	Sintonia	K_c	T_i	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	191.3786	261.0616
	Baricentro	12.3954	338.9585	187.4217	243.4952
Servo	LCPI	20	166	196.5769	286.7559
	Baricentro	12.3954	338.9585	173.6120	201.6526

Tabela 12: Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 7

Controle	Sintonia	K_c	T_i	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	133.1882	370.0519
	Baricentro	23.2857	164.5946	113.9283	324.6017
Servo	LCPI	20	166	55.0452	84.7321
	Baricentro	23.2857	164.5946	54.6767	82.7477

Tabela 13: Índices de desempenho ISE e IAE da simulação na planta digital com pH 9

Controle	Sintonia	Kc	Ti	ISE	IAE
Regulatório	LCPI	20	166	144.3340	220.5933
	Baricentro	11.5017	126.7284	137.2440	214.1041
Servo	LCPI	20	166	223.4505	385.5030
	Baricentro	11.5017	126.7284	135.1391	192.1105

Com essas simulações, pôde-se perceber que o gêmeo digital se comporta como o esperado, com menores oscilações e menores valores de índices ao aplicar o Método do Baricentro para a sintonia do controlador. Isso é próximo do comportamento da planta física, entretanto ela apresenta oscilações acentuadas. Isso pode fazer com que a sintonia obtida pelo Método do Baricentro seja ótima para o gêmeo digital, mas não necessariamente para a planta.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais do Método de Otimização do Baricentro para sintonizar os parâmetros de um controlador do tipo Proporcional Integral no gêmeo digital da Planta Piloto de Tratamento de pH. A seguir, os parâmetros foram aplicados na planta física para comparação com os valores atualmente utilizados no laboratório.

A metodologia utilizada para otimização através do Método do Baricentro é eficiente e suficientemente boa para diversos propósitos, de forma que o método busca melhores soluções para o que lhe é apresentado. Sendo assim, exige um modelo digital fidedigno à planta física com a qual está relacionada, para que se possa encontrar uma solução ótima para ela.

Dessa forma, as sintonias encontradas para o controlador PI tiveram ótimo desempenho para as faixas de pH 5 e 9, mas um desempenho tão bom quanto o atual para a faixa de pH 7. Tendo isso em vista, a sintonia do controlador PI presente no Laboratório apresenta um ótimo desempenho para a faixa mais crítica, que é a faixa de pH 7.

Como sugestão de trabalhos futuros, o desenvolvimento de um novo modelo digital da planta piloto de Tratamento de pH ou uma melhoria no gêmeo digital atualmente utilizado, de forma que seja mais fiel ao processo real, poderia proporcionar uma busca mais exata da sintonia do baricentro. Seria interessante também realizar o mesmo experimento com controladores diferentes, que não seja o PI, como foi utilizado neste projeto, para verificar as diferenças no funcionamento do método de otimização para os diferentes controladores.

7 REFERÊNCIAS

GODOY, Rodrigo J. C. de. Adequação de Planta Piloto de Neutralização de pH a Plataforma de Pesquisa e Desenvolvimento. 2011. 812f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GONÇALVES, E.; CECCATO, R.; RANGEL, R. Modelagem e Controle Avançado da Planta Piloto de Tratamento de pH do LCPI. 2021.

MARQUES, Felipe G. Modelagem Fenomenológica e Controle de uma Planta Piloto de Neutralização de pH. 2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-31122015-101900/publico/Dissertacao_Fellipe_Garcia_MarquesVREV.pdf>. Acesso em: 12 de mai. de 2022.

MESA, Marien. Aplicação do Método do Baricentro na Otimização do Controle da Malha de Nível da Planta de Neutralização de pH. 2020. 6f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

PAIT, Felipe M. The Barycenter Method for Direct Optimization. Cornell University, 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1801.10533>>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

PAIT, Felipe M. The Barycenter Method for Direct Optimization: an Overview. Cornell University, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2102.10467>>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

SERRANO, Manuel A. P. Estratégias de controle avançado para uma planta de tratamento de pH. 2020. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-04092020-093128/publico/ManuelAlejandroPerezSerranoCorr20.pdf>>. Acesso em: 2 de jul. de 2022.