



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

RODRIGO SISLIAN

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA
GERENCIAMENTO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA EM UM SISTEMA
CLEAN IN PLACE

CAMPINAS
2020

RODRIGO SISLIAN

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA
GERENCIAMENTO DO CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA EM UM SISTEMA
CLEAN IN PLACE

*Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Química da Universidade
Estadual de Campinas como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do
título Doutor em Engenharia Química.*

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Marco Antônio Coghi

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELO ALUNO RODRIGO SISLIAN, E
ORIENTADA PELO PROF. DR. FLÁVIO
VASCONCELOS DA SILVA

CAMPINAS
2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Si82d Sislian, Rodrigo, 1983-
Desenvolvimento de indicadores de desempenho para gerenciamento do consumo de água e energia em um sistema clean in place / Rodrigo Sislian. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Coorientador: Marco Antônio Coghi.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Indicadores de desempenho. 2. Identificação de sistemas. 3. Água - Consumo. 4. Energia Elétrica - Consumo. I. Silva, Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Coghi, Marco Antônio, 1962-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development of performance indicators for water and energy consumption management in a clean in place system

Palavras-chave em inglês:

Performance indicators

System identification

Water - Consumption

Electricity - Consumption

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]

Wânderson de Oliveira Assis

Filipe Alves Coelho

Angel Pontin Garcia

Ademar Gonçalves da Costa Júnior

Data de defesa: 11-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3728-8442>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5757648320397958>

Folha de Aprovação da Defesa da Tese de Doutorado defendida por Rodrigo Sislian aprovada em 11 de fevereiro de 2020 pela banca examinadora constituída pelos seguintes doutores:

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Presidente e Orientador
FEQ / UNICAMP

Dr. Wânderson de Oliveira Assis
Instituto Mauá de Tecnologia – Escola de Engenharia

Dr. Filipe Alves Coelho
Universidade São Francisco – Campus Campinas

Prof. Dr. Angel Pontin Garcia
FEAGRI / UNICAMP

Dr. Ademar Gonçalves da Costa Júnior
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

ATA da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos da minha vida.

À minha querida e amada família, que sempre me deu suporte e incentivou os estudos, em especial meus pais, minhas irmãs, meus avós, meus sogros e minha esposa, amor da minha vida e todo o tempo ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Flávio Vasconcelos da Silva por, desde o momento em que ingressei na FEQ-UNICAMP, ter me recebido e dado todas as oportunidades e direcionamentos que abriram diversas frentes em minha carreira e vida pessoal, além do auxílio para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Marco Antônio Coghi, por todo o suporte e auxílio dispensados para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Rubens Gedraite e Léo Kunigk, por possibilitarem a execução dos primeiros ensaios experimentais, base para o desenvolvimento deste trabalho, e os ensaios posteriores que foram suporte para o projeto de pesquisa inicialmente proposto, além de sempre estarem dispostos a auxiliar.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, pela bolsa-auxílio disponibilizada com o objetivo de compensação parcial de gastos, conforme Comunicado DDPG-CPPD-CISTA nº26/2018.

E a todos os amigos que sempre torceram por mim.

RESUMO

O sistema CIP (*Clean in Place*) é um processo de limpeza caracterizado por efetuar a higienização em máquinas, sem a necessidade da desmontagem dos componentes. O melhor aproveitamento dos insumos utilizados no processo é um fator importante a ser considerado e a minimização destes pode trazer vantagens financeiras e ambientais. O fato de não haver muitos modelos matemáticos que representem adequadamente o processo de limpeza e a escassez de publicações relacionadas ao tema, torna de interesse o desenvolvimento de ferramentas para o estudo de redução do consumo de insumos, em especial, de água e energia elétrica. Neste trabalho, foram utilizados os resultados experimentais coletados em uma planta do processo de limpeza *Clean in Place* (CIP), com características de uma instalação semi-industrial. Com base nestes dados, utilizou-se a estrutura ANFIS (*Sistema de Inferência Fuzzy Neuro-Adaptativo*) do *software* Simulink® para a modelagem da resposta do pH para variações na vazão de água de enxágue, e foram definidos indicadores de desempenho relacionados à vazão de água de enxágue, ao volume consumido de água e energia elétrica, ao custo da água e da energia elétrica, à taxa de decaimento do pH e um indicador chave de desempenho do custo do enxágue (KPI_{CE}). Foi implementado o **SIS**tema de **GE**renciamento de Custo do Consumo do Processo **CIP** – SISGECIP – e desenvolvida uma interface gráfica de usuário, os quais possibilitaram a análise do comportamento do processo para o estudo proposto. A análise dos indicadores para as simulações com vazões de enxágue fixa entre a condição de vazão de $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, em que a limpeza é mais rápida (918 segundos), e a vazão de água de enxágue de $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (1322 segundos), considerada a que representa a limpeza com consumo mínimo de água, mostrou a possibilidade de economia no custo da água de R\$ 8,04 a cada 100 enxágues do CIP e redução de 4,20% no consumo de água. Além disto, considerou-se outras duas condições com o custo menor de água e maior de energia elétrica, o que mostrou a possibilidade de aumento da vazão de enxágue sem o aumento do custo da limpeza com possível retomada mais rápida da produção, sendo necessárias outras informações que envolvem a produção como um todo para a tomada de decisão. Os resultados obtidos nas condições consideradas, indicam a possibilidade de economia financeira maior em uma implementação no ambiente industrial, com base na redução de consumo de água e energia elétrica ou tempo para retomar a produção, fatores estes de grande

relevância. Com relação à sustentabilidade, este trabalho apresenta a proposta de uma perspectiva holística do processo e deixa os resultados menos dependentes da avaliação de especialistas e menos influenciados por suposições. Se estendido para as demais etapas do processo de limpeza CIP, possibilita agregar também ganhos, tanto no sentido de redução do impacto ambiental quanto no aspecto financeiro, diretamente relacionado às tarifas cobradas para o consumo de água e energia elétrica.

Palavras-chave: Indicadores de Desempenho; Identificação de Sistemas; Consumo de Água; Consumo de Energia Elétrica; *Clean in Place*.

ABSTRACT

The CIP (Clean in Place) system is a cleaning process characterized by cleaning the machines used without the need to disassemble the components. The better use of inputs used in the process is an important factor to be considered and its minimization can bring economic and environmental advantages. The fact that there are not many mathematical models that represent adequately the cleaning process and there is a shortage of publications related to the topic, makes it interesting to development tools for the study of reducing the inputs consumption, especially water and electricity. In this work it has been used the experimental results collected in a Clean in Place (CIP) plant with characteristics of a semi-industrial facility. Based on these data, the ANFIS structure (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) of the Simulink® software was used to model the pH response for variations in the rinse water flow rate, and were defined performance indicators related to the rinse water flow rate, the volume of water and electricity consumed, the cost of water and electricity, the pH decay rate and a key performance indicator of the rinse water cost (KPI_{CE}). The CIP Process Consumption Cost Management System – designated SISGECIP - was implemented and a graphical user interface was developed both allowing the analysis of the process behavior for the proposed study. The analysis of the indicators for simulations with fixed rinse flow rates between the 15 L.min⁻¹ flow condition, in which cleaning is faster (918 seconds) and the 10 L.min⁻¹ rinse water flow rate (1322 seconds), considered the cleaning with minimum water consumption, showed the possibility of savings in water costs of R\$ 8,04 for every 100 rinses in the CIP and a 4,20% reduction in water consumption. In addition, two other conditions were considered, with a lowest cost of water and highest cost of electricity, that showed the possibility of increasing the rinse flow rate without increasing the cost of cleaning with a possible faster resumption of production, requiring other information that involves the production as a whole for decision making. The results obtained under the conditions considered, indicate the possibility of greater financial savings in an implementation in the industrial environment, based on the reduction of water and electricity consumption or time to resume production, factors of great relevance. Regarding sustainability, this study provides a holistic perspective of the process and leaves the results less dependent on expert judgment and less influenced by assumptions. If extended to the other steps of the CIP cleaning process, it can also add gains, both in terms of reducing

environmental impact and in the financial aspect, directly related to the fees charged for the consumption of water and electricity.

Keywords: Performance Indicators; System Identification; Water Consumption; Electricity Consumption; Clean in Place.

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Equipamentos e instrumentação para o processo de limpeza CIP.	
Fonte: SISLIAN, 2012.	43
Figura 3.2 – Diagrama representativo do processo e da instrumentação.....	45
Figura 3.4 – Comportamento do pH em função de variações da vazão. Fonte:	
SISLIAN, 2012.	51
Figura 3.5 – Funções de pertinência da Entrada – $F[k]$	53
Figura 3.6 – Funções de pertinência da Entrada – $pH[k-1]$.....	53
Figura 4.1 – Modelo-Simulink para comparação entre os dados experimentais e	
o Modelo ANFIS.....	66
Figura 4.2 – Resposta temporal do pH para degrau de $7,5 \text{ L.min}^{-1}$ na vazão -	
Comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS.....	66
Figura 4.3 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo	
ANFIS desenvolvido para a vazão de $7,5 \text{ L.min}^{-1}$	67
Figura 4.4 – Simulação da resposta temporal do modelo ANFIS validado para	
variações aleatórias da vazão de água de enxágue.....	69
Figura 4.5 – Modelo-Simulink implementado do controle de vazão da água de	
enxágue do trocador de calor (com perturbação aleatória na	
medição da vazão)	70
Figura 4.6 – Resposta temporal do controlador de vazão da água de enxágue do	
trocador de calor (com perturbação aleatória).....	71
Figura 4.7 – Resposta temporal do erro do volume ($V_{LSP} - V_{WSP}$).....	73

Figura 4.8 – Modelo-Simulink para simulação da influência do volume de água consumida	74
Figura 4.9 – Resposta temporal da influência de água consumida (I_{VAC}).....	74
Figura 4.10 – Modelo-Simulink para simulação da influência do decaimento do pH	75
Figura 4.11 – Resposta temporal da influência do decaimento do pH (I_{DPH}).....	76
Figura 4.12 – Gráfico do comportamento temporal de resposta do pH para o set-point fixo (pH Target) e para o set-point variável (pH Medido)	77
Figura 4.13 – Resposta temporal da influência do decaimento do pH (I_{DPH}).....	78
Figura 4.14 – Resposta temporal da influência do volume de água consumida e do decaimento do pH (I_{VAC} e I_{DPH}).....	79
Figura 4.15 – Modelo-Simulink que simula o set-point variável da vazão de água de enxágue	80
Figura 4.16 – Resposta temporal do WSP para a vazão em 10 L.min^{-1}	80
Figura 4.17 – Mapa Conceitual – PIs e KPI.....	82
Figura 4.18 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{VME}	82
Figura 4.19 – Modelo-Simulink para o cálculo do valor do PI_{VAC}	83
Figura 4.20 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{EC}	84
Figura 4.21 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{TDPH}	85
Figura 4.22 – Volume de água consumida x Vazão de água de enxágue.....	87
Figura 4.23 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $9,5 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável	89
Figura 4.24 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($LSP= 9,5 \text{ L.min}^{-1}$)	90

Figura 4.25 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 9,5 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP)	91
Figura 4.26 – Comportamento temporal de vazão variável da água de enxágue - $LSP = 9,5 \text{ L.min}^{-1}$ (set-point - SP e variável de processo - PV)	91
Figura 4.27 – Gráfico do indicador KPI_{CE} x Vazão de água de enxágue variável	94
Figura 4.28 – Indicador PI_{TDpH} x Vazão de água de enxágue variável	95
Figura 4.29 – Indicador KPI_{CE} x Vazão de água de enxágue fixa	97
Figura 4.30 – Indicador PI_{TDpH} x Vazão de água de enxágue fixa	98
Figura 4.31 – Indicador KPI_{CE} - Situação 1	103
Figura 4.32 – Indicador KPI_{CE} - Situação 2	105
Figura A.1 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $4,0 \text{ L.min}^{-1}$	114
Figura A.2 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $4,0 \text{ L.min}^{-1}$	114
Figura A.3 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $6,0 \text{ L.min}^{-1}$	115
Figura A.4 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $6,0 \text{ L.min}^{-1}$	115
Figura A.5 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $9,0 \text{ L.min}^{-1}$	116
Figura A.6 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $9,0 \text{ L.min}^{-1}$	116

Figura A.7 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 10,5 L.min ⁻¹	117
Figura A.8 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 10,5 L.min ⁻¹	117
Figura A.9 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 12,0 L.min ⁻¹	118
Figura A.10 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 12,0 L.min ⁻¹	118
Figura A.11 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 16 L.min ⁻¹	119
Figura A.12 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 16 L.min ⁻¹	119
Figura B.1 – Modelo-Simulink implementado do Simulador do Sistema de Gerenciamento de Custo do Consumo do Processo CIP (SISGECIP) na etapa de enxágue	120
Figura C.1 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 6,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	121
Figura C.2 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 6,0 L.min ⁻¹).....	121
Figura C.3 – Comportamento temporal do comportamento do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 6,0 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP).....	122
Figura C.4 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 8,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	122

Figura C.5 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 8,0 L.min ⁻¹).....	123
Figura C.6 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 8,0 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP)	123
Figura C.7 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 8,5 L.min ⁻¹ e set-point variável	124
Figura C.8 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 8,5 L.min ⁻¹).....	124
Figura C.9 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 8,5 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP)	125
Figura C.10 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 9,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	125
Figura C.11 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 9,0 L.min ⁻¹)	126
Figura C.12 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 9,0 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP)	126
Figura C.13 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 9,75 L.min ⁻¹ e set-point variável	127
Figura C.14 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 9,75 L.min ⁻¹)	127

Figura C.15 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 9,75 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	128
Figura C.16 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $10,0 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável	128
Figura C.17 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($LSP= 10,0 \text{ L.min}^{-1}$)	129
Figura C.18 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 10,0 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	129
Figura C.19 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $10,25 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável	130
Figura C.20 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($LSP= 10,25 \text{ L.min}^{-1}$)	130
Figura C.21 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 10,25 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	131
Figura C.22 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $10,5 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável	131
Figura C.23 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($LSP= 10,5 \text{ L.min}^{-1}$)	132
Figura C.24 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 10,5 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	132

Figura C.25 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 11,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	133
Figura C.26 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP=11,0 L.min ⁻¹)	133
Figura C.27 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 11,0 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP).....	134
Figura C.28 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 11,5 L.min ⁻¹ e set-point variável	134
Figura C.29 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 11,5 L.min ⁻¹)	135
Figura C.30 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 11,5 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP).....	135
Figura C.31 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 12,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	136
Figura C.32 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 12,0 L.min ⁻¹)	136
Figura C.33 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 12,0 L.min ⁻¹) e para o set-point variável (WSP).....	137
Figura C.34 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 13,0 L.min ⁻¹ e set-point variável	137
Figura C.35 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 13,0 L.min ⁻¹)	138

Figura C.36 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 13,0 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	138
Figura C.37 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $15,0 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável	139
Figura C.38 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($LSP= 15,0 \text{ L.min}^{-1}$)	139
Figura C.39 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 15,0 \text{ L.min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP).....	140
Figura D.1 – Interface de Usuário CipGUI.fig implementada do Simulador do Sistema de Gerenciamento de Custo do Consumo do Processo CIP (SISGECIP) na etapa de enxágue.....	141

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Regras obtidas para o sistema ANFIS	54
Tabela 4.1 – Erros médios quadráticos entre os dados experimentais e o modelo ANFIS	68
Tabela 4.2 – Valores dos indicadores e do indicador chave de desempenho para simulações com variação da vazão de água de enxágue.....	93
Tabela 4.3 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa	96
Tabela 4.4 – Comparação dos Indicadores KPI_{CE}, PI_{EC}, PI_{VAC}, PI_{CEN} e PI_{CAG} entre as simulações com vazões de enxágue fixa e variável	99
Tabela 4.5 – Comparação da redução do consumo de água nas simulações com vazões de enxágue fixa	101
Tabela 4.6 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa – Situação 1	102
Tabela 4.7 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa – Situação 2	104

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	22
1.1 Motivação	22
1.2 Hipótese	24
1.3 Objetivos	24
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 Sistemas CIP	25
2.2 Consumo de água e energia em processos industriais	28
2.3 Sistemas inteligentes e Lógica Fuzzy	32
2.4 Indicadores e indicadores chave de desempenho	36
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Materiais – Descrição do equipamento	43
3.2 Métodos	47
3.2.1 <i>Ensaio experimental das variáveis de interesse do processo</i>	<i>48</i>
3.2.2 <i>Obtenção e validação dos modelos matemáticos que representam as variáveis de interesse do processo</i>	<i>50</i>
3.2.3 <i>Desenvolvimento dos indicadores de desempenho (PIs) e do indicador chave de desempenho (KPI)</i>	<i>55</i>
3.2.4 <i>Desenvolvimento do algoritmo de set-point variável da vazão de água de enxágue</i>	<i>60</i>
3.2.5 <i>Desenvolvimento da interface gráfica de usuário (GUI)</i>	<i>62</i>
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 Modelagem do comportamento da resposta do pH na etapa de enxágue	65

4.2	Simulação do erro do volume de água consumida	71
4.3	Implementação do algoritmo de definição de set-point da vazão de água de enxágue	72
4.3.1	<i>Influência do volume de água consumida (I_{VAC})</i>	72
4.3.2	<i>Influência do decaimento do pH (I_{DpH})</i>	75
4.3.3	<i>Variação do set-point da vazão de água de enxágue com base nos fatores I_{VAC} e I_{DpH}</i>	78
4.4	Implementação e simulação dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho	81
4.4.1	<i>PI Vazão Média de Enxágue (PI_{VME})</i>	82
4.4.2	<i>PI Volume de Água Consumida (PI_{VAC}) e PI Custo da Água (PI_{CAG})</i>	83
4.4.3	<i>PI Energia Elétrica Consumida (PI_{EC}) e PI Custo da Energia Elétrica (PI_{CEN})</i>	83
4.4.4	<i>PI Taxa de decaimento do pH (PI_{TDpH})</i>	84
4.5	Interface gráfica de usuário CipGUI	85
4.6	Estudo da eficiência da limpeza do processo na etapa de enxágue	86
4.6.1	<i>Simulações com set-point de água de enxágue variável</i>	87
4.6.2	<i>Simulações com set-point de água de enxágue fixo</i>	95
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES		107
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		110
APÊNDICE A – Respostas temporais de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido		114
APÊNDICE B – Modelos-Simulink implementados		120

APÊNDICE C – Comportamentos temporais das simulações com set-point de água de enxágue variável.....	121
APÊNDICE D – Interface gráfica de usuário - CipGUI	141
APÊNDICE E – Função principal para o desenvolvimento da Interface gráfica de usuário (GUI)	142

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Considerando que a higiene, limpeza e assepsia de todas as etapas do processamento na indústria alimentícia são fundamentais para a segurança e qualidade dos alimentos, é primordial a implantação de programas de sanitização. Devido à diversificação dos produtos industrializados, estes programas devem ser específicos a cada produto elaborado.

Nestes processos, pode ocorrer um aumento na quantidade de microrganismos devido ao contato dos alimentos com as superfícies mal higienizadas, prejudicando assim sua qualidade. Os resíduos presentes também podem gerar problemas operacionais, tais como queda no rendimento nas trocas térmicas e perda de carga no sistema.

Para lidar com as definições das autoridades sanitárias, existe um esforço para garantia da limpeza adequada dentro do estabelecido pelas leis. Porém, este fato gera um tradicional desperdício (tanto de químicos, quanto de água), pela comunidade industrial (FRYER e ASTERIADOU, 2009).

Estabelecer o tempo adequado ao processo de higienização é fundamental para a eficiência do processo, devendo ser longo o suficiente para que as interações físicas e as reações químicas ocorram, porém não excessivo, com o cuidado de manter a produtividade da indústria.

O processo caracterizado por efetuar a higienização nas máquinas utilizadas sem a desmontagem dos componentes e de forma cinética, denominado sistema CIP (*Clean in Place*) (JEURNINK e BRINKMAN, 1994; ANDRADE e MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999), é de reconhecida eficiência na remoção de tipos de resíduos que possam resultar na proliferação de microrganismos e, por sua vez, contaminar alimentos que venham a ser processados no ciclo seguinte.

Tendo em vista a limpeza executada, a água e a energia elétrica utilizadas nas diferentes etapas do processo são fatores importantes a se considerar. Reduzir a

quantidade de água proporciona economia em três frentes: minimização do custo da própria utilização do recurso (água), de energia para aquecimento e de reagentes químicos para preparo das soluções, além de evitar gastos excessivos com o tratamento de efluentes (MROZEK, 1985).

Com a evolução da automação e a facilidade na aquisição de dados e informações de condições da instrumentação, do controle do processo e da produção, os indicadores de desempenho das diferentes variáveis do processo são uma ferramenta de grande utilidade para a tomada de decisões e alterações com o objetivo de melhoria no desempenho de processos industriais, tal como a redução de consumo de água e energia elétrica.

Uma deficiência apontada por DAVEY et al. (2013), que menciona não haver muitos modelos que representem adequadamente o processo de higienização, somado à escassez observada de publicações relacionadas ao tema. Adicionalmente, o fato de o uso de água e energia para limpeza na indústria muitas vezes ocorrer de maneira excessiva e sem parâmetros ou referencial, torna de interesse o desenvolvimento de ferramentas para o estudo de redução do consumo de água e energia. Neste sentido, este projeto tem como motivação parametrizar e validar o modelo que descreve a etapa do processo de enxágue de um sistema de limpeza CIP típico. A partir deste modelo que possibilitará a representação desta etapa do processo, e utilizando ferramentas de simulação, propõe-se avaliar e desenvolver indicadores de desempenho que permitam o gerenciamento e a tomada de decisões, e no caso específico deste estudo, a redução do consumo de água e energia elétrica na etapa de enxágue do processo.

1.2 Hipótese

Considerando a importância do processo de limpeza CIP como uma necessidade fundamental para garantir a segurança e qualidade dos alimentos, e devido a necessidade de mais estudos relacionados ao processo. Somado a isto, a preocupação com o uso racional dos recursos naturais e a constante busca de melhoria no desempenho de processos industriais, em especial com relação à redução do consumo de água e energia elétrica, definiu-se como hipótese para o trabalho: “O desenvolvimento e a análise de indicadores de desempenho aplicados em um processo de limpeza CIP (*Clean in Place*) possibilitam a redução do consumo de água e energia elétrica nestes processos.”

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de indicadores de desempenho que possibilitem a redução do consumo de água e energia elétrica em um processo de limpeza CIP.

Para que este objetivo fosse alcançado, definiram-se os objetivos específicos abaixo:

- ✓ Parametrizar e validar o modelo matemático obtido com base na metodologia proposta por SISLIAN (2012);
- ✓ Desenvolver uma interface gráfica que permita a visualização e avaliação dos indicadores de desempenho do consumo de água e energia do processo na etapa de enxague;
- ✓ Desenvolver e avaliar indicadores de desempenho para gerenciamento do consumo de água e energia elétrica do processo na etapa de enxague.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas CIP

Os sistemas CIP (*Clean in Place* – Limpeza no Local) foram desenvolvidos na década de 1950 (inicialmente um processo manual) para limpeza das superfícies de equipamentos. Estes sistemas, que são adaptados a várias partes da planta de produção, foram desenvolvidos com o objetivo de atingir bons resultados em limpeza e sanitização e têm importância não somente para a higiene microbiológica, mas também para restauração das características de transferência de calor e queda de pressão dos equipamentos (DAVEY et al., 2013; MEMISI et al., 2015).

Dentre os benefícios da aplicação do Sistema CIP para sanitização dos equipamentos, maquinários e tubulações que são higienizados em indústrias de laticínios, MEMISI et al. (2015) citam:

- i)* A segurança: menos operações manuais, redução do fator do erro humano e segurança no trabalho, e maior qualidade;
- ii)* O controle da higienização implementado através do painel de controle: os resultados são reprodutíveis;
- iii)* Os custos “controlados”: menores custos com mão de obra, com uso ponderado de recursos para a sanitização, água e energia.

Ainda de acordo com os autores, o escoamento do fluido na superfície do equipamento em altas velocidades cria o efeito da fricção, o que promove o desprendimento do depósito da sujidade.

O Processo CIP é um dos processos de limpeza mais utilizados na indústria visando assegurar que as tubulações e os equipamentos estejam livres de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Desta forma, assim como um aumento no volume de produção, uma aplicação destes princípios de maneira adequada e executada a tempo são fatores necessários no processo de produção de produtos alimentícios saudáveis (MEMISI et al., 2015).

Vale ressaltar que os citados sistemas CIP são utilizados em equipamentos de

instalações industriais não somente de processamento de alimentos, mas também de produtos farmacêuticos ou de bebidas, sendo que esta limpeza deve ser realizada com o máximo cuidado e atenção para assegurar a qualidade do produto final.

De maneira geral, o processo de higienização padrão é composto pelas etapas, a saber:

i) Pré-lavagem: etapa utilizando somente água, com o objetivo de redução superficial de resíduos presentes na superfície dos equipamentos;

ii) Aplicação de soluções detergentes alcalinas: etapa com o objetivo de remoção dos resíduos aderidos à superfície dos equipamentos não removidos na etapa anterior. Estas, de acordo com ANDRADE e MACEDO (1996), SCHMIDT (1997), JEURNINK e BRINKMAN (1994) e GIESE (1991) são utilizadas por serem eficientes na remoção de gorduras, proteínas, carboidratos e na diminuição da carga microbiana;

iii) Lavagem intermediária: etapa que visa remover a solução detergente da etapa anterior;

iv) Aplicação de soluções detergentes ácidas: etapa executada com o objetivo de remoção de resíduos minerais, os quais transformam os sais insolúveis em água, em compostos solúveis (SCHMIDT, 1997; JEURNINK e BRINKMAN, 1994);

v) enxágue: etapa que tem por objetivo a remoção dos resíduos suspensos pela ação do detergente por meio da utilização de água, evitando que ocorra nova deposição durante a secagem, e eliminar as frações residuais das soluções de detergentes aplicadas anteriormente (ANDRADE e MACEDO, 1996; FRYER e ASTARIADOU *et al.*, 2009).

Com relação à higienização das superfícies dos equipamentos especificamente utilizados na preparação dos alimentos, muita atenção vem sendo dada com o objetivo de reduzir a velocidade de multiplicação de microrganismos sobreviventes ao processo de higienização, contaminação por produtos estranhos ao processo ou resíduos de processamentos anteriores; isto pois, conforme mencionam ALVAREZ *et al.* (2004), a cada dia cresce a competição entre as indústrias e as legislações ambientais vem sendo aplicadas com mais rigor, o que leva a um maior esforço por

parte das indústrias na incorporação de tecnologias com menor consumo dos recursos naturais e menor desperdício.

Com foco no estudo de redução do consumo de insumos em Sistemas CIP, VICARIA et al. (2015) desenvolveram um modelo fenomenológico com o objetivo de avaliar a degradação de diferentes homólogos de um detergente (homólogos de Sulfonato de Alquilbenzeno Linear) em função da concentração de ozônio e LAS, da temperatura e do tempo, comparando os dados experimentais com os modelos obtidos. Os parâmetros do modelo foram avaliados comparativamente com os dados experimentais, sendo o modelo proposto validado.

Estudos sobre o processo vem sendo feitos nos últimos anos, porém o tema ainda apresenta carência de publicações relevantes e de impacto, em especial, no que diz respeito ao consumo de água e energia do processo.

A quantidade de água gasta nos processos de limpeza aumentou muito nos últimos anos, em decorrência da intensificação da produção de alimentos e, com isto, muito esforço vem sendo colocado para assegurar que o processo de higienização dos equipamentos seja adequado e de acordo ao estabelecido na legislação em vigor. Este fato, porém, implica na utilização por parte da comunidade industrial de maior quantidade de insumos do que aqueles que seriam necessários e tecnicamente suficientes para que os requisitos técnicos da legislação vigente sejam atendidos.

Entre o final da década de 1960 e início da década de 1970, a água não era considerada como um recurso não renovável, além de ser considerada um recurso ilimitado. Atualmente, por ser um recurso essencial para qualquer atividade humana, existe a necessidade de minimização de seu consumo, além de retorno ao ambiente com o mínimo de contaminação, devido à sua limitada capacidade de autopurificação (ALVAREZ et al., 2004).

Sendo o uso da água minimizado, a geração de efluentes pode ser reduzida, e o problema de contaminação da água também pode ser minimizado (OLIVER et al., 2008).

Logo, existe a necessidade de um equilíbrio entre o aumento de produção sem que se esgotem os recursos naturais, gerando assim menor quantidade de

desperdícios, bem como recuperando e reutilizando a água o máximo possível.

BANSAL e CHEN (2006) complementam o acima mencionado, descrevendo que as mudanças climáticas, os limites de fornecimento de água e o contínuo crescimento da população intensificaram a busca pela redução no consumo de água nas tecnologias envolvidas na limpeza, assim como a quantidade de água desperdiçada. Neste cenário, a maior preocupação para as indústrias de alimentos tem sido preservar a qualidade de seus produtos e reduzir o consumo de água.

Visto que a água em um sistema CIP é usada na pré-lavagem, nos enxágues intermediários, no enxágue final e na preparação das soluções de limpeza e de sanitização, reduzir o seu consumo fornece uma economia tanto com relação ao seu custo, como com o custo do aquecimento e dos produtos químicos necessários para preparar as soluções que serão utilizadas na higienização.

2.2 Consumo de água e energia em processos industriais

Com relação aos impactos positivos da redução do consumo de água na indústria, ALVAREZ et al. (2004) realizaram estudos de minimização e otimização do uso de água no processo de limpeza de reatores e containers em uma planta que produz 6000 toneladas por ano de produtos químicos auxiliares para a indústria têxtil (detergente líquido e amaciante) com um consumo anual de água de 12000 m³ por ano.

Após uma avaliação do processo de limpeza dos reatores e dos *containers* (processos que consumiam maiores quantidades de água) e coleta de dados do processo, foram calculadas a aderência na superfície dos reatores após descarte do produto e feitas medições do consumo de água dos reatores e dos *containers*. Posteriormente ao estudo, foram sugeridas propostas com o objetivo de minimizar o uso de água, tais como: novo plano de produção (baseado em grupos de produtos compatíveis, visando redução do número de limpezas dos reatores); definição, por parte da indústria, da quantidade de produto que pode ficar no reator após a limpeza; limpeza dos reatores com ar comprimido (disponível dentro do reator após a

produção); reuso da água quando uma segunda limpeza no reator é necessária; substituição da limpeza com água quente por limpeza com vapor; reuso de containers sem limpeza intermediária quando no reabastecimento com o mesmo produto; limpeza com sistemas de *spray*; limpeza das tampas e dos topos dos *containers* em tanques com água quente agitada; e reuso da água (filtrada) dos sistemas de *spray* para a limpeza preliminar dos containers.

Sem considerar o custo de geração de ar, pois a indústria gera ar comprimido para os reatores (produção) e o custo envolvido no tempo utilizado pelos funcionários para carregar o produto recuperado nos processos sugeridos, foi feita uma avaliação de viabilidade das propostas. A avaliação feita pelos autores para a limpeza dos reatores apontou que, com o novo processo de limpeza, é possível recuperar 2,2 toneladas de produto por ano. Por meio da recuperação de produto, não seriam produzidos 2640 kg de lodo por ano da planta de tratamento de efluentes, com consequente redução no impacto ambiental.

Foi apontada ainda pelos autores a possibilidade de redução de 60% no consumo de água para limpeza dos reatores com a eliminação de água quente e ar comprimido na limpeza destes (70% da água utilizada para limpeza é água quente). Já a avaliação para a limpeza dos containers apontou que, com o novo processo de limpeza, implementando-se o reuso da água, a limpeza das tampas e dos topos dos *containers* em tanques com água quente e a limpeza com sistemas de *spray*, estima-se uma redução de 90% no consumo de água.

A determinação da quantidade mínima de água utilizada para limpeza do sistema em um processo batelada de produção de vinho foi realizada por OLIVER et al. (2008). A função objetivo definida pelos autores foi o consumo mínimo de água fresca, e o modelo matemático desenvolvido foi baseado em três fontes de água utilizadas: água fresca, água de reuso de outra operação e água de um tanque de armazenamento. Para tal, foram determinados os balanços de massa e as restrições, concluindo-se que as alternativas sugeridas estavam mais diretamente relacionadas à infraestrutura.

Após a avaliação, os autores constataram que o consumo da água dependia da maneira com que a atividade era executada pela equipe, as ferramentas e os equipamentos empregados, sendo a máxima redução de consumo de água fresca de

30,22%, determinada teoricamente. Com relação aos efluentes, foi provado que a otimização da rede de tratamento permite a minimização das vazões de produto a depurar, facilitando o tratamento dos mesmos.

Nos processos de limpeza CIP existe grande importância, não somente na avaliação e estudo de redução de consumo de água e energia, mas também nas aplicações de modelos e otimizações, baseadas em funções objetivo.

NIAMSUWAN et al. (2011) propuseram a minimização do uso de água e de químicos em um processo de limpeza CIP de uma planta de pasteurização. A partir da aquisição de dados em operações reais, os autores reforçam que as soluções de descarte variam a cada batelada e, raramente, são consideradas otimizações nas operações de limpeza.

Para que o comportamento dinâmico da concentração e da contaminação (resíduos sólidos e bactérias) da solução de limpeza pudesse ser descrito nos tanques do processo de limpeza CIP e dos equipamentos de processo, os autores desenvolveram e validaram modelos matemáticos. Para tal, foram assumidas as premissas de soluções de limpeza com densidade constante e vazão fixa.

Os autores realizaram simulações com base nos modelos matemáticos obtidos dos tanques do processo de limpeza CIP e dos equipamentos de processo, com as condições iniciais e os parâmetros de processo baseados em dados observados e nas condições de operação em plantas reais. Para o estudo das operações de limpeza e validação dos modelos, foram utilizados dados experimentais coletados de um pasteurizador de médio porte em uma planta na Tailândia.

O volume de drenagem foi definido pelos autores como a concentração da solução detergente. O volume de drenagem ótimo foi obtido pelo método de otimização definido por estes, e substituído pelo volume de drenagem comumente utilizado na produção, formulando-se assim a função objetivo de minimização do consumo de soluções alcalinas e ácidas.

Para a solução alcalina, o volume de drenagem de 4,34% permitiu uma economia de 10,39% de solução alcalina e 55,49% de água, mantidos e respeitados os limites do percentual mínimo de concentração da solução alcalina (0,98%) e o percentual

máximo de contaminantes (3,03%).

Para a solução ácida, o volume de drenagem de 1,70% permitiu uma economia de 8,82% de solução ácida e 67,36% de água, mantidos e respeitados os limites do percentual mínimo de concentração da solução alcalina (0,80%) e o percentual máximo de contaminantes (0,54%).

Para possibilitar a aplicabilidade com vistas à redução do consumo de água em processos na indústria, há a necessidade de implementação de supervisão (e controle) baseados em instrumentação e modelagem do processo adequadas para tal.

SISLIAN (2012) estudou o mesmo processo, agora aplicado a um trocador de calor do tipo feixe tubular, identificando experimentalmente modelos matemáticos simplificados do tipo primeira ordem com atraso de transporte, FOPDT (*First Order Plus Dead Time*), que representassem o comportamento dinâmico do pH na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP. O autor realizou uma comparação destes com modelos baseados no sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS), os quais mostraram ser mais adequados para modelar a resposta da dinâmica do pH na etapa de enxágue estudada. Para isto foi utilizada uma interface desenvolvida baseada na plataforma *LabVIEW*[®], que permitiu a aquisição de dados, monitoramento e controle das variáveis de interesse do processo.

MELERO JR. et al. (2013) avaliaram as influências da vazão e da temperatura empregadas na etapa de enxágue e uma estimativa do tempo necessário para sua execução foi obtida com base no modelo simplificado. Os resultados obtidos sugerem contribuição na economia da água de lavagem utilizada e no consumo energia elétrica do processo estudado, permitindo a diminuição do tempo total necessário para a realização da etapa de enxágue.

OLIVEIRA et al. (2012) estudaram o consumo de energia elétrica do processo CIP de um trocador de calor de placas empregado no processo de pasteurização de leite em uma grande empresa do ramo alimentício da região de Uberlândia, tendo por base o procedimento operacional padrão de limpeza, constituído pelas etapas de pré-lavagem, lavagem com detergente alcalino, lavagem com detergente ácido, sanitização e etapas de enxágue realizadas entre as diferentes lavagens.

Em diferentes fases e tempos do processo, foram coletadas medidas de condutividade elétrica das soluções circulantes no processo, sendo estes valores foram ajustados à funções de transferência e simulados no ambiente *Simulink*® do software *Matlab*®.

A simulação do processo indicou que os tempos de cada etapa (variáveis entre 400 e 600 segundos) eram excessivos e que era possível alterar a programação do sistema de limpeza CIP para tempos de processo inferiores a 400 segundos (variáveis entre 300 e 400 segundos) sem que esta alteração causasse prejuízos ao processo do ponto de vista de qualidade e segurança alimentar.

Também foi constatado que as mudanças propostas representariam uma redução do custo anual por trocador de calor, o que significou uma economia de 20% no gasto de energia elétrica por trocador de calor.

Buscando contribuir com a redução do consumo de água no processo de limpeza CIP, FAN et al. (2018) avaliaram os parâmetros necessários para melhorar a eficiência do uso da água durante a etapa de pré-enxágue, para remoção de resíduos de leite da superfície da tubulação em uma planta piloto.

A eficiência da remoção de resíduos foi 10% maior com o aumento do número de Reynolds de 20.000 para 100.000. Estes resultados mostraram que, com o aumento do número de Reynolds, a limpeza na etapa em estudo apresentou-se mais eficaz, porém de forma não-linear sugerindo que os resultados podem ser utilizados como base para o estudo da redução do uso de água e energia no processo.

Os autores reforçam o fato de que deve buscar-se um equilíbrio entre a eficiência da limpeza e do uso da água para melhoria no processo de limpeza CIP.

2.3 Sistemas inteligentes e Lógica Fuzzy

Os estudos e simulações apresentados tem por base um modelo que representa o processo, sendo fundamental o estudo e aplicação de técnicas de modelagem que

representem o processo adequadamente, representando uma oportunidade de aplicação de conceitos de sistemas inteligentes.

Um aspecto relevante na forma de pensar dos seres humanos é a implicação lógica, que consiste na formulação de uma conexão entre causa e efeito, ou uma condição e sua consequência. A lógica *fuzzy* é uma abordagem destes sistemas muito parecida com o pensamento e a linguagem do ser humano, quando comparada aos sistemas lógicos tradicionais. Basicamente, ela fornece um meio eficaz de capturar a natureza aproximada e inexata do mundo real (LEE, 1990).

Ao contrário da propriedade fundamental da lógica convencional em que uma função de pertinência é bivalente, na lógica *fuzzy* a função de pertinência tem todos os valores dentro do intervalo $[0,1]$. Significando, na prática, que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicado por um valor fracionário dentro do intervalo numérico (SIMÕES e SHAW, 2007).

Baseados nesta abordagem, e a partir do modelo e do conhecimento do processo, SISLIAN et al. (2015) desenvolveram um sistema de controle de neutralização de pH com elementos de baixo custo. O sistema de controle *fuzzy* implementado, mesmo com a instrumentação de baixo custo utilizada e com limitações, permitiu o controle adequado do processo.

A identificação de sistemas *fuzzy* - utilizada para modelar processos complexos e não lineares a partir das entradas e saídas do modelo - combinada com métodos de redes neurais artificiais, originaram um sistema classificado como híbrido.

Os sistemas neuro-*fuzzy* combinam a capacidade de aprendizado das redes neurais artificiais, por meio de dados de treinamento, com o poder de interpretação linguístico dos sistemas de inferência *fuzzy*. Por esta razão, as grandes possibilidades de manuseio de incertezas e de controle de sistemas complexos proporcionados pela lógica *fuzzy* são combinados com as redes neurais artificiais, as quais possuem características de aprendizagem e adaptação (SIMÕES e SHAW, 2007; SISLIAN, 2012).

Com o objetivo de obtenção de um modelo mais preciso, e consequente redução do consumo de água e energia, uma alternativa é o uso da estrutura *ANFIS* (do inglês,

Adaptative Network Based Fuzzy Inference System), proposto por JANG (1993), técnica que combina os elementos básicos dos sistemas *fuzzy* com a estrutura das redes neurais (PRASAD et al., 2016; RAHMAN et al., 2012).

A grande vantagem observada na utilização da modelagem utilizando a estrutura ANFIS está na possibilidade da utilização de um aplicativo para gerar fácil e rapidamente o modelo independente da produção, condição de operação e equipamentos utilizados (SISLIAN et al., 2012).

RAHMAN et al. (2012) realizaram um estudo comparativo apresentando as vantagens dos modelos *Neuro-Fuzzy* com relação aos modelos de Redes Neurais estudados por SABLANI e RAHMAN (2003). Para tal, foram modeladas a influência da temperatura, quantidade de poeira e porosidade das frutas, na condutividade térmica das mesmas, baseados em 676 dados de literatura.

Os resultados obtidos indicaram que o erro médio absoluto da condutividade térmica do modelo ANFIS foi de 0,011 W/m K ($R^2 = 0,978$); já o erro médio absoluto da condutividade térmica do modelo de redes neurais foi de 0,021 W/m K ($R^2 = 0,950$). Além do erro médio absoluto menor (melhor capacidade de predição) apresentado pela modelagem utilizando a estrutura ANFIS, os autores afirmam que esta técnica de modelagem não necessita de processos rigorosos de desenvolvimento das camadas intermediárias, cobrindo uma maior faixa de condições de predição com uma significativa precisão.

O uso da estrutura ANFIS e a motivação por preocupações com os impactos ambientais levaram aos estudos de HOSOZ et al. (2013), os quais desenvolveram um modelo - com precisão considerada adequada pelos autores – do desempenho e da emissão de motores a diesel.

Para o desenvolvimento do modelo (utilizando o *Toolbox Fuzzy* do *Software Matlab®*) dos 90 vetores de dados experimentais coletados, 70% foram utilizados para treinamento da rede e os 30% restantes para validar o modelo obtido.

Dentre os comportamentos estudados, o erro médio relativo para a predição do comportamento do rendimento de consumo de combustível do freio (relacionado com o consumo de energia) foi de 1,40% ($R^2 = 0,9998$); já o erro médio relativo para a

predição do comportamento da emissão de hidrocarbonetos (relacionado à poluição ambiental) foi de 8,29% ($R^2 = 0,9906$). Dentre as variáveis estudadas (efeitos da velocidade e carga do motor no rendimento do consumo de combustível dos freios, eficiência térmica dos freios, emissão de hidrocarbonetos e monóxido de carbono), os coeficientes de correlação variaram de 0,940 a 1,000, os erros médios relativos entre 1,40% e 27,40% e as frações absolutas de variância entre 0,9863 e 0,9998, o que permite a aplicação destes modelos visando redução de consumo de combustível e emissão de poluentes.

PRASAD et al. (2016) desenvolveram um modelo baseado nos sistemas ANFIS para previsão das concentrações diárias de cinco diferentes poluentes, com base em dados experimentais coletados de um período de dois anos para treinamento da rede. Foram considerados 80% dos dados para treinamento da rede, e os 20% restantes para validação do modelo.

O estudo ainda considerou a combinação ótima de variáveis de entrada para o treinamento da rede que geraria o mínimo custo computacional e com a melhor previsão. Os modelos desenvolvidos geraram resultados de previsão das concentrações de poluentes na cidade em estudo com um dia de antecedência e no mesmo dia, considerados satisfatórios pelos autores, com IOA (*Index of Agreement* – Índice de Concordância) de 75% a 95% para os poluentes CO, SO₂, PM₁₀ e Ozônio, e em torno de 60% para NO₂.

Modelos para predição do consumo de energia anual utilizando a estrutura ANFIS para a modelagem da parte não linear do sistema foram desenvolvidos por BARAK e SADEGH (2016). A motivação, de acordo com os autores, é a de que estes modelos poderiam aumentar a eficiência da previsão.

Foram utilizados 70% dos dados para o treinamento da rede e os 30% restantes para os testes de validação. Como critério de avaliação foi utilizado o critério dos erros quadráticos médios.

Após os estudos comparativos entre as metodologias de modelagem, a estrutura ANFIS *sub clustering* com método híbrido de otimização *back propagation* apresentou o menor erro quadrático médio (0,112), ao passo que os Grid partitioning e FCM apresentaram os erros 0,373 e 0,136, respectivamente.

Muito embora a modelagem seja fundamental, ainda com vistas à redução do consumo de água e energia em processos na indústria, os indicadores de desempenho são ferramentas que trazem uma grande contribuição para a tomada de decisões.

2.4 Indicadores e indicadores chave de desempenho

Os indicadores de desempenho são elementos que facilitam e permitem uma análise (gráfica/visual) na melhoria do desempenho de um processo.

Tendo em vista que nos estudos relacionados à redução do consumo de água, energia e insumos de processos industriais frequentemente são mencionados e utilizados os PIs (indicadores de desempenho) e os KPIs (indicadores chave de desempenho). Usualmente, foca-se no desenvolvimento destes indicadores, os quais apresentam informações que permitirão uma avaliação que auxiliará na tomada de decisões.

Com foco nesta descrição mais direcionada às aplicações industriais, GONZÁLEZ-GIL et al. (2014) afirmam que os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) são utilizados para avaliação do desempenho de todo o sistema ou planta e subsistemas completos. Adicionalmente, os autores citam que os KPIs possibilitam a análise/verificação de parâmetros fundamentais, tais como o consumo de energia de um sistema ou o peso de diferentes subsistemas no consumo global de energia, além de exprimir como as diferentes melhorias no nível de subsistemas irão afetar o desempenho global do sistema.

Os indicadores chave de desempenho no ambiente industrial são, em sua grande maioria, informações quantitativas. Eles ilustram a estrutura e os processos da empresa e são um conjunto de medições que focam nos pontos do desempenho organizacional que são críticos para o sucesso da empresa (BADAWI et al., 2016).

Estes indicadores avaliam o desempenho de um processo no nível gerencial refletindo na eficiência global da planta, além de auxiliarem gerentes de planta na

avaliação do desempenho da produção no nível empresarial, da planta ou do processo. O ponto importante com relação aos KPIs é o fato destes coletarem a essência do processo de produção e, por este motivo, serem específicos para a aplicação (CHIOUA et al., 2015).

Já os Indicadores de Desempenho (PIs), ressaltam GONZÁLEZ-GIL et al. (2014), são utilizados para análise do desempenho de unidades individuais dentro de subsistemas e poderão ainda ser utilizados na avaliação de medições de eficiência energética individuais no nível de subsistemas, proporcionando ao mesmo tempo informações essenciais para calcular diferentes KPIs em escala global.

Os autores ressaltam que os PIs se destinam a verificar o efeito de múltiplas aferições de variáveis em partes específicas de sistemas ou plantas, testando a tecnologia/estratégia adequada tanto em campo, como por simulações. Deste modo, os PIs fornecem informações para auxiliar na tomada de decisões de implementações de medições - ou não - em todo o sistema; além disto, os autores afirmam que a definição de ciclos de trabalho e regimes operacionais são indispensáveis para que os indicadores forneçam medições comparativas válidas.

Dependendo das características particulares de cada sistema, novos PIs que contribuam para a avaliação devem ser adicionados para avaliar o desempenho das plantas. GONZÁLEZ-GIL et al. (2014) também afirmam que os novos PIs definidos podem ser utilizados para o cálculo e aperfeiçoamento de KPIs previamente definidos.

Para determinação dos principais indicadores necessários ao processo decisório, COGHI (2013) resalta a importância do entendimento de como cada decisão é tomada, bem como das informações necessárias para a ação conveniente que deve ser tomada a partir da notificação de um problema. O autor ainda cita, para melhor entendimento, um exemplo: para saber se um equipamento de processo está sendo bem utilizado, é necessário medir as paradas do processo, o desempenho ou ritmo de produção em relação ao valor nominal para qual o processo foi especificado e a qualidade do produto gerado. Depois, é comum multiplicar esses três indicadores para formar um KPI (no caso, OEE - *Overall Equipment Effectiveness* - indicando a eficácia global dos equipamentos).

BOLOGNESI et al. (2013) desenvolveram um indicador de eficiência energética

com o objetivo de encontrar configurações de rede de distribuição de água otimizadas que possibilitassem minimizar o consumo de energia e maximizar a eficiência energética.

Os aspectos relacionados à energia, tanto preocupação ambiental e, especialmente, preocupações com custos, surgem em redes de distribuição de água quando um ou mais dispositivos eletromecânicos (tais como bombas) estão presentes.

Para o cálculo do Indicador de Eficiência Energética proposto, os autores o definem como a razão entre a denominada “Energia Mínima Inevitável” – mínima energia requerida pela bomba - e o diâmetro mínimo da tubulação que satisfaça a demanda necessária.

Os autores ainda realizaram simulações variando o diâmetro das tubulações e a função objetivo definida como a maximização do Indicador de Eficiência Energética (EEI – *Energetic Efficiency Indicator*). Para tal, foram feitas investigações comparativas do indicador, da energia consumida e da taxa de vazamentos, entre a rede de distribuição original e a otimizada. Observou-se que, ao modificar a bomba e o diâmetro da tubulação para a condição considerada otimizada, para uma taxa de vazamento fixa de 10% o indicador EEI variou de 0,25 para aproximadamente 0,375 e a energia consumida reduzida de 900 kWh por dia para aproximadamente 640 kWh por dia.

Um KPI para um sistema de posicionamento dinâmico de uma plataforma *offshore* foi desenvolvido por PARK et al. (2016). Como este sistema consome mais energia do que os demais, é importante operá-la o mais economicamente possível.

O indicador desenvolvido considerou a combinação das condições gerais do sistema (no caso o desvio de controle, o consumo de energia e as condições ambientais), sendo de interesse para base na determinação das condições do sistema e tomada de ações necessárias relacionadas a manutenção.

Uma comparação entre os valores do KPI obtidos de dados simulados e de dados de experimentais coletados - considerando uma condição ideal onde o indicador apresentaria o valor máximo - mostrou que o KPI proposto no trabalho é

válido como um indicador das condições do sistema em estudo.

Os autores reforçam que os dados reais utilizados foram coletados em um curto espaço de tempo, sendo propostos testes com dados de longo prazo para trabalhos futuros, quando o sistema for implementado para monitoramento.

UM et al. (2015) apresentam uma metodologia desenvolvida para estimar o consumo de energia com base nos KPIs de sustentabilidade do maquinário instalado em uma indústria. Os autores descrevem a metodologia utilizada para definição dos parâmetros necessários para o cálculo do consumo de energia e o desenvolvimento do modelo que estima o uso de energia com base em dados experimentais.

A metodologia proposta foi aplicada aos processos de soldagem a laser de uma linha de produção automotiva e de fresa de uma indústria de peças para aviões, onde são apresentados graficamente os fatores utilizados. Isto, de acordo com os autores, facilita e permite uma abordagem holística para estimativa da ecoeficiência relacionada ao consumo de energia dos processos.

Uma outra possibilidade apresentada por RODRIGUEZ et al. (2009) é a abordagem na qual os indicadores de desempenho fornecem também informações importantes relacionadas entre eles, permitindo um replanejamento dos objetivos com que eles estejam associados, assim como a melhoria do processo de tomada de decisão. Os autores propuseram a metodologia chamada Relação Quantitativa nos Sistemas de Medição de Desempenho – QRPMS (*Quantitative Relationship at the Performance Measurement System*), que tem o objetivo de identificar e quantificar objetivamente as relações entre os KPIs e estabelecer relações de causa e efeito nos objetivos propostos.

A metodologia foi, então, aplicada em uma empresa com 230 funcionários durante um período de três meses, possibilitando o estabelecimento de ligações entre os objetivos e os indicadores de desempenho associados, levando à identificação de comportamentos que poderiam desequilibrar a análise, gerando uma matriz inicial dos KPIs e das observações.

Na fase de identificação de relação entre os KPIs, possibilitou-se a modelagem, a qual forneceu uma visão global quantificada das variáveis de causa-efeito, assim

como a apresentação gráfica das relações de KPIs que possibilitariam o estabelecimento das relações de causa e efeito entre eles, quantificadas em sentido e intensidade.

Como exemplo da possibilidade de replanejamento baseada nos KPIs e as relações entre eles, cita-se o objetivo financeiro FO1 definido pelos autores como o incremento em 10% no lucro líquido. O estudo, a partir dos KPIs definidos (no caso 7 afetam este objetivo financeiro), possibilitou a identificação e indicou onde a empresa deveria focar os recursos.

Como resultado, de acordo com os autores, os gerentes da empresa onde o QRPMS foi aplicado mostraram entusiasmo e apoio aos resultados atingidos pela aplicação do mesmo, pois estes ressaltaram a possibilidade de se ter uma visão clara e sólida das reais interações entre os KPIs, com informações adicionais dos elementos do Sistema de Medição de Desempenho e da empresa em geral.

Os autores deixam claro que os gerentes devem continuamente acompanhar a evolução e o desempenho (dentro dos limites) dos indicadores de desempenho (no caso, relacionados aos negócios) e as estratégias e objetivos associados que impactam neste objetivo financeiro. Ou seja, a evolução dos KPIs necessita ser constantemente acompanhada e analisada com base nos objetivos definidos para o processo.

Uma tendência atual, de acordo com TUGNOLI et al. (2012), é a aplicação de uma perspectiva holística da avaliação de sustentabilidade das plantas, o que direciona fortemente a uma adoção de soluções de segurança intrínseca. Os autores apresentam a metodologia (IS-KPI – *Inherent Safety* KPI, do inglês KPIs de segurança intrínseca) que gera métricas de segurança intrínseca a partir dos diferentes aspectos de desempenho desta, tanto da planta como um todo, como de suas unidades individualmente. A metodologia foi aplicada na avaliação global da segurança intrínseca em três tipos de terminais de regaseificação de Gás Natural Liquefeito – GNL.

Inicialmente as unidades foram identificadas e classificadas. Os eventos críticos selecionados de uma base de dados foram associados e assim realizados os cálculos das distâncias de danos de referência com base em modelos de análise de

consequências.

Foi possível a identificação de unidades críticas para cada tipo de terminal, orientando, por exemplo, na adoção de melhores padrões de desenvolvimento dos vaporizadores. Foram também criados indicadores globais, que resumem/concentram o impacto relacionado à segurança de toda a planta, por exemplo o índice PI, influenciado pela contribuição dos tanques de armazenamento do GNL e que demonstra o risco intrínseco apresentado pela substância armazenada.

Os autores ressaltam que a criação de procedimentos de identificação de risco (ou de consumo) resultando em indicadores de desempenho – no caso de segurança intrínseca – deixam os resultados menos dependentes do julgamento de especialistas e menos influenciados por suposições construtivas.

Uma vez que os KPIs devem constantemente ser refinados ou seus pesos ajustados de acordo com os objetivos/desvios - em resposta às situações reais - CAI et al. (2009) propuseram uma metodologia de análise iterativa de “sucesso/desempenho dos KPIs”, ou seja, se estão dentro dos limites definidos nos objetivos.

Esta metodologia propõe a implementação da realimentação dos objetivos, do modelo e do planejamento, com base na identificação e definição das relações entre os KPIs, na estimativa das interdependências entre os esforços de cumprimento dos KPIs de uma maneira estruturada, no cálculo de otimização por meio de simulação computacional do processo de cumprimento iterativo dos KPIs e estimativa do custo total. Isto possibilitou a identificação dos KPIs críticos para a melhoria do desempenho global e no ajuste da estratégia de gerenciamento de desempenho, a partir da interpretação dos resultados analisados.

A metodologia proposta pelos autores foi implementada em uma indústria distribuidora para fabricantes de eletrônicos com mais de 100.000 funcionários. Inicialmente, empregados e gerentes foram entrevistados com o objetivo de identificar e definir os diferentes KPIs e suas inter-relações, além do desenvolvimento de questionários e critérios de avaliação para que os envolvidos pudessem analisar cada indicador de desempenho, baseando-se em sua participação, experiência e área de especialidade, identificando-se 20 KPIs.

Na sequência, foram observadas e avaliadas a estimativa de custo de cumprimento de cada KPI e as relações iterativas. Neste passo, foram utilizadas relações qualitativas de causa e efeito entre os KPIs para avaliação e obtenção dos custos de dependências.

Mesmo com base nas relações entre os KPIs, os autores reforçam que os resultados não devem ser adotados como decisões diretas, mas como informações de suporte na tomada de decisão.

Observa-se claramente a importância dos sistemas de controle trabalhando conjuntamente com ferramentas de gerenciamento e uso de indicadores de desempenho para a tomada de decisões, assunto este pouco abordado tanto pela comunidade acadêmica, quanto pelo ambiente industrial. Esta é uma lacuna encontrada nos sistemas CIP, com consequente possibilidade de redução no consumo de água e energia, e do impacto ambiental.

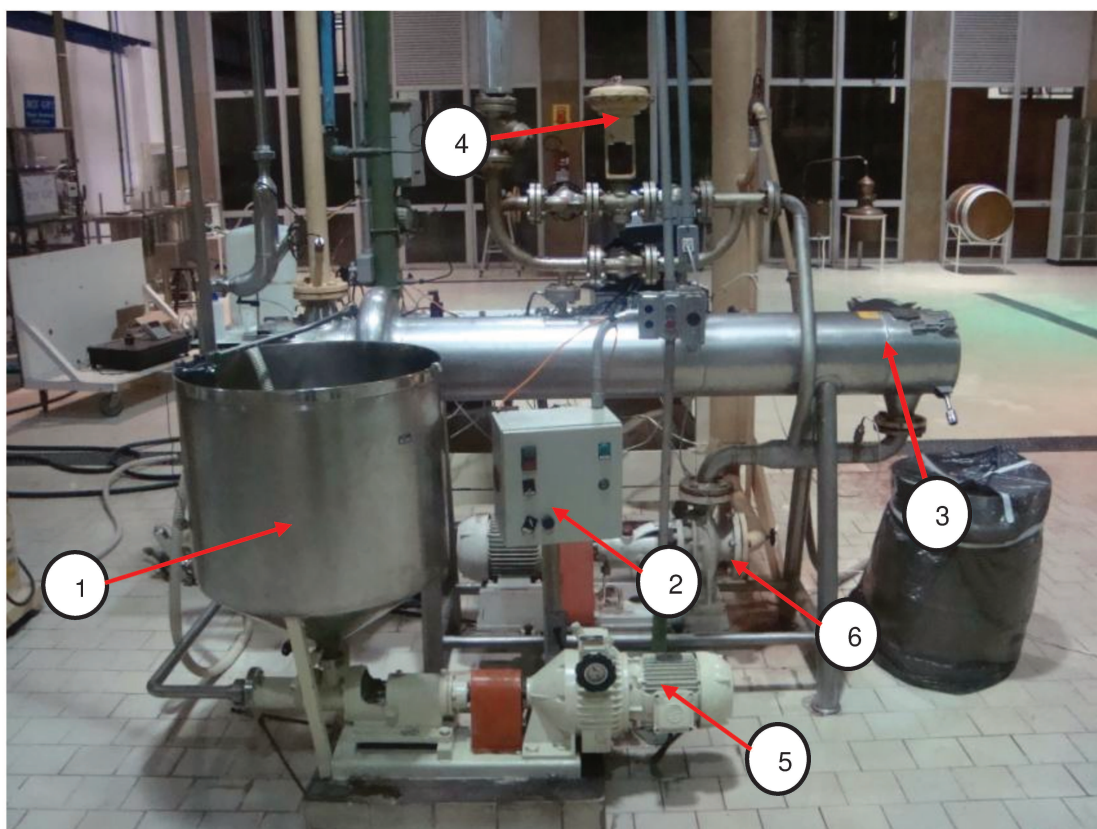
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No intuito de se alcançar o objetivo proposto neste trabalho, foram utilizados os ensaios experimentais realizados com o trocador de calor existente na planta piloto do Edifício Prof. Walter Borzani nas instalações do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia e apresentados no estudo de SISLIAN (2012).

3.1 Materiais – Descrição do equipamento

Na Figura 3.1 são apresentados os equipamentos e a instrumentação utilizados para a execução dos ensaios experimentais.

Figura 3.1 – Equipamentos e instrumentação para o processo de limpeza CIP.
Fonte: SISLIAN, 2012.



Legenda:

- 1 - Reservatório a partir de onde foi inserido e recirculado o fluido do processo;
- 2 - Quadro do inversor de frequência (ABB, modelo ACS143-2K7-1);
- 3 - Trocador de calor (Vettori–Manghi, modelo 1978);
- 4 - Válvula eletropneumática proporcional (Fluxotrol, modelo PK2117);
- 5 - Bomba de deslocamento positivo (Robuschi, modelo RE50-110);
- 6 - Bomba centrífuga (Robuschi, modelo RE50-160).

O funcionamento do sistema estudado é definido pela circulação do produto pelos tubos (água, leite ou solução de NaOH, que serão detalhados na sequência), promovido por uma bomba de deslocamento positivo (5), fazendo com que o fluido do processo no estado líquido seja submetido a quatro passagens no interior dos tubos do trocador de calor. A bomba centrífuga (6) é responsável pela circulação da água de aquecimento através do casco do trocador de calor. A temperatura da água de aquecimento é ajustada por meio da válvula de controle (4) que é responsável por manipular a vazão de vapor de água saturado, gerado por uma caldeira do tipo flamotubular instalada em ambiente próprio e adequado para o seu funcionamento seguro.

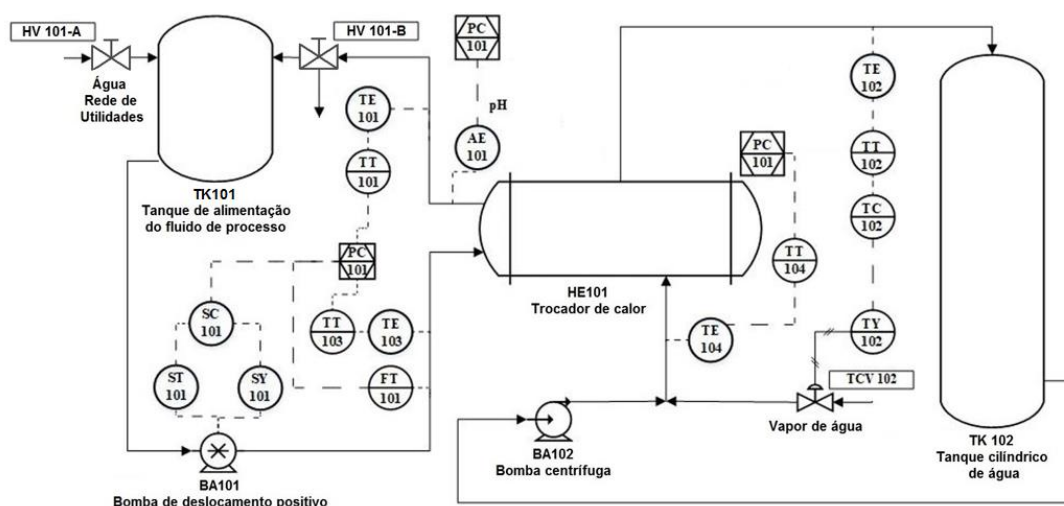
O processo de aquecimento ocorre com a abertura da válvula eletropneumática (4), a qual injeta vapor de água saturado a $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ na água em estado líquido proveniente de um reservatório cilíndrico vertical, que desempenha o papel de um sistema de acúmulo de energia. A água quente resultante desta mistura é conduzida à entrada do casco do trocador de calor, fornecendo energia térmica ao sistema e acarretando no aumento de temperatura. Estando o casco do trocador de calor submetido à elevação de temperatura, este irá aquecer o fluido de processo existente no interior dos tubos, tendendo a manter o equilíbrio térmico entre o corpo e a tubulação interna do trocador de calor. A água de saída do casco retorna ao

reservatório vertical, o qual possui uma válvula de purga que é acionada na condição de sua pressão interna ultrapassar o limite superior.

Para o resfriamento do produto, o procedimento é inverso, ou seja, pelo fechamento da passagem de vapor de aquecimento na válvula de controle. O tempo de resposta é mais lento quando comparado ao de aquecimento, pois o resfriamento ocorrerá apenas em decorrência da troca térmica entre o corpo do trocador de calor, o fluido de processo e o meio ambiente.

Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama representativo do processo e da instrumentação.

Figura 3.2 – Diagrama representativo do processo e da instrumentação



No qual:

TE101: Sensor de temperatura do fluido de processo na saída do trocador de calor;

TE102: Sensor de temperatura de saída da água quente;

TE103: Sensor de temperatura do fluido de processo na entrada do trocador de calor;

TE104: Sensor de temperatura da entrada da água quente;

FT101: Transmissor de vazão do fluido de processo na entrada do trocador de calor;

TC102: Controlador de temperatura da água de aquecimento;

TCV102: Válvula de controle de temperatura da água de aquecimento;

BA 101: Bomba de circulação do fluido de processo;

BA 102: Bomba de circulação do fluido de aquecimento;

SC101: Controle de rotação da bomba de circulação do fluido de processo;

HV 101-A: Válvula manual de bloqueio (responsável pela alimentação da água proveniente da rede de utilidades do laboratório);

HV 101-B: Válvula de três vias;

AE 101: Sensor de pH;

TK101: Tanque de alimentação do fluido de processo;

TK102: Tanque de água de aquecimento.

O sistema eletrônico de aquisição de dados utilizado foi composto pelos seguintes itens: *(i)*- um microcomputador do tipo PC; *(ii)*- uma placa de aquisição de dados do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS, modelo: NI PCI-6259, com capacidade para até 4 saídas analógicas de 16 bits, 48 entradas e saídas digitais e faixa de operação de -10 V a +10 V e *(iii)*- do software LabVIEW, utilizado para realizar o monitoramento, aquisição de dados e controle do processo.

Além dos itens mencionados, dois instrumentos de importância para este trabalho são o medidor de vazão (Metroval, modelo OI-2 SMRX/FS), com precisão de $\pm 0,01\%$ e o phmetro (Micronal, modelo B-474), com precisão de $\pm 0,05\%$, uma vez que serão as duas variáveis que serão utilizadas nas simulações.

Os dados coletados e registrados da resposta do pH na etapa de enxágue dos ensaios experimentais do sistema foram utilizados para a sequência do desenvolvimento deste trabalho.

3.2 Métodos

Para o desenvolvimento e testes de aplicação dos indicadores de desempenho na etapa de enxágue de um processo CIP, os métodos utilizados foram divididos em cinco etapas.

i) Parametrização e validação do modelo matemático que representa a resposta do pH do processo para variações na vazão do fluido de processo com o intuito de possibilitar a simulação da resposta do processo, permitindo a realização de testes do sistema sem o uso de insumos e o consumo energia elétrica;

ii) Desenvolvimento de indicadores de desempenho (PIs) e de um indicador chave de desempenho (KPI) para possibilitar a avaliação do custo e do consumo de água, energia elétrica e do tempo da limpeza na etapa de enxágue do sistema em estudo;

iii) Desenvolvimento de um algoritmo que varie o *set-point* de vazão da água de enxágue (WSP) com o intuito de validar o uso dos indicadores desenvolvidos e verificar a vantagem da variação ou não da vazão do fluido de processo durante a etapa de enxágue para o sistema em estudo;

iv) Desenvolvimento de um sistema no ambiente Simulink do *software* Matlab® utilizando o modelo validado no item *i)* e a resposta de vazão do fluido de processo - além dos indicadores de desempenho – que possibilite a simulação dos indicadores de desempenho no processo para o estudo proposto;

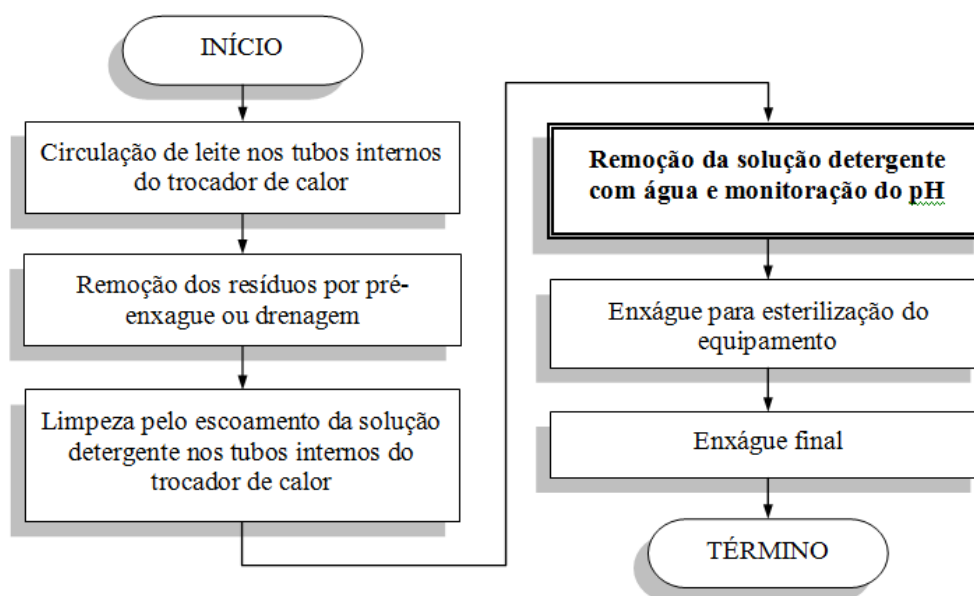
v) Desenvolvimento de um GUI (*Graphical User Interface*) como interface do usuário para a simulação do sistema desenvolvido no ambiente Simulink.

3.2.1 Ensaios experimentais das variáveis de interesse do processo

Visando contextualizar o leitor, detalha-se na sequência a metodologia utilizada na execução dos ensaios experimentais para a obtenção dos dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Baseando-se no diagrama apresentado na Figura 3.2, a inicialização consistiu em promover a sujidade do equipamento, executada circulando o agente incrustante - leite tipo C em estado líquido (promovido pela bomba BA 101) – em circuito fechado. A Figura 3.3 ilustra o fluxograma com os procedimentos utilizados para a análise do processo, destacando em **negrito** a etapa de enxágue em estudo.

Figura 3.3 - Fluxograma básico com as etapas do processo CIP. Fonte: SISLIAN, 2012.



Para remoção dos resíduos de leite do interior dos tubos, procedeu-se da forma descrita a seguir, considerando que este possui apenas um reservatório para alimentação de entrada:

i) Ajustou-se o *set-point* do controlador de temperatura para 50 °C;

ii) Ajustou-se a abertura da válvula de três vias (HV 101-B) disponível na instalação, de modo que a tubulação de saída responsável pelo transporte do leite

remanescente da etapa anterior - contido no interior do trocador de calor - fosse direcionada ao descarte;

iii) Ligou-se a bomba de circulação do fluido de processo (BA 101), com ajuste do *set-point* de vazão para 9 L.min^{-1} , mantendo-a nesta condição até que o volume no reservatório de entrada atingisse o nível mínimo (definido por inspeção visual);

iv) Atingido o nível mínimo, foi aberta a válvula de bloqueio (HV 101-A) responsável pela alimentação da água proveniente da rede de utilidades do laboratório, na temperatura ambiente;

v) Ao término da fase de circulação do leite para o descarte, a qual é perceptível pela alteração de coloração branca para translúcida, fechou-se a válvula HV 101-A (cessando a alimentação com água de alimentação) e, simultaneamente, manobrou-se a válvula HV 101-B, de modo que o fluido de processo da saída, constituído por água e eventuais resíduos de leite remanescentes da etapa anterior, fosse direcionado ao reservatório de entrada, mantendo-o em circulação no trocador de calor;

vi) Aguardou-se que a temperatura da saída do fluido de processo estabilizasse em 50°C ;

vii) Adicionou-se NaOH no reservatório de entrada, de modo que a solução detergente final fosse 0,5 % em massa, valor comumente utilizado na indústria, para obtenção de solução altamente alcalina com pH por volta de 12;

O volume total de líquido (fluido de processo), que consiste na quantidade de líquido dos tubos internos do trocador de calor somado à quantidade do reservatório de entrada na marca mínima, resulta em 70 litros. Portanto, a massa de NaOH adicionada na água para esta etapa foi de 350 g.

viii) Manteve-se circulação da solução detergente (NaOH) pelo período de uma hora com vazão em 9 L.min^{-1} e temperatura em 50°C .

Concluída a circulação da solução detergente, manobrou-se a válvula HV 101-B de modo que a solução fosse direcionada a um tanque intermediário de saída - balde de capacidade aproximada de 5L – como sistema de amostragem, para medição do

pH (em malha aberta) e descarte; aguardou-se até que a solução de NaOH chegasse ao fim do reservatório de entrada e desligou-se a bomba BA 101 de escoamento do fluido de processo.

Em seguida, foi aplicado um degrau no *set-point* do controlador de vazão, ligou-se simultaneamente a válvula HV 101-A de alimentação da água da rede, em temperatura ambiente, para o reservatório de entrada e iniciou-se a aquisição de dados; aguardou-se que o pH da saída do fluido de processo atingisse o valor - previamente conhecido - igual ao da água da rede utilizada (pH neutro – no caso, pH = 7,9), registrando as grandezas dinâmicas do sistema ao longo do tempo: vazão medida (FT 101), temperaturas medidas (TT 101 a TT 104) e valores de pH (AE 101).

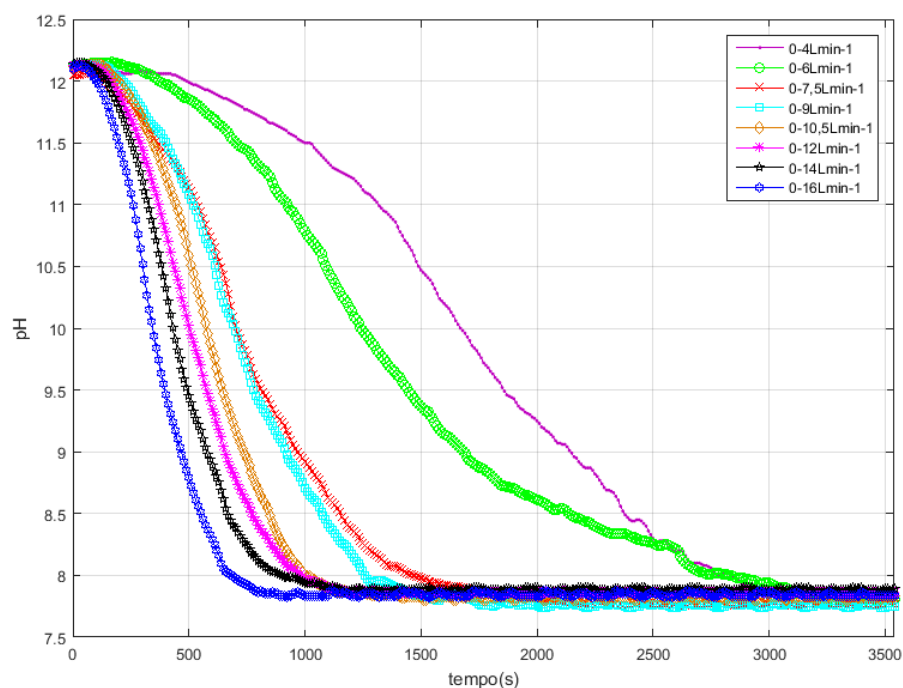
Repetiu-se o procedimento para diversos valores de vazão dentro do range de trabalho da bomba BA 101 (entre 4 e 16 L.min⁻¹), obtendo-se assim os dados experimentais utilizados neste estudo.

3.2.2 Obtenção e validação dos modelos matemáticos que representam as variáveis de interesse do processo

Em conformidade com os objetivos propostos no trabalho, e visando representar o processo por meio de simulações, tomou-se como base os ensaios e dados experimentais obtidos para o desenvolvimento do modelo matemático que representa o comportamento temporal dos valores de pH correspondentes às concentrações de NaOH presentes na água de enxágue efluente da saída do trocador de calor estudado, em função da vazão da água de enxágue.

Os dados experimentais obtidos de acordo com a metodologia apresentada no item 3.2.1 para o treinamento da estrutura ANFIS foram inseridos sequencialmente, sendo utilizadas as respostas do pH para degraus na vazão de 0 L.min⁻¹ para 4 L.min⁻¹, 0 L.min⁻¹ para 9 L.min⁻¹, 0 L.min⁻¹ para 10,5 L.min⁻¹, 0 L.min⁻¹ para 12 L.min⁻¹, 0 L.min⁻¹ para 14 L.min⁻¹ e 0 L.min⁻¹ para 16 L.min⁻¹ (todos os dados - para o treinamento e validação do modelo obtido - são apresentados na Figura 3.4).

Figura 3.4 – Comportamento do pH em função de variações da vazão. Fonte: SISLIAN, 2012.



Estes dados foram inseridos no toolbox “*Fuzzy Logic*” do ambiente de simulação *Simulink*®, através do sistema de inferência *Fuzzy Neuro-Adaptativo* – estrutura ANFIS - e definiu-se o sistema de inferência “Sugeno” e o algoritmo *grid-partition* com o método de aprendizagem *backpropagation*, três funções de pertinência triangulares tanto para as variáveis de entrada ($F[k]$ - vazão de enxágue e $pH[k-1]$ – pH atrasado em uma amostragem) como para a variável de saída (pH), dez épocas de iteração e tolerância para o erro no treinamento de $1,00 \times 10^{-2}$.

Os termos linguísticos utilizados para as funções de pertinência obtidas das variáveis de entrada (pH atrasado de uma amostragem) e saída (pH) foram: Neutro, Neutro-Alcalino e Alcalino; os termos linguísticos da variável de entrada (vazão) foram: Baixa, Média e Alta.

A estrutura ANFIS com as características utilizadas para o treinamento, foi

escolhida por ser a que apresentou melhores resultados quando feita a validação do modelo no estudo apresentado por SISLIAN (2012); estas quando comparadas aos modelos obtidos e validados utilizando uma entrada e uma saída (insatisfatórios) e aqueles com as mesmas entradas e saída, porém com três ou cinco funções de pertinência e/ou mais regras (não apresentando melhora significativa).

Uma vez que no estudo citado foram utilizados 87,5% dos dados para a modelagem do processo, e visto que um dos objetivos deste trabalho é a parametrização e validação do modelo desenvolvido, buscou-se a validação do processo com um percentual maior dos dados (com base na literatura estudada - HOSOF et al. (2013); PRASAD et al. (2016); BARAK e SADEGH (2016) - observou-se a utilização entre 70% e 80% dos dados para modelagem). Para tal, o processo foi novamente modelado utilizando-se 75% dos dados experimentais, com a utilização da metodologia apresentada anteriormente neste capítulo.

Foram utilizados os dados experimentais (com taxa de amostragem de 10 segundos) de resposta do pH na etapa em estudo para o degrau na vazão de água de enxágue de 0 para 4 L.min⁻¹, 9 L.min⁻¹, 10,5 L.min⁻¹, 12 L.min⁻¹, 14 L.min⁻¹ e 16 L.min⁻¹.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as funções de pertinência das entradas $F[k]$ e $pH[k-1]$, respectivamente.

Figura 3.5 – Funções de pertinência da Entrada – F[k]

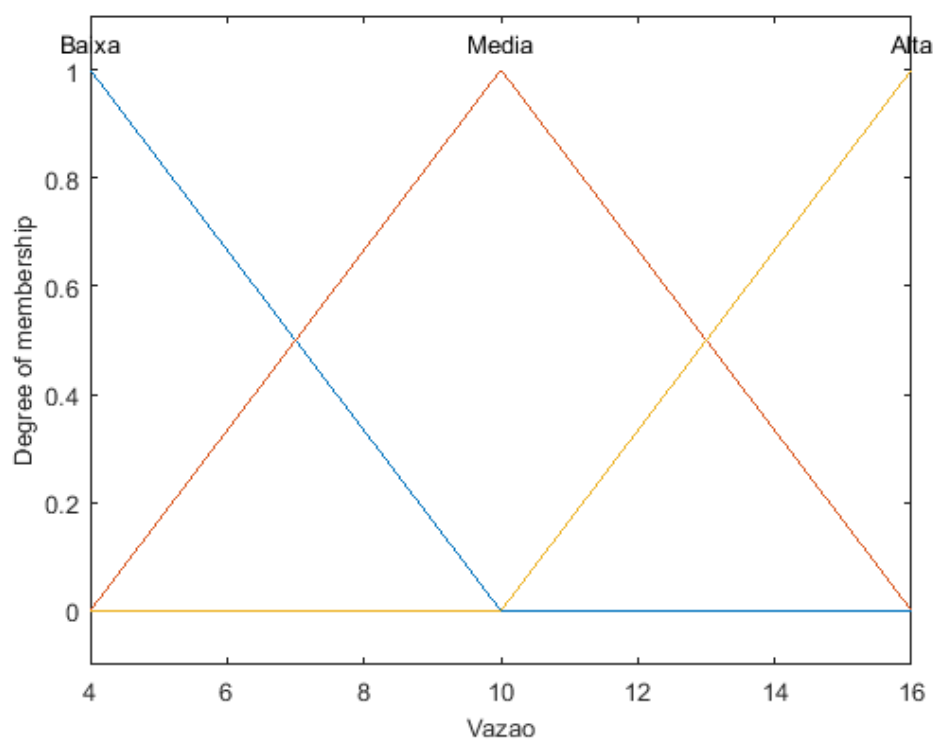
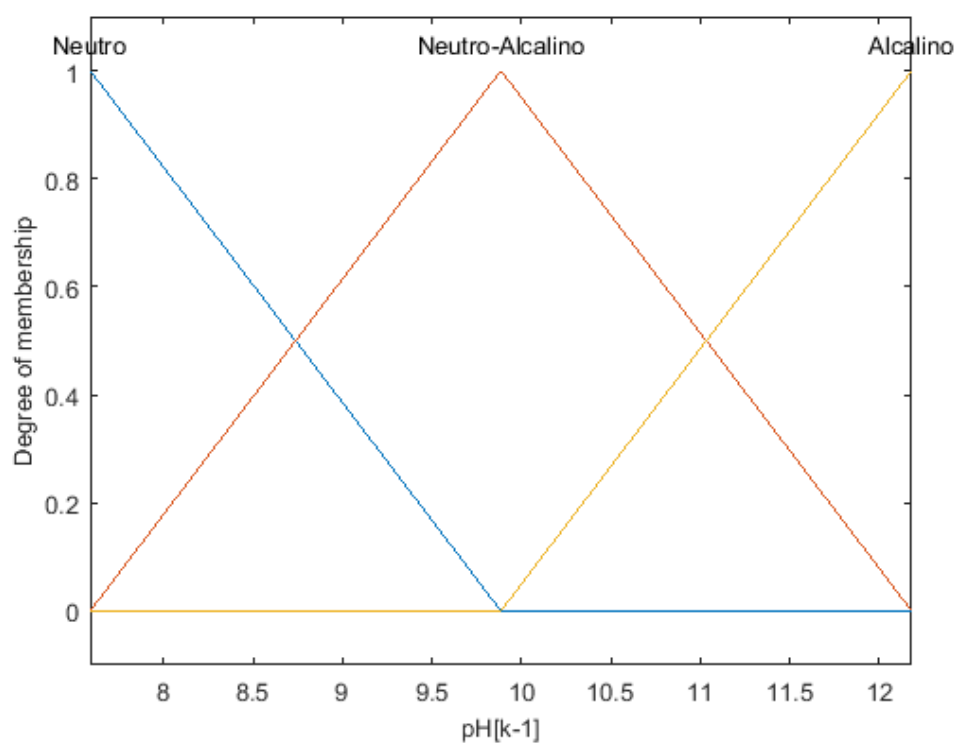


Figura 3.6 – Funções de pertinência da Entrada – pH[k-1]



Os termos linguísticos utilizados para as funções de pertinência das variáveis de entrada (pH atrasado em uma amostragem) e saída (pH) foram: Neutro, Neutro-Alcalino e Alcalino, e os termos linguísticos da variável de entrada (vazão) foram: Baixa, Média e Alta. As regras obtidas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Regras obtidas para o sistema ANFIS

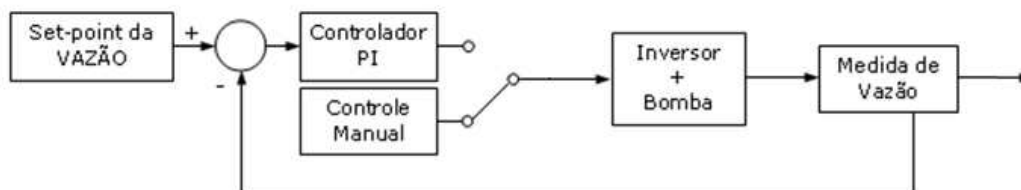
pH [k-1]	Vazão (L.min ⁻¹)		
	Baixa	Média	Alta
Neutro	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino
Neutro-Alcalino	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino
Alcalino	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino

Após o treinamento da estrutura, o modelo obtido foi validado utilizando-se as respostas do pH ao degrau na vazão de 0 para 6,0 L.min⁻¹ e de 0 para 7,5 L.min⁻¹ (25% dos dados experimentais).

Para a comparação entre o modelo e os dados experimentais, estes foram inseridos em uma *Lookup Table* (ainda no ambiente Simulink®) por meio de um vetor e possibilitando apresentá-los em um gráfico temporal comparativo. Além disto, foi efetuado o cálculo do somatório do erro entre o sistema ANFIS e os dados experimentais e o erro médio quadrático.

Por fim, com o objetivo de simular a resposta do controlador de vazão, foi também implementado o modelo-Simulink do controlador PI (diagrama de blocos simplificado apresentado na Figura 3.7) com os parâmetros de sintonia utilizados quando executados os ensaios experimentais, e uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte que simulou as características de resposta da bomba. Este modelo foi implementado e validado quando em sua aplicação, apresentando resultados satisfatórios.

Figura 3.7 – Diagrama de blocos da malha de controle de Vazão. Fonte: SISLIAN, 2012.



3.2.3 Desenvolvimento dos indicadores de desempenho (PIs) e do indicador chave de desempenho (KPI)

Possibilitada a simulação adequada do sistema na etapa em estudo, foram desenvolvidos os indicadores de desempenho para a tomada de decisão visando a redução do consumo de água e/ou energia do processo de limpeza.

O indicador PI_{VME} apresenta a Vazão Média de Enxágue. Neste, foi efetuado o cálculo da razão entre o somatório dos valores da vazão (F) durante o tempo (t) de limpeza e o número de amostragens (n) – apresentado na Equação 3.1. A unidade de medida deste indicador é $L.min^{-1}$.

$$PI_{VME} = \frac{\sum_0^t F}{n} \quad (3.1)$$

Já o indicador PI_{VAC} apresenta o Volume de Água Consumida durante a simulação, isto com base na integral da vazão (F) no tempo (t) que esta leva para atingir o valor de pH considerado em regime estacionário (no caso do sistema em estudo, $pH = 7,9$, conforme já mencionado) – apresentado na Equação 3.2. A unidade de medida deste indicador é L .

$$PI_{VAC} = \int_0^t F \quad (3.2)$$

A decisão por se definir um valor fixo de pH para o regime estacionário (7,9) – e

não um intervalo - é justificada pelo fato de que o pH, no caso desta etapa do processo (enxágue), somente decresce, uma vez que não há inserção de nenhuma solução para controle do pH.

Diretamente relacionado com o PI_{VAC} , o PI_{CAG} (Equação 3.3) indica o custo da água consumida, considerando a tarifa de R\$ 8,75/m³ na condição industrial específica (estabelecida para possibilitar a análise) no município de São Paulo e na faixa de consumo de 11-20 m³/mês (SABESP, 2018).

$$PI_{CAG} = \frac{8,75 \times PI_{VAC}}{10} \quad (3.3)$$

Este indicador tem unidade de medida em R\$ para cada 100 enxágues dos ciclos de limpeza CIP efetuados (um ou mais enxágues podem ser efetuados por ciclo de limpeza CIP), visando considerar um valor de referência diário ou semanal de custo (dependendo da dimensão da unidade de produção) e possibilitar uma análise comparativa. As unidades não foram convertidas pois o indicador PI_{VAC} é apresentado em litros (L) e a tarifa de fornecimento de água em m³ - 1000 vezes menor - somente dividindo-se o valor do resultado por 10, considerando assim o indicador para 100 ciclos de limpeza.

Para o indicador PI_{EC} , o qual apresenta a Energia Elétrica Consumida, foi efetuado o cálculo simplificado – apresentado na Equação 3.4 - (estabelecido sem considerar a eficiência da bomba) do produto entre a potência (P) da bomba de circulação do fluido de processo e o tempo em horas (t) de atuação desta. A unidade de medida deste indicador é $W.h$.

$$PI_{EC} = P \times t \quad (3.4)$$

Agora, relacionado com o PI_{EC} , o PI_{CEN} (Equação 3.5) apresenta o custo da energia elétrica consumida, considerando a tarifa de R\$ 0,34899/kWh na condição industrial específica (estabelecida para possibilitar a análise) no município de São Paulo dentro do Subgrupo A4 - 2,3 a 25kV (AES ELETROPAULO, 2018).

$$PI_{CEN} = \frac{(0,34899 \times PI_{EC})}{10} \quad (3.5)$$

Este indicador tem unidade de medida em R\$ para cada 100 enxágues nos ciclos de limpeza CIP efetuados, visando também considerar um valor de referência diário ou semanal de custo (dependendo da dimensão da unidade de produção) e possibilitar uma análise comparativa. Mais uma vez não foi feita conversão de unidades pois o indicador PI_{EC} é apresentado em $W.h$ e a tarifa de fornecimento de energia elétrica em $kW.h$, somente dividindo-se o valor do resultado por 10, considerando assim o indicador para 100 ciclos de limpeza.

O indicador PI_{TDpH} , apresenta a taxa de decaimento do pH, e neste foi efetuado o cálculo da taxa de decaimento do pH no tempo, considerando o intervalo de valores de pH medidos nos ensaios experimentais realizados (Mínimo – pH = 7,9; Máximo – pH = 12,9).

Definiu-se o intervalo do valor de pH = 9,0 e pH = 10,5 para o cálculo da taxa de variação; estes valores foram estabelecidos uma vez que se observou em todas as simulações, uma variação – decaimento do pH – sensível e praticamente linear neste intervalo (detalhado nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, somente a título de observação nestas 3 condições - indicador válido para as demais).

Figura 3.8 – Detalhamento do intervalo de decaimento linear do pH (degrau na vazão 0 – 7.5 L.min⁻¹)

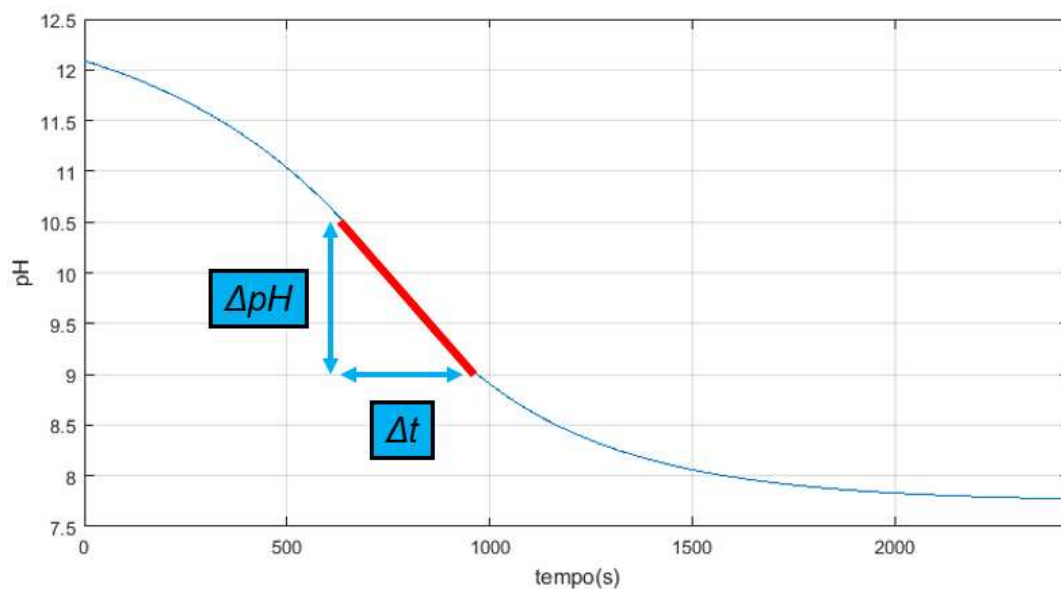


Figura 3.9 – Detalhamento do intervalo de decaimento linear do pH (degrau na vazão 0 – 12.0 L.min⁻¹)

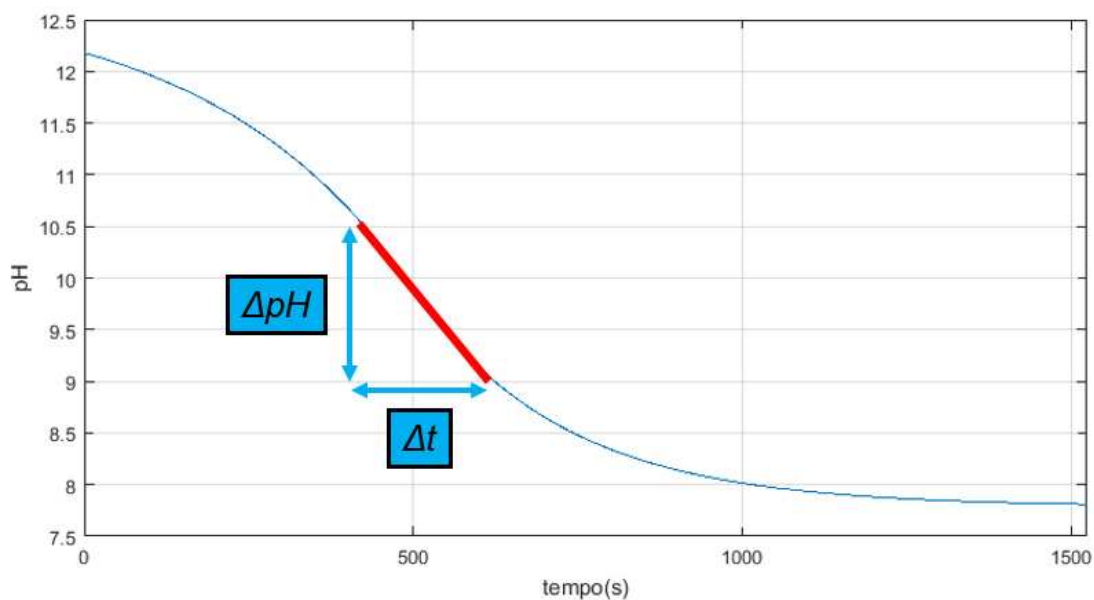
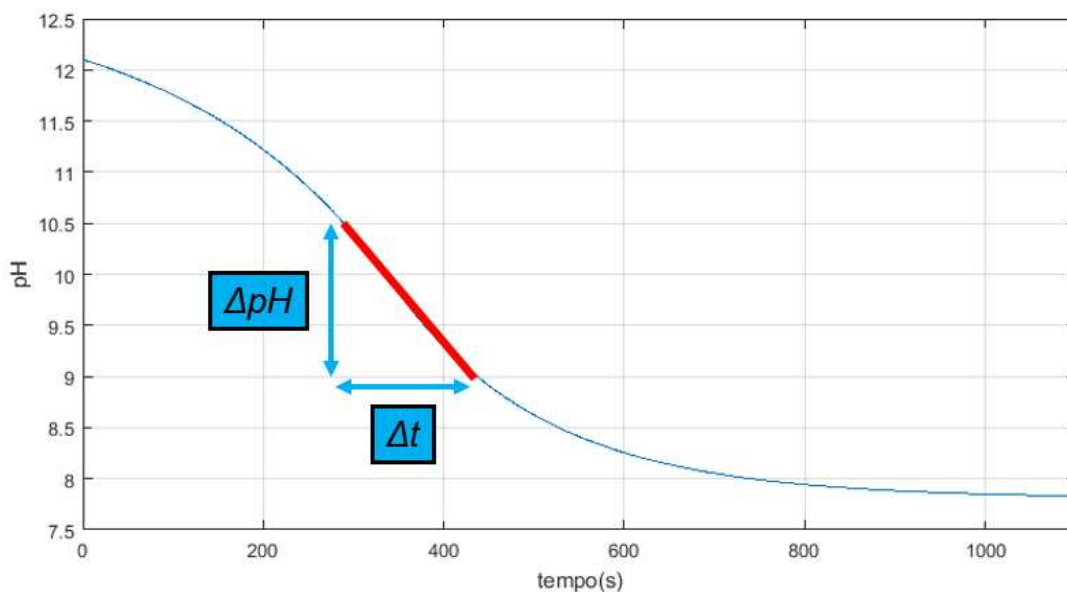


Figura 3.10 – Detalhamento do intervalo de decaimento linear do pH (degrau na vazão 0 – 16.0 L.min⁻¹)



Deste modo, foi calculada a taxa de decaimento através da razão entre a variação de pH (ΔpH) e a variação do tempo (Δt) – apresentado na Equação 3.6. Com o intuito de apresentar o valor do indicador dentro de um intervalo visando facilitar a análise deste, o resultado do cálculo foi multiplicado por 10^3 , o que equivale a considerar a unidade de tempo em ms (10^{-3} segundos). A unidade de medida deste indicador é em (pH/ms).

$$PI_{TDpH} = \frac{\Delta pH}{\Delta t} \times 10^3 \quad (3.6)$$

Por fim, o indicador chave de desempenho (KPI_{CE} – Custo do Enxágue) desenvolvido considerou a combinação dos custos dos indicadores de desempenho “Custo da água” - PI_{CAG} e “Custo da Energia Elétrica” - PI_{CEN}, sendo de interesse e base na determinação do custo da limpeza (na etapa de enxágue) e tomada de ações, considerando as influências do consumo de água e energia elétrica.

A equação 3.7 apresenta o cálculo do KPI_{CE} .

$$KPI_{CE} = PI_{CAG} + PI_{CEN} \quad (3.7)$$

3.2.4 Desenvolvimento do algoritmo de set-point variável da vazão de água de enxágue

Uma vez possibilitada a simulação das condições do processo, desenvolveu-se um algoritmo com o objetivo de permitir a variação da vazão de água de enxágue durante a simulação do processo de limpeza e verificar se há redução do consumo de água e/ou energia com esta variação.

No trabalho foi definido como *set-point* local (LSP – *Local Set-point*) aquele estabelecido pelo operador de acordo com as condições de operação de cada planta, ou simplesmente o *set-point* fixo; foi também definido como *Set-point* variável (WSP – *Working Set-point*) o *set-point* que variará com base nas condições de processo – influências - que serão detalhadas na sequência.

Para a variação da vazão foram considerados dois fatores, a saber:

i) Influência do volume de água consumida (I_{VAC}): fator da influência do volume de água consumida, o qual é somado ao *set-point* local de vazão definido pelo operador, buscando atingir o valor mínimo de volume de água consumida.

Este fator foi calculado a partir da diferença entre o volume de água consumida (V_{LSP}), determinado de acordo com o valor do *set-point* de vazão local fixo (LSP), e o volume V_{WSP} , calculado pelo algoritmo a partir da integral da resposta do controlador de vazão no tempo, considerando a vazão variável (WSP) corrigida durante a simulação.

Na equação 3.6 é detalhado o cálculo efetuado para a influência desta variável no *set-point* de vazão.

$$I_{VAC} = (V_{LSP} - V_{WSP}) / V_{LSP} \quad (3.6)$$

ii) Influência do decaimento do pH (I_{DpH}): fator da influência do decaimento do pH, o qual é somado ao *set-point* local de vazão definido pelo operador, buscando também atingir o valor mínimo de volume de água consumida.

Com base no modelo ANFIS que representa a resposta do pH para a variação na vazão, foi calculada a diferença (equação 3.7) entre o decaimento do pH (DpH_{LSP}) para o *set-point* de vazão local fixo (LSP) e o decaimento do pH (DpH_{WSP}) para o *set-point* de vazão corrigida, considerando a vazão variável (WSP) corrigida durante a simulação pelo algoritmo.

$$I_{DpH} = (DpH_{LSP} - DpH_{WSP}) \quad (3.7)$$

Para o cálculo do *set-point* variável (WSP), observou-se nas simulações iniciais (simplesmente somando-se os fatores) que quanto maior o valor de vazão (LSP) definida, menor a influência dos fatores no cálculo do *set-point*; logo, para que a influência destes fatores no cálculo do WSP tenha o mesmo peso independentemente do valor definido para a vazão (dentro do intervalo em estudo), os fatores foram normalizados a partir da razão entre o *set-point* local (LSP) e o valor máximo – 16 L. min⁻¹ – $\frac{LSP}{16}$. Desta forma, quando é definida a vazão no valor máximo, a soma dos fatores é multiplicada pela unidade e quando a vazão de trabalho for inferior a este valor – onde a influência dos fatores tenderia a ser maior – a soma dos fatores é multiplicada por um valor menor que a unidade ($\frac{LSP}{16}$), compensando assim a característica mencionada, e mantendo a influência dos fatores suficientemente linear para qualquer valor de vazão utilizada no intervalo de simulação estudado.

Por fim, este resultado normalizado foi somado a LSP, sendo este o valor de referência em torno do qual haverá uma variação dependendo dos fatores (I_{VAC} e I_{DpH}), determinando o *set-point* variável de vazão (WSP) representado pela equação 3.8.

$$WSP = LSP + \left[\frac{LSP}{16} \times (I_{VAC} + I_{DpH}) \right] \quad (3.8)$$

Definidos todos os elementos, foi utilizado o ambiente de simulação *Simulink*® para o desenvolvimento e a implementação do sistema para simulação da implementação dos indicadores de desempenho - o Sistema de Gerenciamento de

Custo do Consumo do Processo CIP (SISGECIP).

Todos os subsistemas desenvolvidos serão detalhados no capítulo 4, onde são ilustrados os resultados e apresentadas as discussões dos mesmos.

3.2.5 Desenvolvimento da interface gráfica de usuário (GUI)

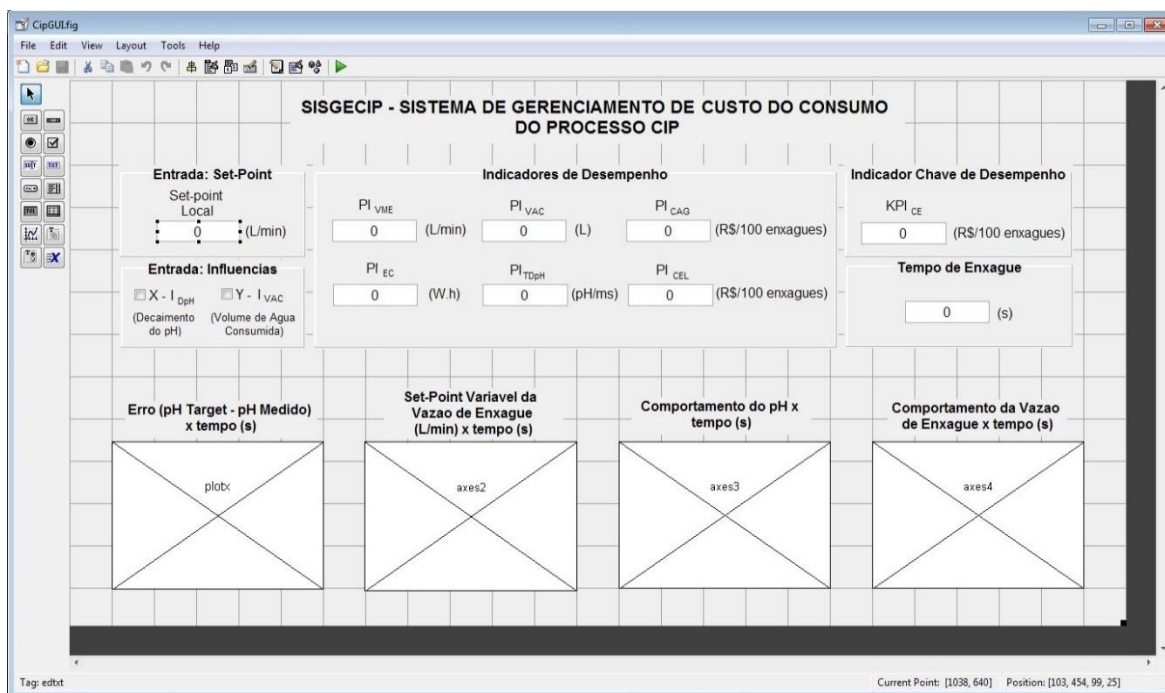
Possibilitada a simulação do processo e dos indicadores de desempenho por meio do SISGECIP, foi desenvolvida uma interface gráfica de usuário (GUI – *Graphical User Interface*) nomeada “CipGUI.fig”, como proposta de uma interface mais amigável ao usuário.

Foram utilizadas como base e ponto de partida para o desenvolvimento do programa as funções “inpgui_sf.m” e “opgui_sf.m”, disponibilizadas no site da *Mathworks* por Nitin Skandan (MATHWORKS, 2019).

Nesta interface desenvolvida (Figura D1 – Apêndice D – Interface gráfica de usuário - CipGUI), foram inseridas caixas para leitura de texto das entradas - *set-point* Local e influências (I_{VAC} e I_{DpH}) – e das saídas – Indicadores e Indicadores Chave de Desempenho e Tempo de enxágue – além dos gráficos (Erro do pH, *Set-Point* da Vazão de Enxágue, Comportamento do pH e Comportamento da Vazão de Enxágue) atualizados a cada 1 segundo.

O desenvolvimento da interface gráfica foi iniciado pelo comando “*guide*” do *software* Matlab®, e a partir deste, inseriu-se as caixas de escrita e leitura das variáveis mencionadas – Figura 3.11. Quando o CipGUI (arquivo “.fig”) foi criado, automaticamente foi criado um arquivo “*M-file*” (de mesmo nome e extensão “.m”, no caso “CipGUI.m”) com a programação e as funções básicas para que a execução deste. A cada campo incluído no arquivo “.fig”, automaticamente foram incluídas “*Callback functions*” no código, que são funções “chamadas” durante a execução do CipGUI.

Figura 3.11 – Interface de desenvolvimento do CipGUI



Por fim, para a execução automática do CipGUI a partir da execução do sistema desenvolvido no Simulink, foi inserido um bloco “*S-function*” no modelo-Simulink do SISGECIP. Neste bloco foram conectadas como entradas o *set-point* variável de vazão, a base de tempo (utilizada para plotar as variáveis em função do tempo), o erro (pH target – pH medido), o comportamento do pH, o comportamento da vazão de enxágue, os PI’s e o KPI e como saídas o Local *Set-point* e as influências da vazão de água consumida e do decaimento do pH.

A partir disto, foi desenvolvida e inserida uma função do tipo *S-function* (nomeada “cipgui_sf.m”) a qual “chama” a função “CipGUI.m” assim que o modelo-Simulink do SISGECIP é executado, apresentando as informações das saídas com base nas entradas definidas pelo usuário.

Na programação definiu-se as quantidades de entradas e saídas, além das adequações de valores mínimos e máximos dos eixos das variáveis plotadas, e os tipos de variáveis apresentadas nas caixas de texto, todos provenientes da simulação do modelo-Simulink.

Desta forma, ao pressionar o comando “*Run*” do modelo-Simulink SISGECIP, automaticamente a “*S-function*” irá “chamar” a função CipGUI.m e abrir a janela da interface “CipGUI” desenvolvida. É apresentada a função principal “CipGUI.m” no Apêndice E – Função principal para o desenvolvimento da Interface gráfica de usuário (GUI).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 *Modelagem do comportamento da resposta do pH na etapa de enxágue*

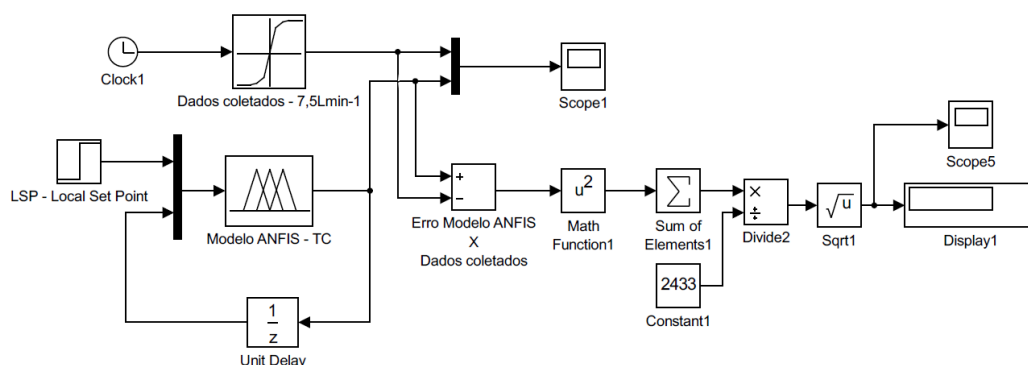
A partir dos dados experimentais do processo CIP obtidos de acordo com a metodologia apresentada, foi novamente modelado o comportamento temporal dos valores de pH correspondentes às concentrações de NaOH presentes na água de enxágue efluente da saída do trocador de calor estudado.

Para que não se confunda o modelo obtido utilizando a estrutura ANFIS ou modelo matemático com o nome do ambiente de simulação Simulink® (também comumente chamado “modelo”) foi definido/padronizado e todo modelo desenvolvido será mencionado como “modelo-Simulink” quando apresentado no trabalho.

Para validar o modelo, foi desenvolvido um modelo-Simulink que possibilitou incluir um bloco com a estrutura ANFIS desenvolvida e compará-lo à resposta do pH para um degrau na vazão em todas as condições de teste e, em especial, os degraus de 0 L.min^{-1} para $6,0 \text{ L.min}^{-1}$ e 0 L.min^{-1} para $7,5 \text{ L.min}^{-1}$, não utilizados para a modelagem.

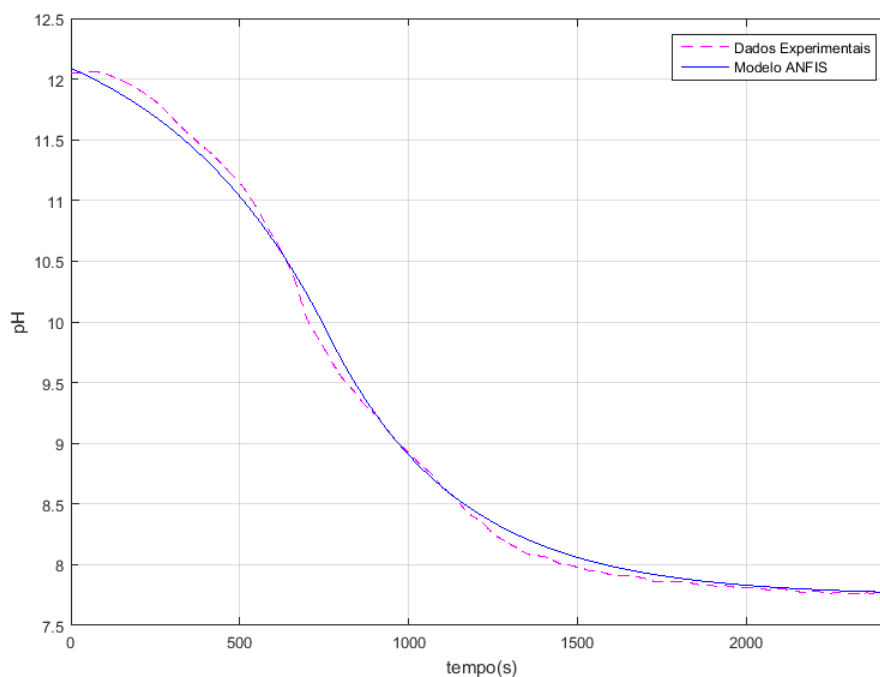
Na Figura 4.1 é apresentado o modelo-Simulink, onde se pode observar a estrutura ANFIS com duas entradas (o pH atrasado em uma amostragem - $\text{pH}[k-1]$ - e a vazão atual - $F[k]$) e uma saída (pH na amostragem atual - $\text{pH}[k]$), e a comparação com os dados experimentais inseridos em uma *Lookup Table* por meio de um vetor, ambos apresentados em um gráfico temporal comparativo; além do cálculo do erro entre o sistema ANFIS e os dados experimentais e o erro médio quadrático.

Figura 4.1 – Modelo-Simulink para comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS



Assim, foram realizadas as simulações para validação do modelo ANFIS, sendo apresentadas as respostas temporais do modelo desenvolvido utilizando o sistema ANFIS e os dados experimentais de resposta ao degrau de 0 para 7,5 L.min⁻¹ na Figura 4.2.

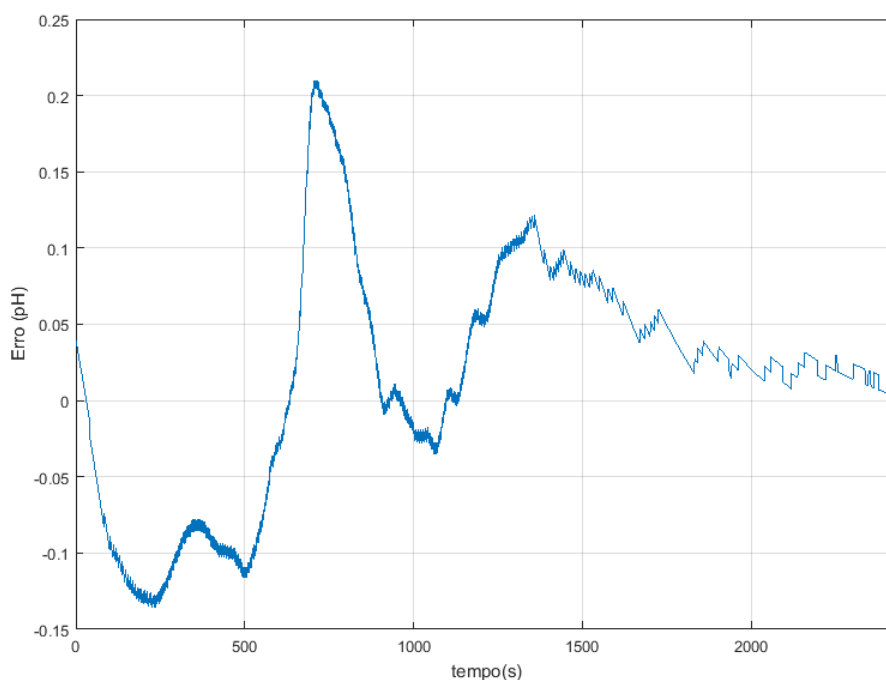
Figura 4.2 – Resposta temporal do pH para degrau de 7,5 L.min⁻¹ na vazão - Comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS



O erro calculado entre os dados experimentais e o sistema ANFIS é apresentado na Figura 4.3. O erro quadrático médio obtido na simulação foi de $1,15 \times 10^{-3}$ (valor

próximo ao erro médio quadrático de treinamento – $1,10 \times 10^{-3}$ - do sistema ANFIS).

Figura 4.3 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de $7,5 \text{ L.min}^{-1}$



As respostas temporais – a título de observação - do modelo desenvolvido utilizando o sistema ANFIS e os dados experimentais de resposta ao degrau na vazão de água de enxágue de 0 para $4,0 \text{ L.min}^{-1}$, $6,0 \text{ L.min}^{-1}$, $9,0 \text{ L.min}^{-1}$, $10,5 \text{ L.min}^{-1}$, $12,0 \text{ L.min}^{-1}$ e $16,0 \text{ L.min}^{-1}$ são apresentadas no “*Apêndice A - Respostas temporais de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido*” – Figuras A.1 a A.12 (são apresentados também os dados utilizados para o treinamento do sistema ANFIS, a título de verificação e comparação entre o modelo e os dados experimentais).

Os valores calculados dos erros médios quadráticos para os dados experimentais citados são apresentados na tabela 4.1. Observa-se que os erros médios quadráticos são menores do que a tolerância para o erro estabelecido para o treinamento da estrutura ANFIS (1×10^{-2}), reforçando e comprovando que o modelo no simulador representa adequadamente a resposta do processo.

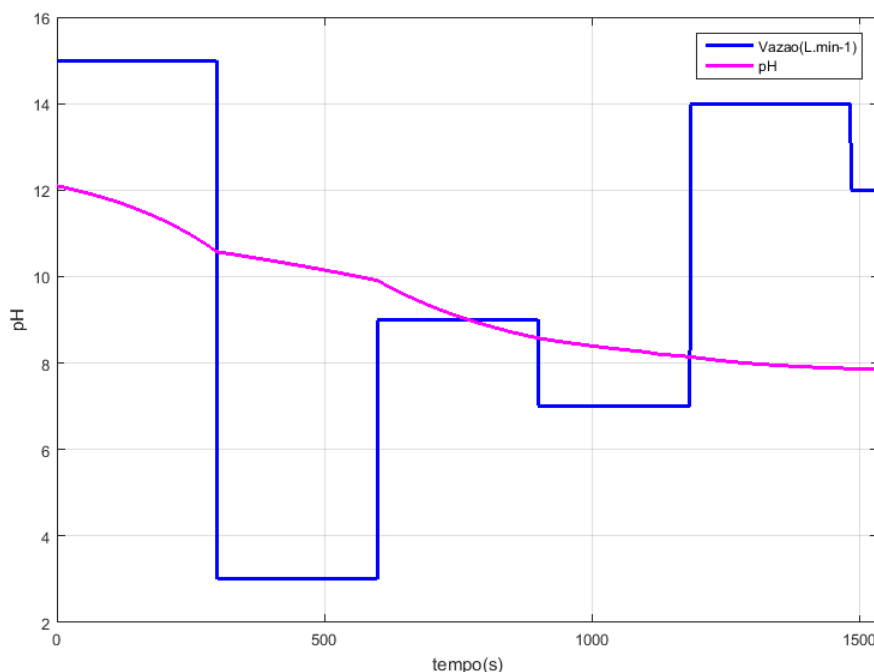
Tabela 4.1 – Erros médios quadráticos entre os dados experimentais e o modelo ANFIS

Degrau na Vazão (L.min ⁻¹)	Erro Médio Quadrático
0 - 4	$9,38 \times 10^{-4}$
0 - 6	$1,27 \times 10^{-3}$
0 - 7,5	$1,15 \times 10^{-3}$
0 - 9	$7,29 \times 10^{-4}$
0 - 10,5	$4,345 \times 10^{-5}$
0 - 12	$1,01 \times 10^{-3}$
0 - 16	$2,22 \times 10^{-5}$

A partir da validação do modelo obtido dentro das condições que serão utilizadas neste estudo, o passo seguinte foi simular a resposta do modelo para variações aleatórias da vazão de água de enxágue com o objetivo de verificar a funcionalidade do modelo validado, ou seja, se a resposta (pH) variava para alterações na vazão de água de enxágue durante a simulação (até o passo anterior, cada simulação foi executada com a vazão de enxágue fixa).

O gráfico temporal da resposta do pH é apresentado na Figura 4.4, onde é possível observar que há variação coerente da resposta (pH) durante a simulação; ou seja, ao aumentar-se a vazão de enxágue obtém-se uma taxa de decaimento do pH com o tempo maior; e ao diminuir-se a vazão de enxágue obtém-se uma taxa de decaimento do pH com o tempo menor.

Figura 4.4 – Simulação da resposta temporal do modelo ANFIS validado para variações aleatórias da vazão de água de enxágue



Analisando-se mais detalhadamente, no tempo aproximado de 350 s, ao variar-se a vazão de 15,5 L.min⁻¹ para 1 L.min⁻¹ a taxa de decaimento do pH com o tempo diminui, ao passo que com o aumento novamente da vazão para 9 L.min⁻¹ (no tempo aproximado de 600 s) a taxa de decaimento do pH com o tempo aumenta novamente.

Ao reduzir-se para 7 L.min⁻¹ (tempo de aproximadamente 900 s), observa-se a resposta praticamente inalterada pois, a variação é pequena (de 9 L.min⁻¹ para 7 L.min⁻¹), dificultando a visualização da influência desta variação na resposta. E, por fim, é possível observar na variação da vazão para 14 L.min⁻¹, no tempo de aproximadamente 1200 s, a taxa de decaimento aumentar, muito embora seja um aumento ainda de baixa magnitude, uma vez que a simulação estava no final do processo de limpeza.

Na sequência foi somada uma perturbação aleatória (estabelecida com média 0,25, variância de 0,1 e taxa de amostragem de 5 s) ao sinal de entrada do modelo que simula a resposta do controlador de vazão com o objetivo de simular ruídos na vazão de enxágue, visando aproximar a simulação dos dados experimentais. Porém,

uma vez que esta variação é em torno do valor de vazão, a mesma não representará influência nos indicadores.

O modelo-Simulink implementado e a resposta do controlador de vazão, isto considerando a função de transferência de primeira ordem que simula a resposta da bomba, são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Este resultado traz uma contribuição positiva com relação à escassez observada de publicações na área, especialmente de poucos modelos matemáticos que representem adequadamente esta etapa do processo de limpeza, conforme citam Davey et al. (2013).

Figura 4.5 – Modelo-Simulink implementado do controle de vazão da água de enxágue do trocador de calor (com perturbação aleatória na medição da vazão)

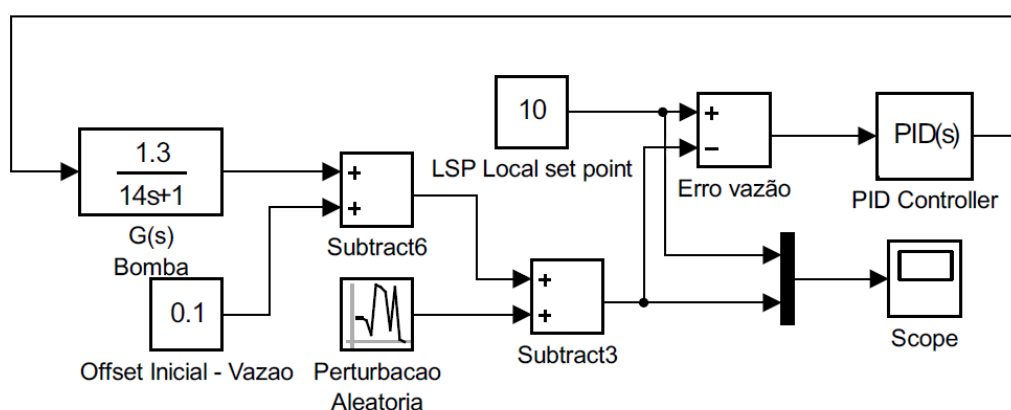
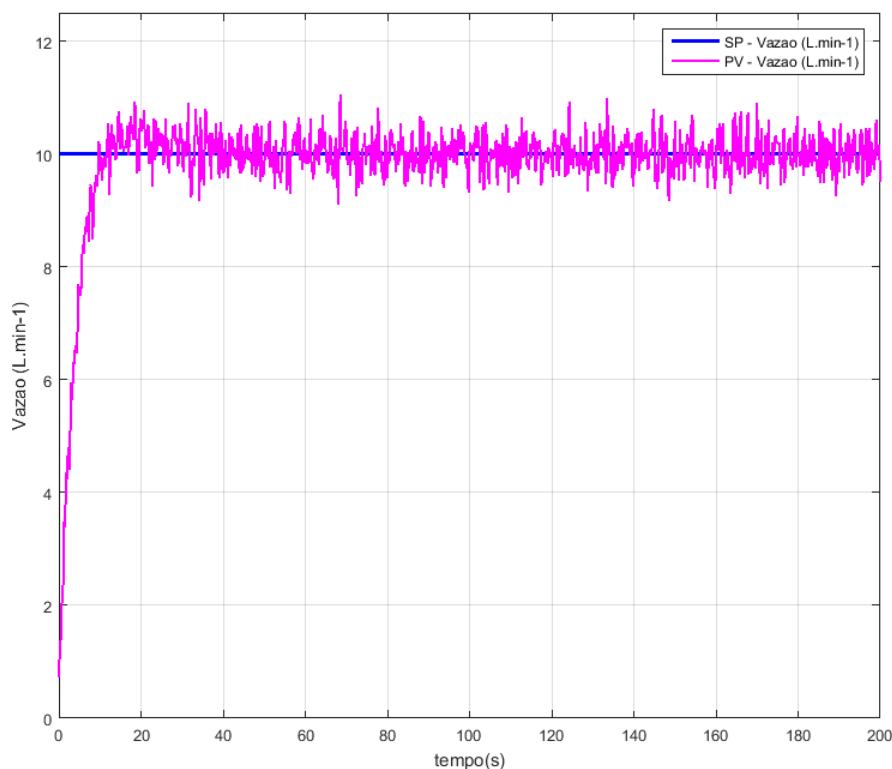


Figura 4.6 – Resposta temporal do controlador de vazão da água de enxágue do trocador de calor (com perturbação aleatória)



4.2 Simulação do erro do volume de água consumida

A partir da integral da vazão de água de enxágue no intervalo de tempo para o pH atingir o regime permanente (no caso, foi considerado o pH = 7,9 como critério de parada), foram obtidos os volumes de água consumida (V_{LSP}) para cada uma das vazões de água de enxágue aplicadas nos ensaios experimentais realizados no trocador de calor.

O objetivo deste modelo-Simulink foi possibilitar a comparação entre o volume de água definido como alvo (V_{LSP}), que na prática seria definido pelo operador do processo e foi inserido através de uma *lookup table*, e o volume de água consumida durante a execução da simulação. Este é o valor que busca-se minimizar e é calculado durante a simulação a partir da integral da vazão no tempo - em segundos. Vale ressaltar que a *lookup table* é uma matriz de inserção sequencial de dados, e faz a

interpolação dos valores intermediários não inseridos na tabela.

Estes dois volumes foram então subtraídos, simulando o comportamento temporal do erro do volume de água consumida (erro entre a condição de vazão definida pelo operador e a condição de vazão recalculada e variável durante a simulação), que foi utilizado como um dos parâmetros do algoritmo de *set-point* variável da vazão de água de enxágue.

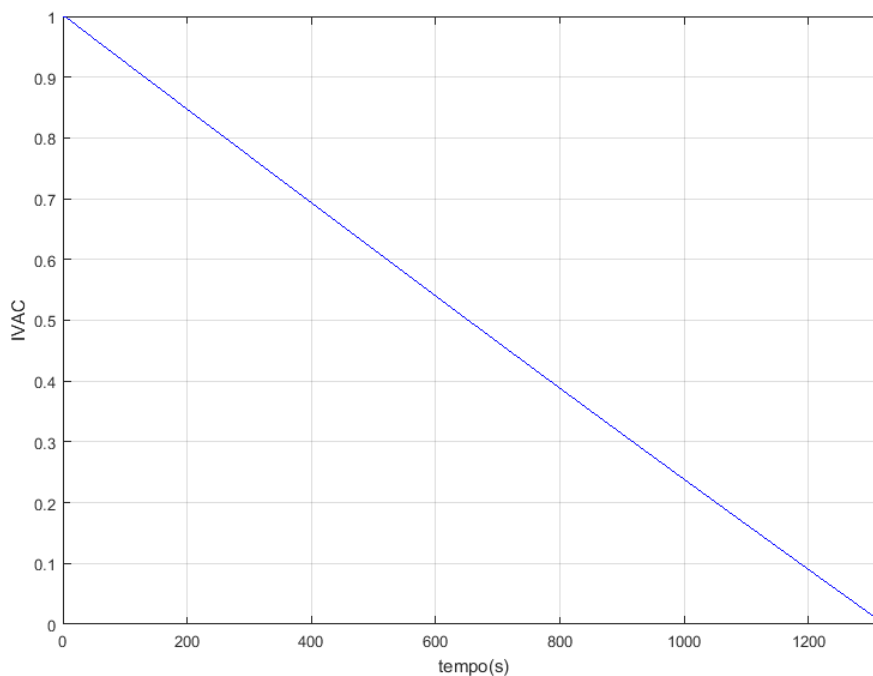
4.3 Implementação do algoritmo de definição de set-point da vazão de água de enxágue

Os fatores de influência do volume de água consumida (I_{VAC}) e de influência do decaimento do pH (I_{DPH}) foram implementados com o intuito de possibilitar a simulação da variação do *set-point* de vazão de água de enxágue durante a simulação. Foi estabelecido o *set-point* local de vazão em 10 L.min⁻¹ para as simulações apresentadas na sequência.

4.3.1 Influência do volume de água consumida (I_{VAC})

No início da simulação do processo de limpeza, o erro do volume de água consumida ($V_{LSP} - V_{WSP}$) é máximo, pois V_{LSP} tem um valor fixo (obtido através da *lookup table* – detalhada no item 4.2) e V_{WSP} é nulo, uma vez que não houve consumo de água – início do processo de limpeza. O comportamento da simulação do erro para o *set-point* da vazão em 10 L.min⁻¹ é apresentado na Figura 4.7, onde é possível observar o erro ($V_{LSP} - V_{WSP}$) inicialmente com valor igual ao do volume obtido pela *lookup table* e diminuindo durante a simulação.

Figura 4.7 – Resposta temporal do erro do volume ($V_{LSP} - V_{WSP}$)



Para a implementação do modelo-Simulink que calcula a influência do volume de água consumida (Figura 4.8), dividiu-se o erro do volume ($V_{LSP} - V_{WSP}$) pelo volume para o *set-point* de vazão local fixo (V_{LSP}), tendo um valor de I_{VAC} igual a unidade no início do processo, e reduzindo durante o processo de limpeza (comportamento obtido durante a simulação para o *set-point* local da vazão em 10 L.min^{-1} apresentado na Figura 4.9).

Figura 4.8 – Modelo-Simulink para simulação da influência do volume de água consumida

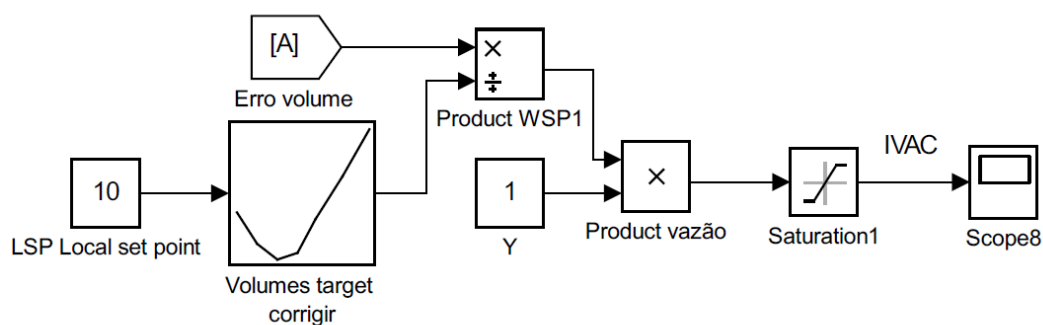
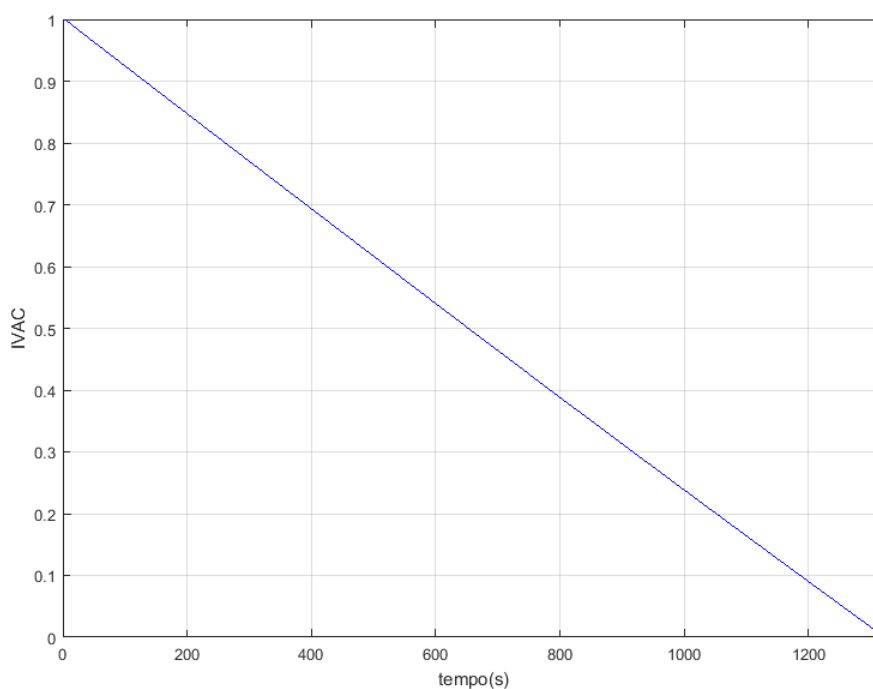


Figura 4.9 – Resposta temporal da influência de água consumida (IVAC)



A proposta foi de, no início do processo (quando o erro é máximo), este fator apresentar um peso maior para buscar-se aumentar o *set-point* de vazão para uma limpeza mais rápida e diminuir esta vazão à medida que o pH – processo de limpeza – fosse tendendo ao valor de regime permanente.

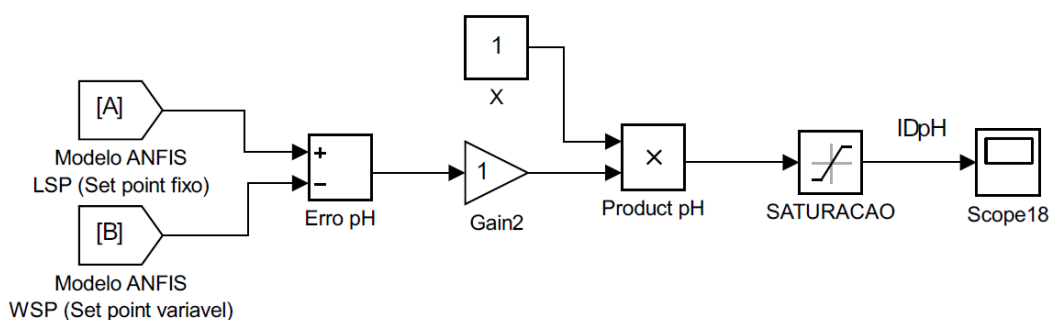
Além disto, foi efetuado o produto do resultado por um fator condicional que

possibilita ao modelo-Simulink definir as condições: “0” (desconsiderar a influência do volume de água consumida) e “1” (considerar a influência do volume de água consumida).

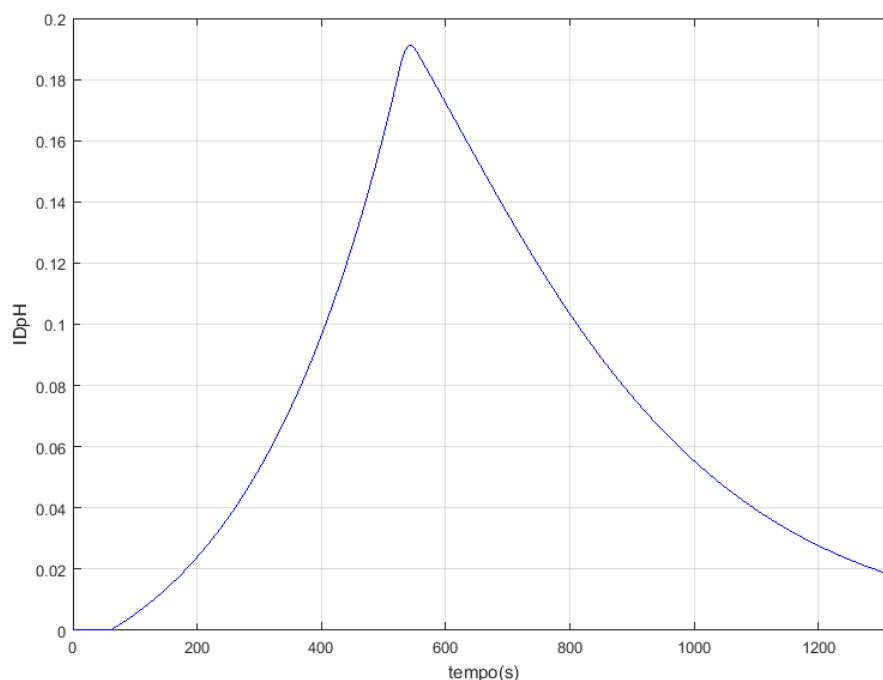
4.3.2 Influência do decaimento do pH (I_{DpH})

Para a implementação do modelo-Simulink que calcula a influência do decaimento do pH (Figura 4.10) foi utilizado o modelo ANFIS obtido que representa a resposta do pH para a variação na vazão, calculando-se a diferença – erro - entre o decaimento do pH (DpH_{LSP}) para o *set-point* de vazão local fixo (LSP) e o decaimento do pH (DpH_{WSP}) para o *set-point* de vazão corrigida - considerando a vazão variável (WSP) corrigida durante a simulação.

Figura 4.10 – Modelo-Simulink para simulação da influência do decaimento do pH

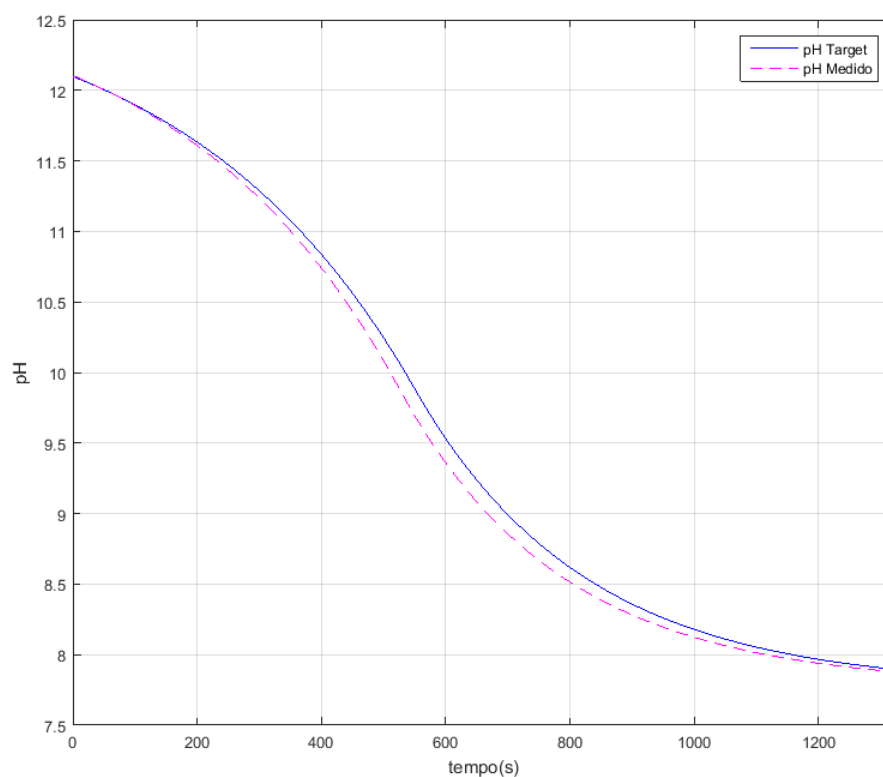


O comportamento obtido na simulação para o *set-point* local da vazão em 10 L.min⁻¹ é apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Resposta temporal da influência do decaimento do pH (I_{DpH})

Este comportamento se deve ao fato de, no início da simulação do processo de limpeza, a variação no *set-point* de vazão influenciado pelos fatores ainda não apresentar impacto na limpeza, ou seja, a resposta do pH para o *set-point* fixo e variável são praticamente iguais. A comparação entre o comportamento de resposta do pH para o *set-point* fixo - pH Target - e para o *set-point* variável - pH Medido – pode ser observada na Figura 4.12.

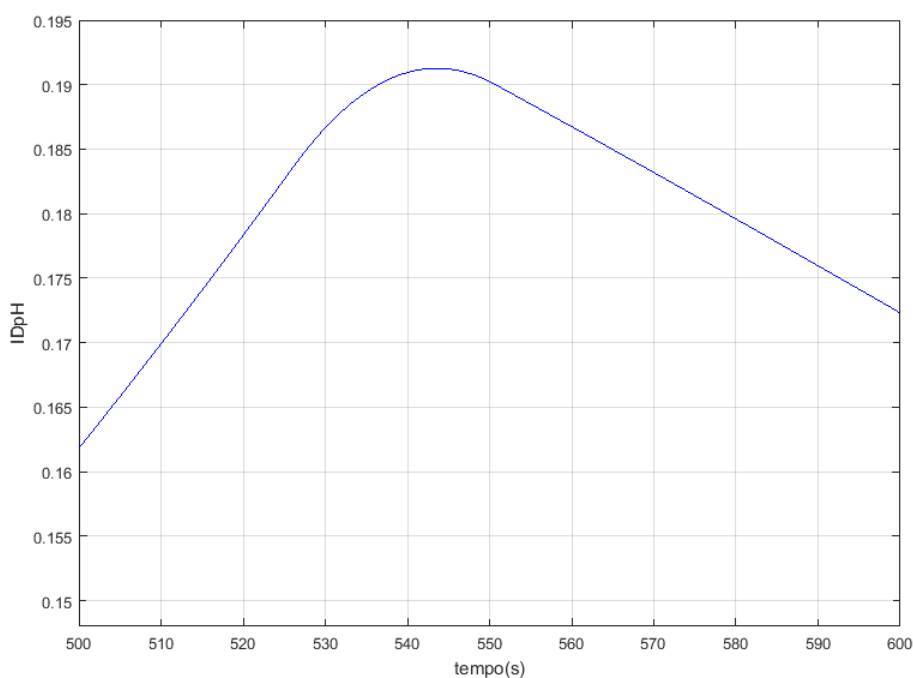
Figura 4.12 – Gráfico do comportamento temporal de resposta do pH para o set-point fixo (pH Target) e para o set-point variável (pH Medido)



À medida que o processo de limpeza ocorre, e os fatores influenciam no cálculo do *set-point* variável (WSP), o pH tende a decair mais rapidamente comparativamente ao pH considerando o *set-point* fixo em 10 L.min^{-1} , sendo o pico máximo dessa diferença atingido no tempo aproximado de 545 segundos, e tendendo a diminuir na sequência, uma vez que a simulação do processo tende a atingir o regime permanente.

Na figura 4.13 é apresentada uma ampliação da curva entre os tempos 500 e 600 segundos, com o objetivo de facilitar a visualização da região (instante de aproximadamente 545 segundos) onde ocorre o pico máximo do fator I_{DpH} .

Figura 4.13 – Resposta temporal da influência do decaimento do pH (I_{DpH})



Além disto, foi efetuado também o produto do resultado por um fator condicional que possibilita ao modelo-Simulink definir as condições “0” (desconsiderar a influência do decaimento do pH) e “1” (considerar a influência do decaimento do pH).

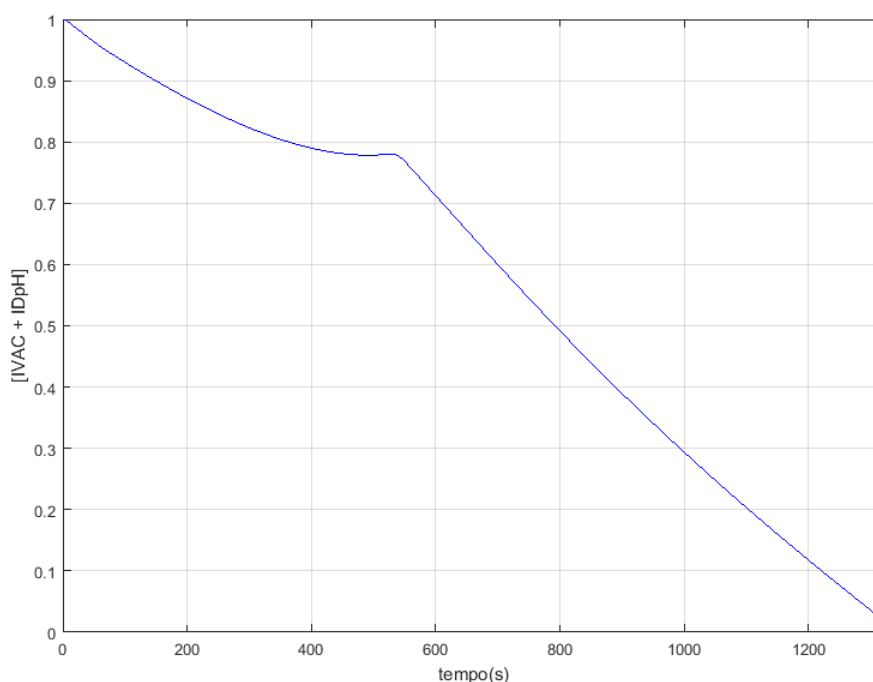
4.3.3 Variação do set-point da vazão de água de enxágue com base nos fatores I_{VAC} e I_{DpH}

Calculados os dois fatores (I_{VAC} e I_{DpH}), estes foram somados e normalizados com o objetivo de considerar as duas influências definidas. Este resultado da simulação (novamente para o *set-point* local da vazão em 10 L.min^{-1}) pode ser visualizado na Figura 4.14.

Nota-se que, inicialmente, somente o fator I_{VAC} apresenta influência (valor igual a unidade) e, à medida que o decaimento do pH vai se acentuando, influenciado pela

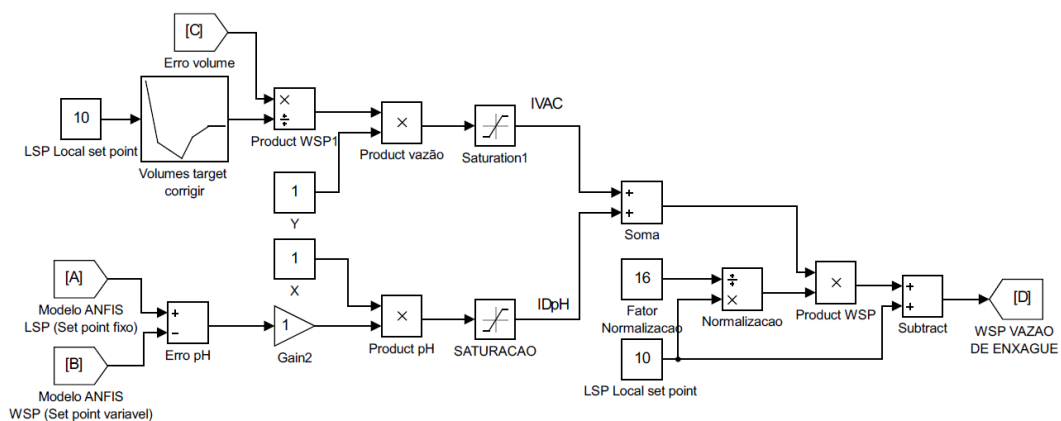
variação – aumento – do *set-point* (com pico já citado no tempo aproximado de 545 segundos), o fator I_{DpH} influencia também no cálculo do WSP. Ou seja, observa-se o comportamento esperado com a soma dos dois fatores.

Figura 4.14 – Resposta temporal da influência do volume de água consumida e do decaimento do pH (I_{VAC} e I_{DpH})



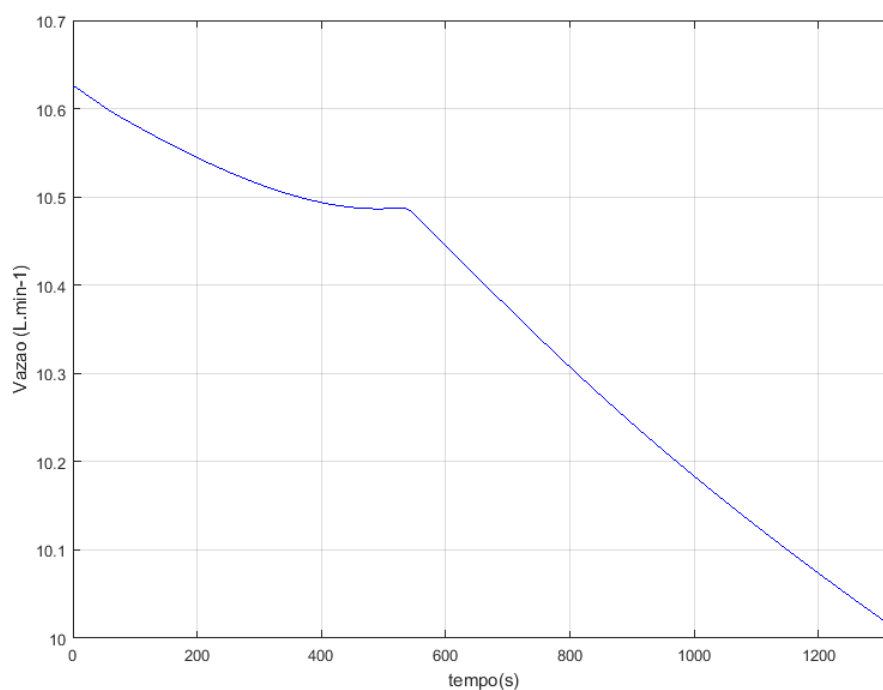
Após a definição e simulações considerando as influências do volume de água consumida (I_{VAC}) e do decaimento do pH (I_{DpH}), o modelo-Simulink que simula o *set-point* variável da vazão de água de enxágue apresentado na Figura 4.15, soma as duas influências, multiplica este resultado pelo fator de normalização e, por fim, soma este resultado ao *set point* definido pelo operador (LSP – Local Set Point).

Figura 4.15 – Modelo-Simulink que simula o set-point variável da vazão de água de enxágue



A Figura 4.16 ilustra a simulação da resposta temporal do *set-point* variável - WSP (set-point local da vazão em 10 L.min⁻¹).

Figura 4.16 – Resposta temporal do WSP para a vazão em 10 L.min⁻¹



No resultado da simulação da Figura 4.16, observa-se inicialmente a soma das influências citadas ($I_{VAC} + I_{DpH} = 1$) multiplicada pelo fator de normalização ($\frac{10}{16}$) resultando em 0,625; este valor, somado ao valor do *set-point* local $10L.min^{-1}$, resulta no valor inicial 10,625, que diminui seguindo o comportamento já detalhado.

Caso os fatores - as influências do volume de água consumida e do decaimento do pH - sejam considerados (condições definidas em “1”), o *set point* enviado para o controlador irá variar de acordo com os fatores, caso contrário (condições definidas em “0”), será enviado o *set point* definido pelo operador (LSP – Local Set Point).

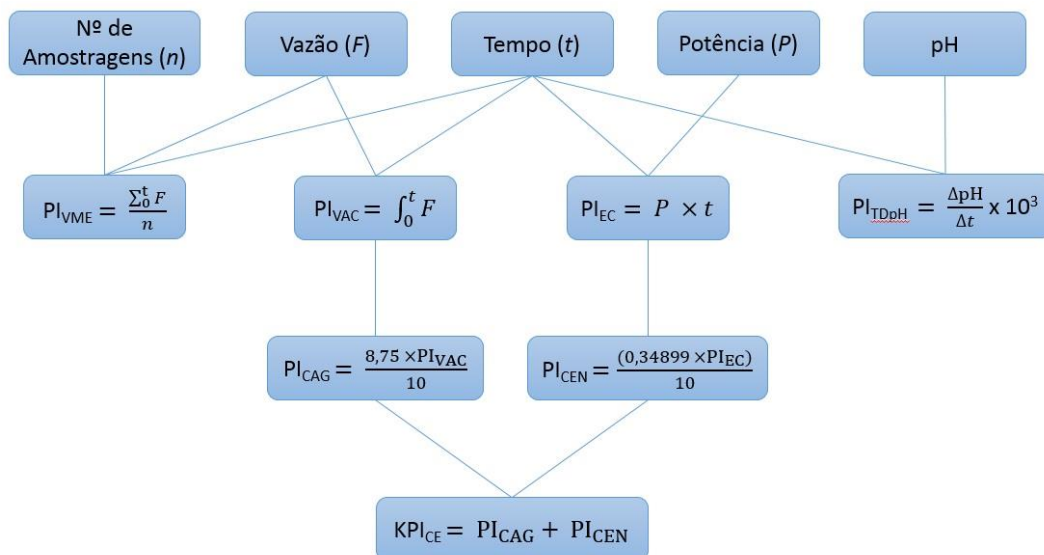
4.4 Implementação e simulação dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho

A partir da definição e simulação do processo (considerando a maior parte das condições deste) e dos resultados obtidos, foi possível o desenvolvimento dos indicadores de desempenho, estes diretamente relacionados com os objetivos do trabalho, e que serão detalhados na sequência.

Foram desenvolvidos modelos-Simulink dos indicadores de desempenho PI Vazão Média de Enxágue - PI_{VME} , PI Volume de Água Consumida - PI_{VAC} , PI Custo da Água - PI_{CAG} , PI Energia Elétrica Consumida – PI_{EC} , PI Custo da Energia Elétrica - PI_{CEN} e do PI Taxa de decaimento do pH - PI_{TDpH} e do indicador chave de desempenho Custo do Enxágue - KPI_{CE} .

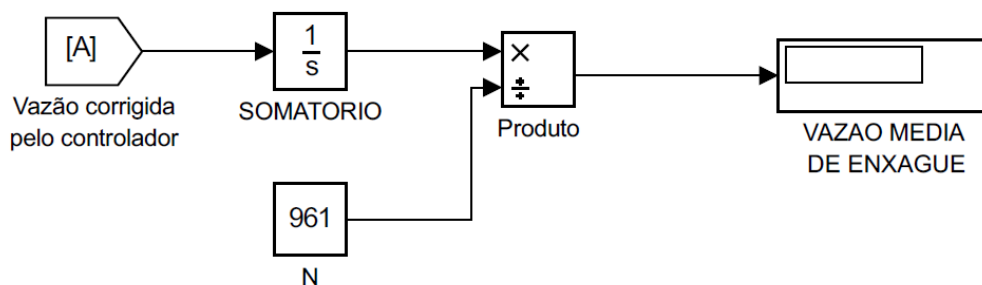
A Figura 4.17 apresenta um Mapa Conceitual, com o objetivo de facilitar a visualização das correlações existentes entre as variáveis de processo, os indicadores de desempenho (PIs) e o indicador chave de desempenho (KPI).

Figura 4.17 – Mapa Conceitual – PIs e KPI



4.4.1 PI Vazão Média de Enxágue (PI_{VME})

O indicador de desempenho PI_{VME} apresenta a magnitude da vazão média da água de enxágue dentro do tempo de simulação. O modelo-Simulink desenvolvido é apresentado na Figura 4.18.

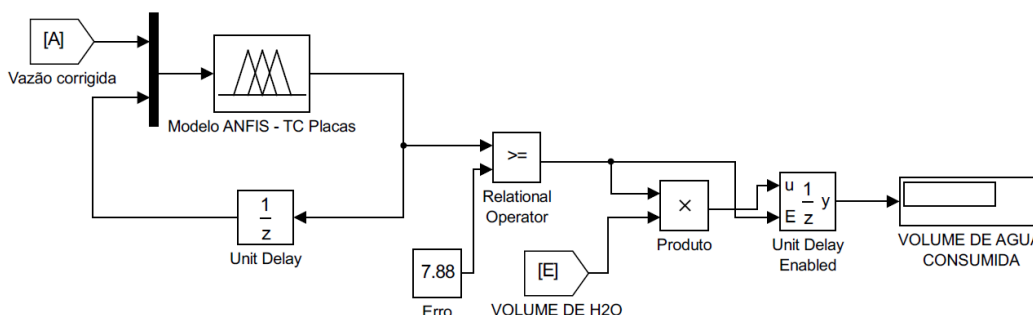
Figura 4.18 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{VME}

4.4.2 PI Volume de Água Consumida (PI_{VAC}) e PI Custo da Água (PI_{CAG})

O modelo-Simulink desenvolvido (Figura 4.19) compara a simulação da resposta do pH do modelo com o valor do pH considerado em regime estacionário (7,9) por meio de um operador relacional. A saída deste operador apresenta nível lógico “1” enquanto a simulação da resposta do pH não atinge o valor em regime estacionário, e muda para nível lógico “0” assim que o valor em regime estacionário é atingido.

O resultado deste operador lógico é multiplicado pelo volume de água consumida durante o processo de limpeza apresentando, assim, o valor acumulado do volume de água consumida. Ao ser atingida a condição de pH em regime estacionário, o resultado do produto é nulo (operador relacional apresenta nível lógico “0”), não sendo somado mais nada ao valor anterior, mantendo-se indicado o valor do volume de água consumida.

Figura 4.19 – Modelo-Simulink para o cálculo do valor do PI_{VAC}



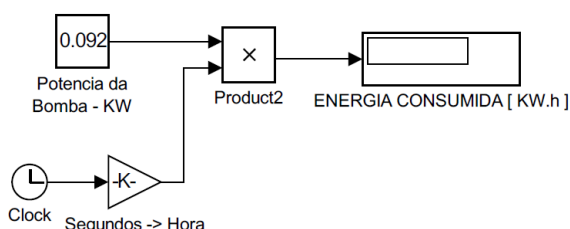
Para o indicador PI_{CAG} , diretamente relacionado ao indicador PI_{VAC} , simplesmente foi efetuado o produto do indicador PI_{VAC} com o custo (R\$ 8,75) e o resultado dividido por 10, não sendo apresentado detalhamento do modelo-Simulink.

4.4.3 PI Energia Elétrica Consumida (PI_{EC}) e PI Custo da Energia Elétrica (PI_{CEN})

O modelo-Simulink desenvolvido (Figura 4.20) apresenta a magnitude da energia elétrica consumida através do indicador de desempenho PI_{EC} .

Foi utilizado o valor de potência da bomba fornecido pelo fabricante em uma condição ideal ($0,125 \text{ CV} = 92 \text{ W}$ – desconsiderando que a potência poderia variar com a variação de carga e/ou vazão) multiplicado pelo tempo em horas em que esta estaria em condição de operação (durante o tempo de simulação), obtendo-se a energia elétrica consumida em W.h. O fator multiplicativo K apresentado na Figura 4.20, divide o tempo da saída do bloco “Clock” – em segundos – por 60, convertendo o valor para “horas”.

Figura 4.20 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{EC}



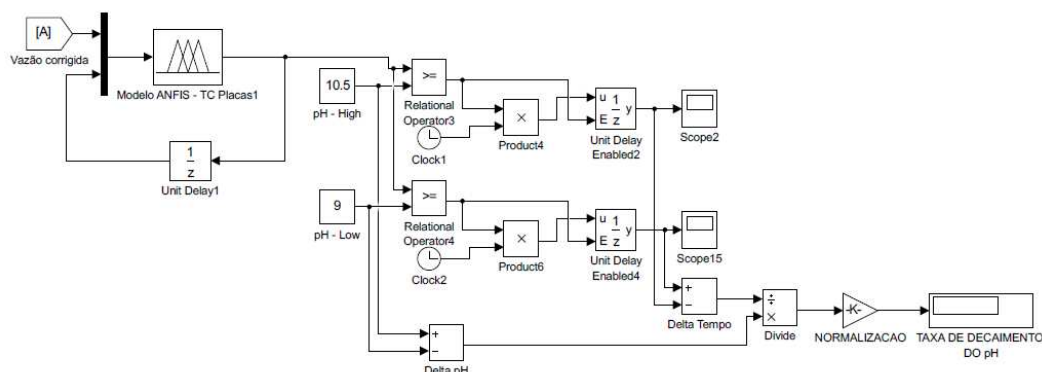
Para o indicador PI_{CEN} , diretamente relacionado ao indicador PI_{EC} , simplesmente foi efetuado o produto do indicador PI_{EC} com o custo (R\$ 0,34899) e o resultado dividido por 10, não sendo apresentado detalhamento do modelo-Simulink.

4.4.4 PI Taxa de decaimento do pH (PI_{TDpH})

O modelo-Simulink desenvolvido (Figura 4.21) considerou os dois valores de pH já definidos (pH 9 e 10,5) multiplicando a saída do operador relacional (“0” ou “1”) pelo tempo; desta maneira, enquanto o pH não é atingido, o tempo é multiplicado pela unidade e, assim que o pH definido é atingido, este é multiplicado por “0”, sendo armazenado o valor de tempo para atingir os valores de pH 9 e 10,5.

Por fim, foi calculada a diferença entre o pH 10,5 e o pH 9 (obtendo-se a variação ΔpH) e a diferença entre os tempos armazenados para que se atinja o pH 10,5 e o pH 9 (obtendo-se a variação Δt) e, a partir destes, dividiu-se a variação de pH pela variação de tempo, obtendo-se a taxa de variação de pH no tempo (fator normalizado – multiplicado por 100).

Figura 4.21 – Modelo-Simulink que simula o valor do PI_{TDpH}



Para o cálculo do indicador chave de desempenho (KPI_{CE}), foi feita a soma simples entre o “PI Custo da Água” e o “PI Custo da Energia Elétrica”.

Foi implementado um modelo-Simulink para simulação do Sistema de Gerenciamento de Eficiência do Processo CIP (SISGECIP) integrando o modelo e todos os subsistemas apresentados e detalhados nos itens anteriores.

O sistema implementado é apresentado no Apêndice B (Figura B.1).

4.5 Interface gráfica de usuário CipGUI

Ao pressionar o comando “Run” do *software* Simulink, com o modelo-Simulink do SISGECIP desenvolvido (com o tempo de simulação “inf” - infinito), automaticamente a tela da interface gráfica “CipGUI” irá abrir.

Será necessário inserir o Set-point Local e, caso deseje-se considerar as influências do decaimento do pH e do volume de água consumida (o que dependerá do estudo considerado), uma ou ambas caixas de seleção (“Check-box”) devem ser selecionadas para que o *set-point* varie dinamicamente; caso contrário, o *set-point* será fixo durante a simulação.

A interface CipGUI (Figura D.1 – Apêndice D) apresenta os indicadores e o indicador chave de desempenho, além dos gráficos – todos já mencionados e

detalhados - atualizados a cada 1 segundo. Ao atingir a condição de regime estacionário (que variará para cada estudo), deve-se pressionar o botão “*Stop*” do Simulink, sendo possível no SISGECIP a visualização dos gráficos e os comportamentos das variáveis durante todo o tempo de simulação.

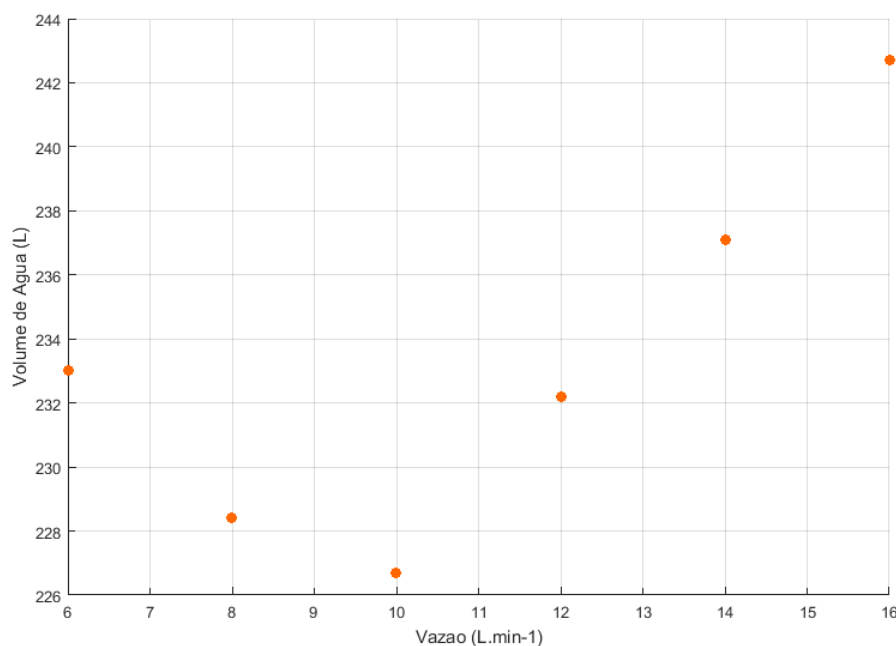
Desta forma, a interface CipGUI, além de ser uma interface mais amigável ao usuário, facilita a simulação e complementa o modelo-Simulink desenvolvido.

4.6 *Estudo da eficiência da limpeza do processo na etapa de enxágue*

Implementados todo o sistema e os indicadores de desempenho, de acordo com os objetivos propostos para este trabalho, adicionalmente com o uso a interface CipGUI desenvolvida, foi feito o estudo de eficiência da limpeza na etapa de enxágue (por meio de simulações, sendo possível, assim, a economia de insumos para o estudo).

A premissa para este estudo é baseada nos volumes de água consumida para cada uma das vazões de enxágue apresentadas na Figura 4.22 (volume de água já citado - V_{LSP} – obtido dos ensaios realizados no trocador de calor), onde fica clara a região de consumo mínimo de água de enxágue (em torno de 10 L.min^{-1} - entre 8 e 12 L.min^{-1}).

Figura 4.22 – Volume de água consumida x Vazão de água de enxágue



Foram executadas simulações com o intuito de validar o uso dos indicadores desenvolvidos e, com o auxílio destes, encontrar o valor de vazão que representasse o consumo mínimo de água e/ou energia. Para tal, as simulações foram realizadas para os valores de vazão de água de enxágue de 6,0 L.min⁻¹, 13,0 L.min⁻¹ e 15,0 L.min⁻¹ (possibilitando estudar a região dos valores de vazão de enxágue mínima e máxima do sistema), e reduzindo o passo dos valores de vazão para os valores intermediários, considerando a precisão do instrumento, obtida no manual do fabricante - entre 8,0 L.min⁻¹ e 12,0 L.min⁻¹ (8,0 L.min⁻¹, 8,5 L.min⁻¹, 9,0 L.min⁻¹, 9,5 L.min⁻¹, 9,75 L.min⁻¹, 10,0 L.min⁻¹, 10,25 L.min⁻¹, 10,5 L.min⁻¹, 11,0 L.min⁻¹, 11,5 L.min⁻¹ e 12,0 L.min⁻¹) para estudo da vazão de água de enxágue que representasse o consumo mínimo de água.

As simulações foram realizadas utilizando-se o *set-point* de vazão de água de enxágue variável e fixo, sendo ambas detalhadas na sequência.

4.6.1 Simulações com *set-point* de água de enxágue variável

Com o intuito de estudar a influência e os ganhos obtidos com a variação do *set-point* de vazão de água de enxágue durante o processo de limpeza, foram feitas

simulações utilizando o algoritmo desenvolvido, o qual varia o *set-point* de água de enxágue dinamicamente de acordo com a influência do volume de água consumida e a influência do decaimento do pH.

Foi realizada uma análise preliminar dos fatores I_{VAC} (influência do volume de água consumida) e I_{DPH} (influência do decaimento do pH). Observou-se que os fatores com magnitudes menores do que a unidade, apresentavam consumo de água maior e KPI_{CE} com valores mais altos (limpeza com custo menos eficiente). Sendo assim, nas simulações que serão detalhadas na sequência, foram definidos pesos iguais a unidade para os dois fatores.

Na sequência serão apresentados os gráficos obtidos a partir dos modelos-Simulink, sendo apresentados detalhamento e discussão em torno das respostas obtidas, aqueles para o *set-point* Local de $9,5 \text{ L.min}^{-1}$ (valor que apresentou menor consumo de água).

4.6.1.1 *Simulação com vazão de água de enxágue variável e set-point Local de $9,5 \text{ L.min}^{-1}$*

Definindo-se o *set-point* local de vazão de água de enxágue em $9,5 \text{ L.min}^{-1}$, são apresentados na sequência os gráficos da simulação do comportamento temporal do erro entre o pH com o *set-point* de vazão fixo e com o *set-point* de vazão variável (Figura 4.23), do *set-point* variável de vazão de água de enxágue (Figura 4.24) e do comportamento temporal de resposta do pH para o *set-point* fixo e variável (Figura 4.25).

A Figura 4.24 (que representa o comportamento temporal do *set-point* variável de vazão de água de enxágue) apresenta a vazão inicialmente com o valor máximo - influenciada pelo volume de água consumida e decaindo conforme o volume de água consumida diminui.

À medida que o pH do processo diminui, aquele com vazão variável decai mais rapidamente (por ter o valor do *set-point* de vazão mais elevado). Isto pode ser visto de maneira clara no gráfico de comportamento temporal do erro entre o pH com *set-point* de vazão água de enxágue fixa e variável - Figura 4.23 - observando-se o pico

em torno do tempo 600 segundos, região em que a resposta do pH com *set-point* fixo está mais distante daquela com set-point variável.

Nesta região, observa-se uma retomada no aumento do set-point da vazão de enxágue (Figura 4.24), influenciada por este fator e decaindo até o valor mínimo de aproximadamente $9,5 \text{ L.min}^{-1}$ ao final da simulação do processo de limpeza.

Figura 4.23 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $9,5 \text{ L.min}^{-1}$ e set-point variável

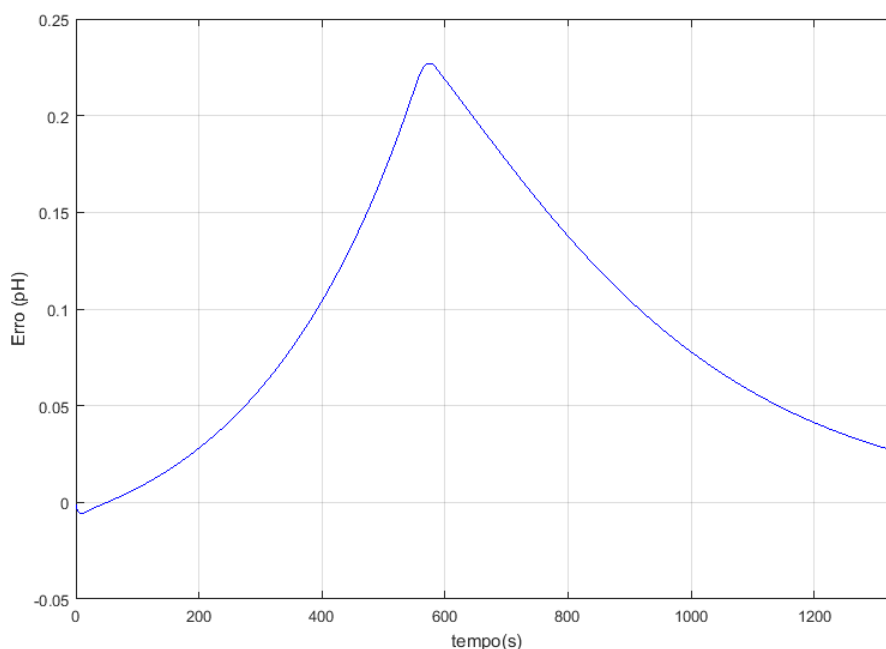
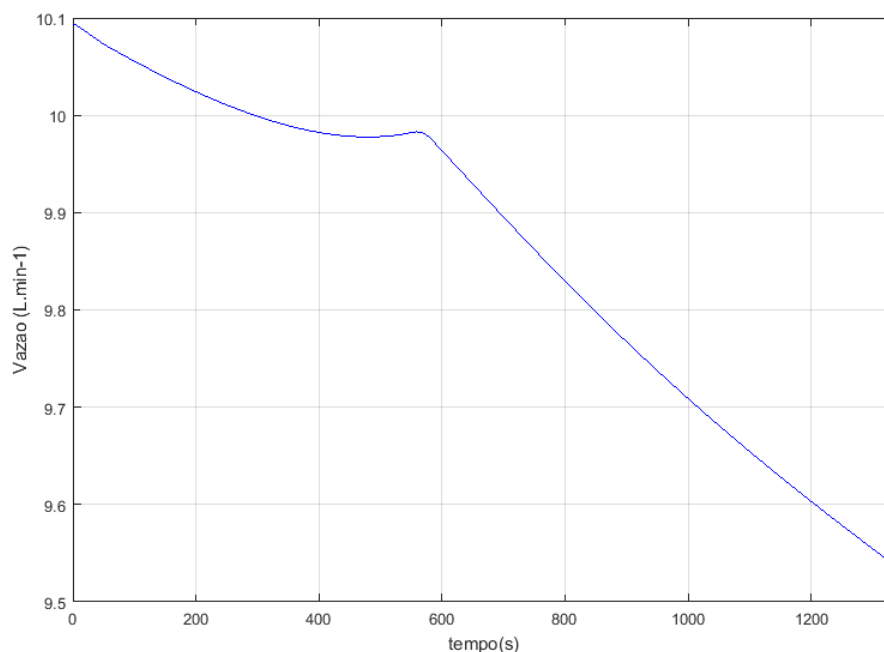


Figura 4.24 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 9,5 L.min⁻¹)



A Figura 4.25 possibilita simplesmente a visualização e análise comparativa entre o decaimento do pH com o set-point fixo e variável (observando-se a diferença maior – erro – próximo ao tempo de 600 segundos conforme já analisado), da mesma forma que a Figura 4.26 também possibilita somente a visualização entre o set-point variável e a resposta da vazão de água de enxágue, simulada com ruído.

Figura 4.25 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 9,5 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

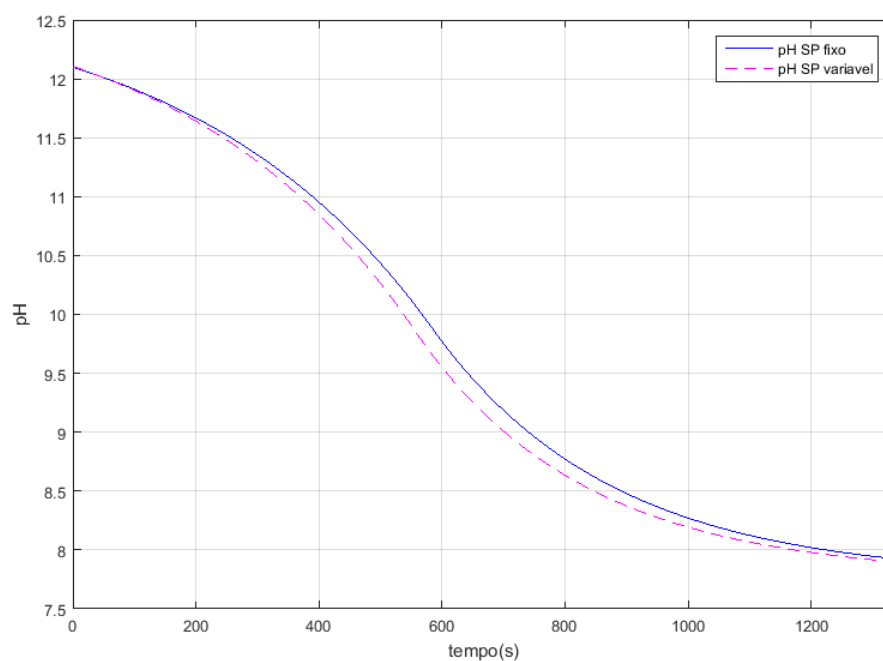
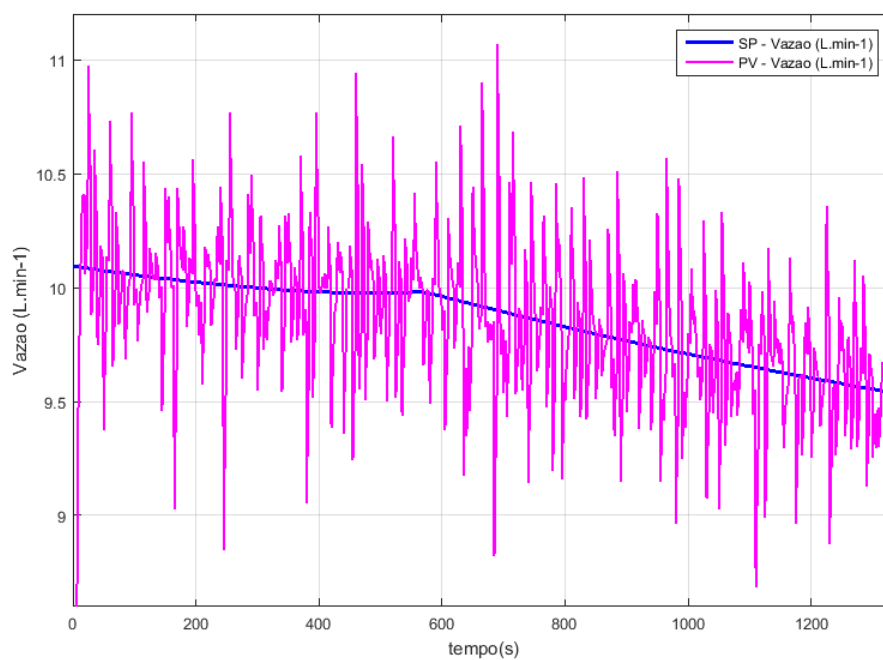


Figura 4.26 – Comportamento temporal de vazão variável da água de enxágue - LSP= 9,5 L.min⁻¹ (set-point - SP e variável de processo - PV)



A análise efetuada é válida para as demais simulações apresentadas, porém apresentando magnitudes e tempos de resposta distintos. As respostas temporais para os valores de *set-point* local de vazão de água de enxágue de 6,0 L.min⁻¹, 8,0 L.min⁻¹, 8,5 L.min⁻¹, 9,0 L.min⁻¹, 9,5 L.min⁻¹, 9,75 L.min⁻¹, 10,0 L.min⁻¹, 10,25 L.min⁻¹, 10,5 L.min⁻¹, 11,0 L.min⁻¹, 11,5 L.min⁻¹, 12,0 L.min⁻¹, 13,0 L.min⁻¹ e 15,0 L.min⁻¹ são apresentadas no “Apêndice C – Comportamentos temporais das simulações com *set-point* de água de enxágue variável” – Figuras C.1 a C.39.

A vazão de enxágue dos ensaios experimentais oscila em torno do valor médio de vazão e, quando feitas as simulações, foi observado que esta variação não apresentou influência nos indicadores (os valores dos indicadores tiveram variação insignificante quando comparadas as simulações utilizando a vazão de enxágue com e sem incluir a perturbação aleatória).

Assim, foi utilizada para o estudo a vazão de enxágue sem a perturbação em torno do valor médio de vazão. Isto reforça a ideia de que uma oscilação semelhante à apresentada pelo processo quando coletados os dados experimentais em torno do valor da vazão de enxágue - inerente à variável quando é realizado o controle desta, por exemplo devido a ruídos de medição - não influencia na avaliação do consumo de água e/ou energia.

4.6.1.2 *Análise comparativa dos resultados da simulação com vazão água de enxágue variável*

Foi possível observar claramente que os gráficos facilitaram a avaliação das consequências das mudanças na vazão de enxágue do processo. Estes possibilitaram a visualização e análise comparativa—do uso do *set-point* de vazão de água de enxágue fixa e variável, além da resposta da variável de processo para o *set-point* definido pelo algoritmo.

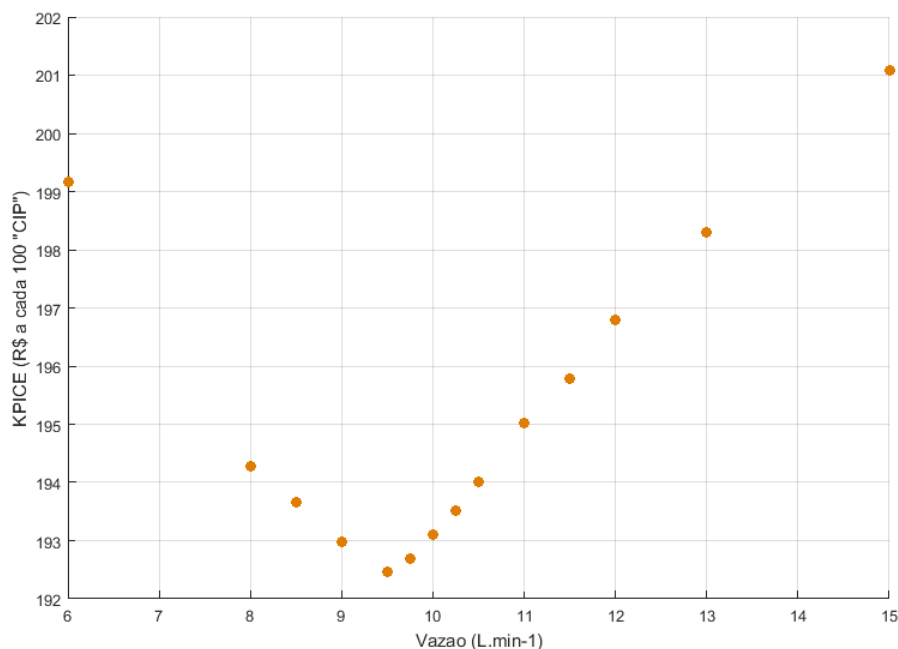
Adicionalmente, os indicadores desenvolvidos, alinhados aos objetivos deste trabalho, são ferramentas que permitem avaliar as vantagens e desvantagens da variação da vazão de água de enxágue no processo. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos para as simulações executadas.

Tabela 4.2 – Valores dos indicadores e do indicador chave de desempenho para simulações com variação da vazão de água de enxágue

LSP Vazão (L.min ⁻¹)	PIV _{ME} (L.min ⁻¹)	PI _{VAC} (L)	PI _{EC} (W.h)	PI _{TDpH} (pH/ms)	PI _{CAG} (R\$ a cada 100 enxagues)	PI _{CEN} (R\$ a cada 100 enxagues)	KPI _{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)
6,00	6,23	225,40	55,53	3,70	197,23	1,94	199,16
8,00	8,29	220,40	40,79	5,17	192,85	1,42	194,27
8,50	8,81	219,80	38,28	5,54	192,33	1,34	193,66
9,00	9,32	219,10	36,06	5,91	191,71	1,26	192,97
9,50	9,84	218,60	34,12	6,28	191,28	1,19	192,47
9,75	10,09	218,90	33,30	6,44	191,54	1,16	192,70
10,00	10,35	219,40	32,53	6,58	191,98	1,14	193,11
10,25	10,60	219,90	31,82	6,76	192,41	1,11	193,52
10,50	10,86	220,50	31,15	6,94	192,94	1,09	194,02
11,00	11,38	221,70	29,90	7,28	193,99	1,04	195,03
11,50	11,89	222,60	28,72	7,58	194,78	1,00	195,78
12,00	12,41	223,80	27,68	7,94	195,83	0,97	196,79
13,00	13,44	225,60	25,76	8,62	197,40	0,90	198,30
15,00	15,50	228,90	22,72	9,93	200,29	0,79	201,08

Analisando os indicadores, foi possível observar que para o *set-point* local de vazão de água de enxágue em 9,5 L.min⁻¹ (com uma vazão média de enxágue de 9,84 L.min⁻¹) o KPI_{CE} apresenta o valor de custo (a cada 100 enxágues do CIP) de R\$ 192,47 (representado para todas as vazões estudadas na Figura 4.27), o que indicou ser esta a vazão que representou a etapa de enxágue da limpeza com menor custo e, neste caso, com consumo mínimo de água, o que pode ser observado através do PI_{VAC}, que também apresenta o valor mínimo (218,60 L) nesta condição.

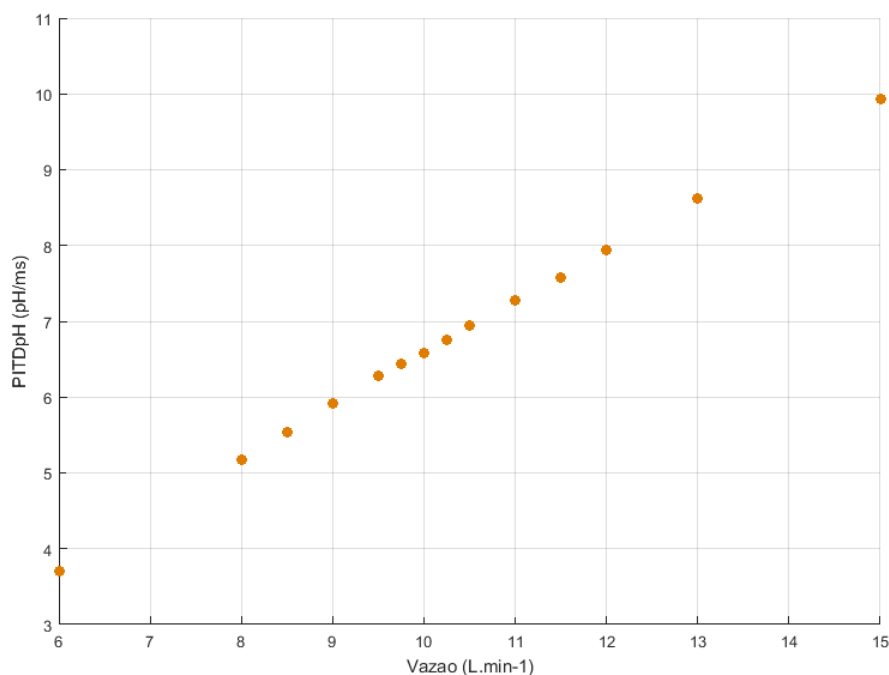
Figura 4.27 – Gráfico do indicador KPI_{CE} x Vazão de água de enxágue variável



Este resultado obtido, em que a condição de consumo mínimo de água é a de menor custo justifica-se, pois, o consumo de energia elétrica e o custo desta (apresentados pelos indicadores $PI_{EC} = 34,12 \text{ W.h}$ e $PI_{CEN} = 1,19 - \text{R\$ a cada } 100 \text{ enxágues do CIP}$), são baixos quando comparados com o consumo de água e o custo desta ($PI_{VAC} = 218,60$ e $PI_{CAG} = 191,28 - \text{R\$ a cada } 100 \text{ enxágues do CIP}$).

O PI_{TDpH} mostra que a limpeza com menor custo e menor consumo de água, além de não ser a de menor consumo de energia elétrica, não é aquela com o decaimento do pH mais rápido com o tempo (representação comparativa do indicador para todas as vazões de enxágue em estudo na Figura 4.28).

Figura 4.28 – Indicador PI_{TDpH} x Vazão de água de enxágue variável



A etapa seguinte foi a avaliação da vantagem ou não na variação do *set-point* de vazão de água de enxágue, o que foi possibilitado a partir da análise dos indicadores para simulações com o *set-point* de água de enxágue fixo.

Vale reforçar que os indicadores são específicos para cada aplicação, conforme ressaltam CHIOUA et al. (2015) e podem ser definidos outros indicadores, ou mesmo readequados, para aplicações em condições diferentes de acordo com a necessidade e as características do processo.

4.6.2 Simulações com *set-point* de água de enxágue fixo

Nas simulações com o *set-point* de água de enxágue fixo não foram desenvolvidos os gráficos de resposta temporal uma vez que não houve *set-point* variável - não havendo sentido as comparações possibilitadas sendo, portanto, de interesse, somente a análise e avaliação dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho.

4.6.2.1 Análise comparativa dos resultados da simulação com vazão água de enxágue fixa

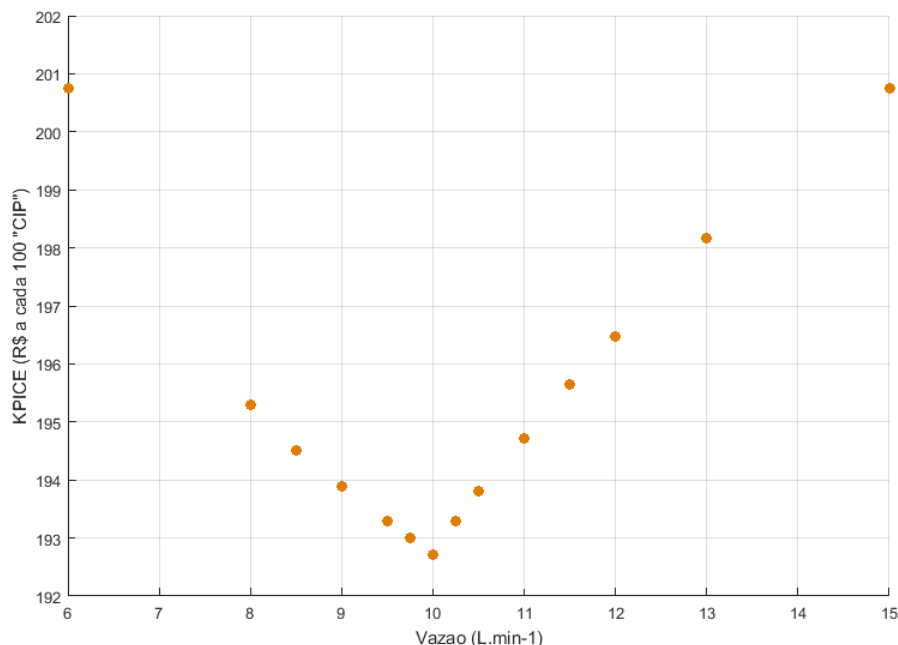
Os indicadores de desempenho e o indicador chave de desempenho desenvolvidos, conforme já mencionado, permitiram avaliar as vantagens e desvantagens da mudança da vazão de água de enxágue no processo. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores obtidos para as simulações executadas.

Tabela 4.3 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa

LSP Vazão (L.min ⁻¹)	PIV _{ME} (L.min ⁻¹)	PI _{VAC} (L)	PI _{EC} (W.h)	PI _{TDpH} (pH/ms)	PI _{CAG} (R\$ a cada 100 enxagues)	PI _{CEN} (R\$ a cada 100 enxagues)	KPI _{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)
6,00	5,99	227,10	58,14	3,50	198,71	2,03	200,74
8,00	7,99	221,50	42,55	4,90	193,81	1,48	195,30
8,50	8,49	220,70	39,92	5,26	193,11	1,39	194,51
9,00	8,98	220,10	37,59	5,60	192,59	1,31	193,90
9,50	9,48	219,50	35,52	5,95	192,06	1,24	193,30
9,75	9,73	219,20	34,58	6,12	191,80	1,21	193,01
10,00	9,96	218,90	33,73	6,28	191,54	1,18	192,71
10,25	10,23	219,60	32,97	6,47	192,15	1,15	193,30
10,50	10,48	220,20	32,25	6,61	192,68	1,13	193,80
11,00	10,97	221,30	30,95	6,94	193,64	1,08	194,72
11,50	11,47	222,40	29,75	7,25	194,60	1,04	195,64
12,00	11,97	223,40	28,65	7,58	195,48	1,00	196,47
13,00	12,96	225,40	26,68	8,24	197,23	0,93	198,16
15,00	14,95	228,50	23,46	9,49	199,94	0,82	200,76

Analisando os indicadores, foi possível observar que para o set-point local de vazão de água de enxágue em 10 L.min⁻¹ (com uma vazão média de enxágue de 9,96 L.min⁻¹) o KPI_{CE} apresenta o valor de custo (a cada 100 enxagues do CIP) de R\$ 192,71 (representado para todas as vazões estudadas na Figura 4.29), o que indicou ser esta a vazão que representou a limpeza com menor custo e, neste caso, com consumo mínimo de água, o que pode ser observado através do PI_{VAC}, que também apresenta o valor mínimo (218,90 L) nesta condição.

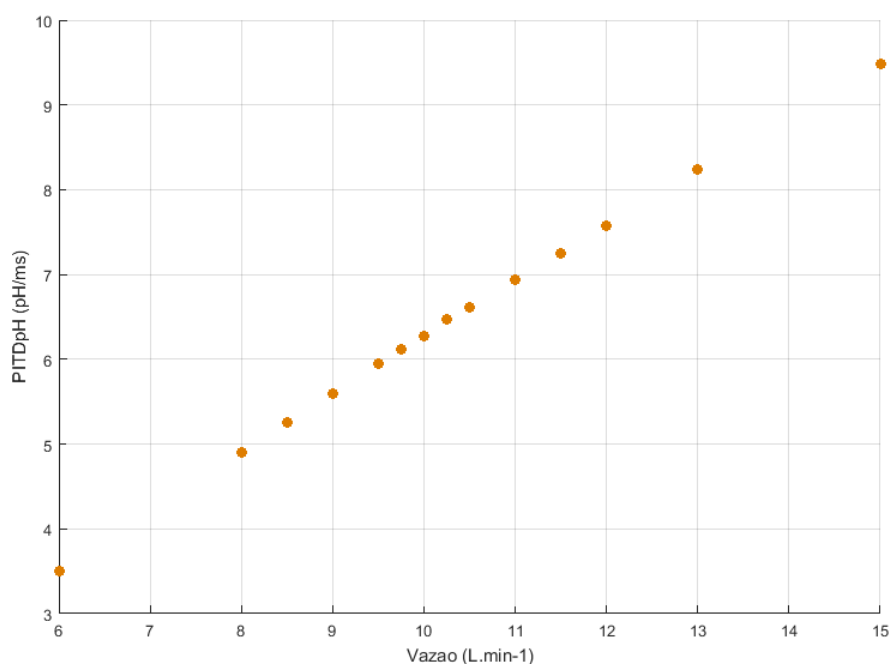
Figura 4.29 – Indicador KPI_{CE} x Vazão de água de enxágue fixa



Este resultado obtido (da mesma maneira como o obtido para a vazão de enxágue variável) em que a condição de consumo mínimo de água é a de menor custo, justifica-se, pois, o consumo de energia elétrica e o custo desta (apresentados pelos indicadores $PI_{EC} = 33,73 \text{ W.h}$ e $PI_{CEN} = 1,18 - \text{R\$ a cada } 100 \text{ enxágues do CIP}$), são baixos quando comparados com o consumo de água e o custo desta ($PI_{VAC} = 218,90$ e $PI_{CAG} = 191,54 - \text{R\$ a cada } 100 \text{ enxágues do CIP}$).

O indicador PI_{TDpH} , mostra – também como ocorrido com vazões de enxágue variável - que a limpeza mais eficiente não é aquela com o decaimento do pH mais rápido com o tempo (representação comparativa do indicador para todas as vazões de enxágue em estudo na Figura 4.30).

Figura 4.30 – Indicador PI_{TDpH} x Vazão de água de enxágue fixa



4.6.2.2 *Análise comparativa entre os resultados da simulação com vazão água de enxágue fixa e variável*

Comparativamente, avaliando o KPI_{CE} para vazões de enxágue fixa e variável (nas condições de limpeza com custo e consumo de água mínimos), os valores foram praticamente iguais (192,47 para as simulações com vazões de enxágue variável e 192,71 para as simulações com vazões de enxágue fixa).

Analisando os demais indicadores de desempenho, isto fica mais claro, uma vez que a energia elétrica consumida – visualizada através do PI_{EC} – foi praticamente igual (34,12 W.h para as simulações com vazões de enxágue variável e 33,73 W.h para as simulações com vazões de enxágue fixa); o que ocorreu também com o volume de água consumida visualizada através do PI_{VAC} (218,60 L para as simulações com vazões de enxágue variável e 218,90 L para as simulações com vazões de enxágue fixa).

Na Tabela 4.4 são apresentados os dados comparativos citados e os demais indicadores de custo (PI_{CEN} e PI_{CAG}), além da variação percentual entre eles.

Tabela 4.4 – Comparação dos Indicadores KPI_{CE} , PI_{EC} , PI_{VAC} , PI_{CEN} e PI_{CAG} entre as simulações com vazões de enxágue fixa e variável

Indicador	Vazão de Enxague Fixa	Vazão de Enxague variável	Variação Percentual
KPI_{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)	192,71	192,47	0,13
PI_{EC} (W.h)	33,73	34,12	1,14
PI_{VAC} (L)	218,90	218,60	0,14
PI_{CEN} (R\$ a cada 100 enxagues)	1,18	1,19	0,84
PI_{CAG} (R\$ a cada 100 enxagues)	191,54	191,28	0,14

Avaliando os indicadores na mesma condição de custo e volume mínimo de água na etapa de enxágue apresentados na Tabela 4.4, para as simulações com vazões de enxágue variável, onde o consumo de água foi de 218,6 L, e para as simulações com vazões de enxágue fixas, onde o consumo de água na etapa de enxágue foi de 218,9 L, observou-se uma redução do consumo de água de aproximadamente 0,14%. Logo, não se justifica a execução da limpeza com vazão variável (considerando as condições de set-point variável gerado pelo algoritmo desenvolvido), uma vez que haveria desgaste desnecessário dos atuadores sem um retorno financeiro expressivo.

4.6.2.3 *Análise dos resultados da simulação com vazão de água de enxágue fixa*

Uma vez justificada a ineficiência de utilizar o set-point variável, foi feita a análise dos indicadores para as simulações com vazões de água de enxágue fixa. Isto entre a condição de vazão de água de enxágue de 15 L.min⁻¹, em que a limpeza é mais rápida (918 segundos – obtido a partir de dados da simulação) - próximo ao valor máximo – e a vazão de água de enxágue de 10 L.min⁻¹ (1322 segundos), considerada a que representa a limpeza com consumo mínimo de água, o que mostrou a possibilidade de ganhos com relação à economia do custo da água (economia de R\$

8,04 a cada 100 enxágues do CIP) e redução do consumo de água (aproximadamente 4,20% menor).

A escolha da vazão máxima como fator comparativo foi definida por ser esta vazão uma possível tendência natural de implementação prática sem uma avaliação prévia e sem o uso dos indicadores de desempenho (pois sem uma análise cuidadosa durante a operação do processo no ambiente industrial, há uma tendência em raciocinar que quanto maior a vazão – maior a ação mecânica nas paredes dos equipamentos – e menor o tempo de limpeza, menor seria o consumo de água). Esta tendência de variação da vazão de enxágue sem uma análise prévia é reforçada por KUNIGK (1998), que menciona que a vazão de água das soluções de limpeza ou enxágue em cada uma das etapas do processo é o parâmetro mais facilmente manipulável e, por isso, o preferido no momento de efetuar uma variação.

Apesar de uma pequena redução relacionada ao custo da água, a análise apresentada reforça a tendência apontada por TUGNOLI et al. (2012) de uma perspectiva holística dos processos com vistas à sustentabilidade, que na prática tem um apelo e uma importância mais ampla face às preocupações com relação à minimização do seu consumo. Além disto, os resultados ficam menos dependentes do julgamento de especialistas e menos influenciados por suposições.

Na Tabela 4.5 são apresentados os dados comparativos com todas as vazões consideradas neste estudo, ressaltando as condições de vazão de enxágue máximo e aquela que representou o consumo mínimo de 218,90 L, evidenciada pelo PI_{VAC} , e o custo R\$ 8,04 menor para cada 100 enxágues do CIP (com $KPI_{CE} = R\$ 192,71$ para a vazão de 10 L.min^{-1} e R\$ 200,76 para vazão de 15 L.min^{-1}).

Tabela 4.5 – Comparação da redução do consumo de água nas simulações com vazões de enxágue fixa

LSP Vazão (L.min ⁻¹)	PI _{VAC} (L)	Redução do consumo de água (%)	KPI _{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)	Redução do custo (R\$ a cada 100 enxagues)	Tempo de enxague (s)
6,00	227,10	0,61	200,74	0,01	2275,00
8,00	221,50	3,06	195,30	5,46	1665,00
8,50	220,70	3,41	194,51	6,25	1562,00
9,00	220,10	3,68	193,90	6,86	1471,00
9,50	219,50	3,94	193,30	7,45	1390,00
9,75	219,20	4,07	193,01	7,75	1353,00
10,00	218,90	4,20	192,71	8,04	1322,00
10,25	219,60	3,89	193,30	7,46	1290,00
10,50	220,20	3,63	193,80	6,96	1262,00
11,00	221,30	3,15	194,72	6,04	1211,00
11,50	222,40	2,67	195,64	5,12	1164,00
12,00	223,40	2,23	196,47	4,28	1121,00
13,00	225,40	1,36	198,16	2,60	1044,00
15,00	228,50	0,00	200,76	0,00	918,00

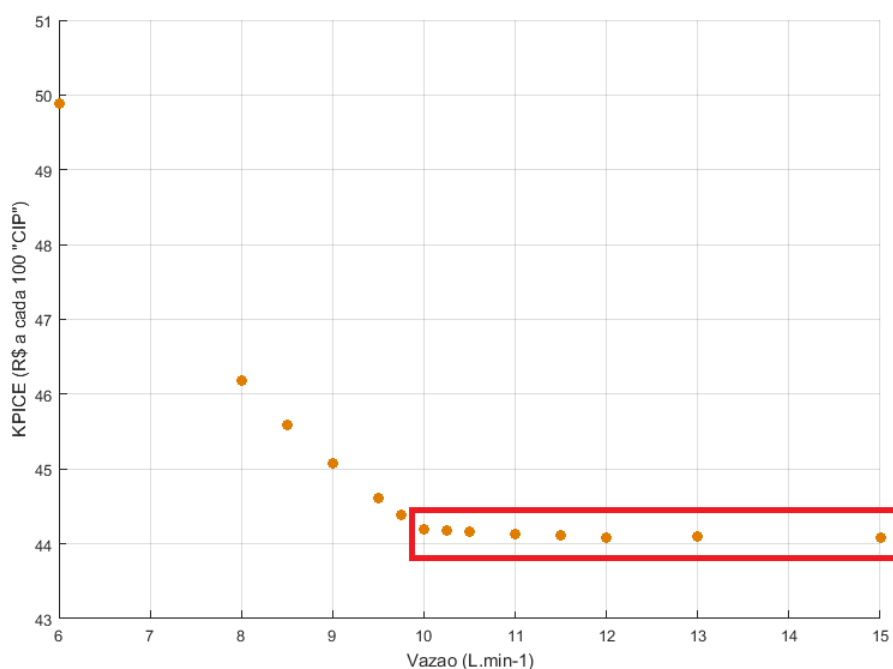
Para melhor visualização do uso dos indicadores em um possível estudo em outras condições de consumo de água e energia elétrica, foram consideradas duas situações.

Na Situação 1 (Tabela 4.6), considera-se o custo da água cinco vezes menor (por exemplo, em uma planta onde a água é tratada e reutilizada) e o custo energia elétrica para acionamento da bomba cinco vezes maior (por exemplo, uma bomba com potência cinco vezes maior comparativamente à utilizada nos ensaios experimentais).

Tabela 4.6 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa – Situação 1

LSP Vazão (L.min ⁻¹)	PIV _{ME} (L.min ⁻¹)	PI _{VAC} (L)	PI _{EC} (W.h)	PI _{TDpH} (pH/ms)	PI _{CAG} (R\$ a cada 100 enxagues)	PI _{CEN} (R\$ a cada 100 enxagues)	KPI _{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)
6,00	5,99	227,10	58,14	3,50	39,74	10,15	49,89
8,00	7,99	221,50	42,55	4,90	38,76	7,42	46,19
8,50	8,49	220,70	39,92	5,26	38,62	6,97	45,59
9,00	8,98	220,10	37,59	5,60	38,52	6,56	45,08
9,50	9,48	219,50	35,52	5,95	38,41	6,20	44,61
9,75	9,73	219,20	34,58	6,12	38,36	6,03	44,39
10,00	9,96	218,90	33,73	6,28	38,31	5,89	44,19
10,25	10,23	219,60	32,97	6,47	38,43	5,75	44,18
10,50	10,48	220,20	32,25	6,61	38,54	5,63	44,16
11,00	10,97	221,30	30,95	6,94	38,73	5,40	44,13
11,50	11,47	222,40	29,75	7,25	38,92	5,19	44,11
12,00	11,97	223,40	28,65	7,58	39,10	5,00	44,09
13,00	12,96	225,40	26,68	8,24	39,45	4,66	44,10
15,00	14,95	228,50	23,46	9,49	39,99	4,09	44,08

Neste caso, muito embora o consumo de água também seja menor para a vazão de água de enxágue de 10 L.min⁻¹, o KPI_{CE} que indica o custo do enxágue do CIP praticamente não se altera para vazões acima deste valor (Figura 4.31), pois o custo do consumo da energia elétrica - evidenciado pelo PI_{CEN} - sendo mais elevado, influencia na soma do custo da água (PI_{CAG}), diferentemente da condição apresentada anteriormente.

Figura 4.31 – Indicador KPI_{CE} - Situação 1

Desta forma, a decisão seria entre a redução já mencionada no consumo de água (4,20%), ou a execução do(s) enxágue(s) do CIP a uma vazão mais alta buscando retomar mais rapidamente a produção.

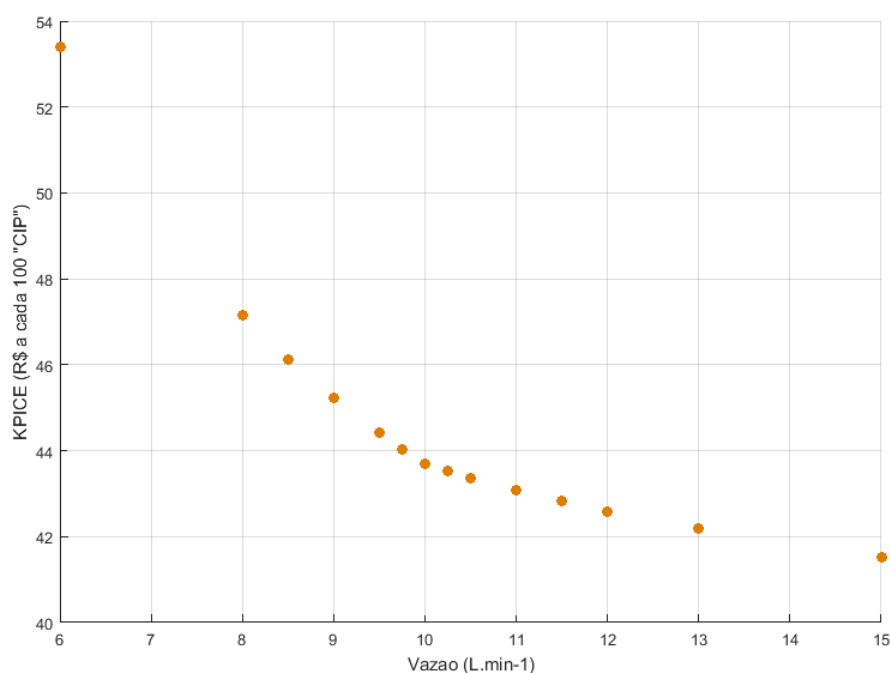
Para que tal decisão seja tomada, seriam necessárias outras informações que envolvem a produção como um todo, isto alinhado ao fato mencionado por CAI et al. (2009), de que os resultados não devem ser adotados como decisões diretas, mas como informações de suporte na tomada de decisão.

Na Situação 2 (Tabela 4.7), considera-se o custo da água 6 vezes menor (da mesma forma exemplificada na situação anterior, em uma planta onde a água é tratada e reutilizada) e o custo energia elétrica para acionamento da bomba 10 vezes maior (também da mesma maneira exemplificada anteriormente, uma bomba com potência 10 vezes maior comparativamente à utilizada nos ensaios experimentais).

Tabela 4.7 – Valores dos indicadores de desempenho e do indicador chave de desempenho para simulações com vazão de água de enxágue fixa – Situação 2

LSP Vazão (L.min ⁻¹)	PIV _{ME} (L.min ⁻¹)	PI _{VAC} (L)	PI _{EC} (W.h)	PI _{TDpH} (pH/ms)	PI _{CAG} (R\$ a cada 100 enxagues)	PI _{CEN} (R\$ a cada 100 enxagues)	KPI _{CE} (R\$ a cada 100 enxagues)
6,00	5,99	227,10	58,14	3,50	33,12	20,29	53,41
8,00	7,99	221,50	42,55	4,90	32,30	14,85	47,15
8,50	8,49	220,70	39,92	5,26	32,19	13,93	46,12
9,00	8,98	220,10	37,59	5,60	32,10	13,12	45,22
9,50	9,48	219,50	35,52	5,95	32,01	12,40	44,41
9,75	9,73	219,20	34,58	6,12	31,97	12,07	44,03
10,00	9,96	218,90	33,73	6,28	31,92	11,77	43,69
10,25	10,23	219,60	32,97	6,47	32,03	11,51	43,53
10,50	10,48	220,20	32,25	6,61	32,11	11,25	43,37
11,00	10,97	221,30	30,95	6,94	32,27	10,80	43,07
11,50	11,47	222,40	29,75	7,25	32,43	10,38	42,82
12,00	11,97	223,40	28,65	7,58	32,58	10,00	42,58
13,00	12,96	225,40	26,68	8,24	32,87	9,31	42,18
15,00	14,95	228,50	23,46	9,49	33,32	8,19	41,51

Neste caso, muito embora o consumo de água novamente seja menor para a vazão de água de enxágue de 10 L.min⁻¹, o KPI_{CE} indica que o custo do enxágue do CIP é mínimo para a vazão máxima de 15 L.min⁻¹ (detalhado na Figura 4.32), pois o custo do consumo da energia elétrica - evidenciado pelo PI_{CEN} - sendo mais elevado, também influencia na soma do custo da água (PI_{CAG}).

Figura 4.32 – Indicador KPI_{CE} - Situação 2

Desta forma, a decisão seria novamente entre a redução já mencionada no consumo de água (4,20%), ou a execução do(s) enxágue(s) do CIP à vazão de 15 L.min⁻¹ buscando o custo mínimo total (e custo mínimo de energia elétrica), além de retomar mais rapidamente a produção.

Com base nos dados da simulação, o tempo de enxágue seria reduzido de 1322 segundos para 918 segundos quando comparado à execução do(s) enxágue(s) do CIP à vazão de consumo mínimo de água de 10 L.min⁻¹, num total de redução de 404 segundos. Além disto, o custo para cada 100 enxágues do CIP seria R\$ 2,18 menor (R\$ 43,69 para a vazão de 10 L.min⁻¹ e R\$ 41,51 para vazão de 15 L.min⁻¹).

Para que tal decisão seja tomada, mais uma vez seriam necessárias outras informações que envolvem a produção como um todo, uma vez que os indicadores, de acordo com BADAWI et al. (2016), têm foco nos pontos de desempenho críticos para o sucesso do processo.

A disponibilização destas variáveis simplificaria e traria ganhos a análises como as de OLIVEIRA et al. (2012), em que foi feita uma avaliação buscando a redução do tempo de limpeza com base em simulações simplificadas do processo.

Além disto, conforme GONZALÉZ-GIL et al. (2014) mencionam, novos PI's podem ser adicionados e novos KPI's aperfeiçoados de acordo com as necessidades observadas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho foram atingidos com êxito. A hipótese definida, que afirmava ser possibilitada a redução do consumo de água e energia elétrica em um processo de limpeza CIP (na etapa de enxágue) por meio da análise dos indicadores de desempenho, foi verificada e comprovada. Além disto, foi possível também incluir na análise o tempo do enxágue, com a possibilidade de estudar a retomada mais rápida da produção.

O Sistema de Gerenciamento de Custo do Consumo do Processo CIP – SISGECIP – e a interface gráfica de usuário - CipGUI - tiveram informações complementares, uma vez que o primeiro possibilitou a visualização dos indicadores e dos gráficos da etapa de enxágue como um todo (apresentação do início ao final da etapa), e a segunda, além de ser uma interface mais amigável ao usuário, também facilitou a visualização dos indicadores e dos gráficos variando durante o tempo de simulação da etapa.

Os PI's e o KPI desenvolvidos possibilitam, se implementados no sistema de supervisão e controle do processo, uma visualização das condições das variáveis de interesse do processo de limpeza, possibilitando uma visão mais holística do processo com relação à sustentabilidade e um apelo significativo face às preocupações da atualidade com relação à minimização do consumo de água e energia elétrica.

Muito embora as variáveis mencionadas no trabalho sejam, a princípio, de simples aquisição, muitas vezes não é feita nenhuma avaliação mais detalhada destas (frequentemente nem sequer a aquisição), sendo utilizada somente a experiência e procedimentos elaborados com tempos definidos e estabelecidos como suficientes e adequados. Com base nas implementações sugeridas, a avaliação ficaria mais fundamentada e menos influenciada por suposições.

Desta forma, a partir da proposta e resultados apresentados, é possível uma análise após a execução de cada limpeza durante a produção (nível de operador do processo) e, especialmente, no gerenciamento do consumo de água e energia elétrica do processo de limpeza CIP executado na planta (nível de gestão).

Além disto, a disponibilização destas variáveis através de indicadores de desempenho poderia trazer pontos positivos para o ambiente industrial, uma vez que estas estejam disponibilizadas no sistema de supervisão e controle do processo.

Os valores de economia com relação ao custo apresentados no estudo foram de baixa magnitude. Porém, as vazões de enxágue utilizadas na planta (e nas simulações) foram baixas quando comparadas à condição em uma planta industrial, indicando a possibilidade de economia financeira maior em uma implementação no ambiente industrial. Além disto, diversas limpezas CIP podem ser executadas durante o dia em uma produção, sendo a redução de consumo de água, energia elétrica ou tempo para retomar a produção, fatores de grande relevância.

Ressalta-se que o estudo apresentado se concentrou somente na etapa de enxágue do processo CIP. Este, sendo estendido para as demais etapas do processo de limpeza, possibilita também ganhos tanto no sentido de redução do impacto ambiental - limpeza na condição de consumo mínimo de água e/ou energia elétrica - quanto com ganhos financeiros, diretamente relacionado com a retomada mais rápida de produção, por meio da redução do tempo da etapa, ou com as tarifas cobradas para o consumo de água e energia elétrica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que o Sistema de Gerenciamento de Custo do Consumo do Processo CIP – SISGECIP e a interface CipGUI – desenvolvidos apresentam potencial para aplicação no ambiente industrial e possibilidades de ganhos com relação à redução do consumo de água e energia no processo, algumas sugestões de implementação de melhorias são propostas:

- Implementar melhorias no algoritmo que calcula o *set-point* variável – e, a partir destas melhorias, verificar se há mudança expressiva no consumo de água e energia para a condição de *set-point* variável com base nos indicadores já desenvolvidos;
- Utilizar outras técnicas de identificação de sistemas para obtenção do modelo matemático que representa a resposta do processo;

- Realizar testes de implementação do sistema desenvolvido em um circuito microcontrolado, possibilitando a integração com o sistema de gerenciamento desenvolvido independente do sistema de controle (a planta utilizada neste estudo foi desativada, não sendo possível a implementação);

- A partir da implementação prática do sistema, e observando-se a necessidade, desenvolver outros indicadores de desempenho que complementem os já desenvolvidos (tais como, KPIs que indiquem o “peso” do custo da água e da energia de cada etapa do processo de limpeza, no custo do processo global de limpeza CIP), deixando o sistema mais completo;

- Inserir um indicador de desempenho de análise microbiológica – considerando a possibilidade de obtenção desta informação com sensoramento adequado - da(s) etapa(s) do processo CIP;

- Integração do sistema de gerenciamento desenvolvido utilizando protocolos de comunicação industriais, possibilitando a avaliação das vantagens e desvantagens comparativamente ao que foi desenvolvido neste trabalho;

- Estudo das vantagens do uso do sistema nas demais etapas do processo CIP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AES ELETROPAULO. **Tarifa de Energia elétrica.** Disponível: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/prazos-e-tarifas/paginas/tarifa-de-energia-eletrica.aspx>>. Acesso em: 03 de março de 2018.
- ALVAREZ, D.; GARRIDO, N.; SANS, R.; CARRERAS, I. **Minimization-optimization of water use in the process of cleaning reactors and containers in a chemical industry.** Journal of cleaner production, v. 12, n. 7, p. 781-787, Set. 2004.
- ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos.** São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.
- BADAWI, M.; EL-AZIZ, A.; IDRESS, A. M.; HEFNY, H.; HOSSAM, S. **A Survey on Exploring Key Performance Indicators.** Future Computing and Informatics Journal, v.1, n. 1-2 p.47-52, Dez. 2016.
- BANSAL, B.; CHEN, X. D. **A critical review of milk fouling in heat exchangers.** Comprehensive reviews in food science and food safety, v. 5, n. 2, p. 27-33, Abril 2006.
- BARAK, S.; SADEGH, S. **Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm.** Electrical Power and Energy Systems, v. 82, p. 92-104, Mar. 2016.
- BOLOGNESI, A.; BRAGALLI, C.; LENZI, C.; ARTINA, S. **Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems.** In Procedia Engineering: 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry - Perugia, v. 70, p. 181 – 190, 2013.
- CAI, J.; LIU, X.; XIAO, Z.; LIU, J. **Improving supply chain performance management: A systematic approach to analyzing iterative KPI accomplishment.** Decision Support Systems v. 46, n. 2, p. 512 – 521, Jan. 2009.
- CHIOUA, M.; BAUER, M.; CHEN, S. -L.; SCHLAKE, J. C.; SAND, G.; SCHMIDT, W.; THORNHILL, N. F. **Plant-wide root cause identification using plant key performance indicators (KPIs) with application to a paper machine.** Control Engineering Practice, v. 49, p. 149-158, Out. 2015.
- COGHI, M. A. **Plano Diretor de Automação e Informática Integrado à Gestão do Portfólio de Investimentos de uma Organização Industrial Química.** Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 156 p. Tese (Doutorado).
- DAVEY, K. R., CHANDRAKASH, S.; O'NEILL, B. K. **A new risk analysis of Clean-In-Place milk processing.** Food Control v. 29, n. 1, p. 248-253, Jan. 2013.
- FAN, M., PHINNEY, D. M., HELDMAN, D. R. **The impact of clean-in-place**

parameters on rinse water effectiveness and efficiency. Journal of Food Engineering v. 222, p. 276-283, Abril 2018.

FRYER, P. J; ASTERIADOU, K. **A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning processes.** Trends in Food Science & Technology, v. 20, n. 6, p. 255-262, 2009.

GIBSON, H.; TAYLOR, J. H.; HALL, K. E.; HOLAH, J.T. **Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms.** Journal of Applied Microbiology, v. 87, n. 1, p. 41-48, 1999.

GIESE, J. H. **Sanitation: the key to food safety and public health.** Food Technology, v. 45, n. 12, p. 74-80, Dez. 1991.

GONZÁLEZ-GIL, A.; PALACIN, R., BATTY, P. **Optimal energy management of urban rail systems: Key performance Indicators.** Energy Conversion and Management, v. 90, p. 282-291, Dez. 2014.

HOSOZ, M.; ERTUNC, H. M.; KARABEKTAS, M; ERGEN, G. **ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends.** Applied Thermal Engineering, v.60, n. 1-2, p.24-32, Out. 2013.

JANG, J. S. **ANFIS: Adaptive Network Based Fuzzy Inference System.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 23, n. 3, p. 665-685, Maio/Junho 1993.

JEURNINK, T. J. M.; BRINKMAN, D. W. **The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey.** Dairy Journal, Ireland, v. 4, p. 347-368, 1994.

KUNIGK, L. **Ação do ácido peracético sobre microrganismos contaminantes do processo cervejeiro.** São Paulo, Faculdade de Ciências Farmacêuticas, USP, 1998, 130p. Tese (Doutorado).

LEE, C.C. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, part I and II.** IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, v. 20, n. 2, p. 404-435, Março/Abril 1990.

MATHWORKS. **GUI development for SIMULINK models.** Disponível: < <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32888-gui-development-for-simulink-models?focused=6131503&tab=function>>. Acesso em: 14 abril 2019.

MELERO JR., V.; AUGUSTO, S. R.; KUNIGK, L.; SISLIAN, R.; FILHO, U. C.; GEDRAITE, R. **Contribuição ao Emprego de Modelos Matemáticos em Sistemas CIP.** Revista UNOPAR Cien. Exatas Tecnol., Londrina, v. 12, n. 1, p. 35-44, Nov. 2013.

MEMISI, N.; MORACANIN, S. V.; MILIJASEVIC, M.; BABIC, J.; DJUKIC, D. **CIP Cleaning Processes in the Dairy Industry.** Procedia Food Science, v. 5, p. 184-186, Set. 2015.

MROZEK, H. **Detergency and disinfection.** Journal of the Society of Dairy

Technology, v. 38, n. 4, p. 119-121, Out. 1985.

NIAMSUWAN, S., KITTISUPAKORN, P., MUJTABA, I. M. **Minimization of water and chemical in the cleaning in place process of a milk pasteurization plant.** Songklanakarin Journal of Science Technology, v. 33, n. 4, p.431-440, Ago. 2011.

OLIVEIRA, L. R., GEDRAITE, R.; COUTINHO FILHO, U.; KUNIGK, L. **Obtenção de modelo empírico para avaliação da quantidade de insumos gastos em um sistema CIP empregado na limpeza de um sistema de pasteurização de leite.** XV Encontro de Modelagem Computacional e III Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais. Nov. 2012.

OLIVER, P.; RODRIGUEZ, R.; UDAQUIOLA, S. **Water use optimization in batch process industries. Part 1: design of the water network.** Journal of cleaner production, v. 16, n. 12, p. 1275-1286, Ago. 2008.

PARK, K. -P.; JO, A. -R.; CHOI J. -W. **A study on the key performance indicator of the dynamic positioning system.** International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, v. 8, n. 5, p.511-518, Set. 2016.

PRASAD, K.; GORAI, A., K.; LUZÓN, G.; GOIAL, P. **Development of ANFIS models for air quality forecasting and input optimization for reducing the computational cost and time.** Atmospheric Environment, v. 128, p. 246-262, Jan. 2016.

RAHMAN, M. S.; RASHID, M. M.; HUSSAIN, M. A. **Thermal conductivity prediction of foods by Neural Network and Fuzzy (ANFIS) modeling techniques.** Food and Bioproduct Processing, v.90, n. 2, p.333-340, Abril 2012.

RODRIGUEZ, R. R.; SAIZ, J. J. A.; BAS, A. O. **Quantitative relationships between key performance indicators for supporting decision-making processes.** Computers in Industry, v.60, n. 2, p.104-113, Fev. 2009.

SABESP. **Tabela de tarifas. Comunicado 03/2016.** Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_03_2016.pdf>. Acesso em: 03 de março de 2018.

SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S. **Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity.** Food Research International, v.36, n. 9, p.617-623, Jan. 2003.

SCHMIDT, R. H. **Basic elements of equipment cleaning and sanitizing in food processing and handling operations.** Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1997.

SIMÕES, M.G.; SHAW, I.S. **Controle e modelagem fuzzy.** São Paulo: Edgard Blucher. 2007, 165 p.

SISLIAN, R. **Estudo de Sistema de Limpeza CIP Usando Identificação de Sistemas.** Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2012. 160 p. Dissertação (Mestrado).

SISLIAN, R.; SILVA, F. V.; GEDRAITE, R.; JOKINEN, H.; RAJAN, D. K. **Development of a Low-cost Fuzzy Gain Schedule Neutralization Control System.** Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science – San Francisco, v. 2, p. 575-578, 2015.

SISLIAN, R., SILVA, F. V., GEDRAITE, R., KUNIGK, L; AUGUSTO, S. R. e MELERO JR., V.. **Modelagem Neuro-Fuzzy da Cinética de Remoção de Resíduos de Detergente em Sistemas de Limpeza CIP – Uma Abordagem Experimental.** XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ 2012, Búzios, RJ, 2012, p. 8694-8703.

TUGNOLI, A.; LANDUCCI, G.; SALZANO, E.; COZZANI, V. **Supporting the selection of process and plant design options by Inherent Safety KPIs.** Journal of Loss Prevention in the Process Industries. v. 25, n. 5, p. 830–842, Set. 2012.

UM, J.; GONTARZ, A.; STROUD, I. **Developing Energy Estimation Model Based on Sustainability KPI of Machine Tools.** Procedia CIRP, v. 26, p. 217-222, Mar. 2015.

VICARIA, J. M.; ALTMAJER-VAZ, D.; LUZÓN, G.; JIMÉNEZ-PÉREZ, J. L.; MOYA-RAMÍREZ, I.; JURADO, E. **Experimental studies and modelling of a simplified CIP system using ozone and linear alkylbenzenesulfonate.** Chemical Engineering Journal, v. 287, p. 130-138, Dez. 2015.

APÊNDICE A – Respostas temporais de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido

Figura A.1 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 4,0 L.min⁻¹

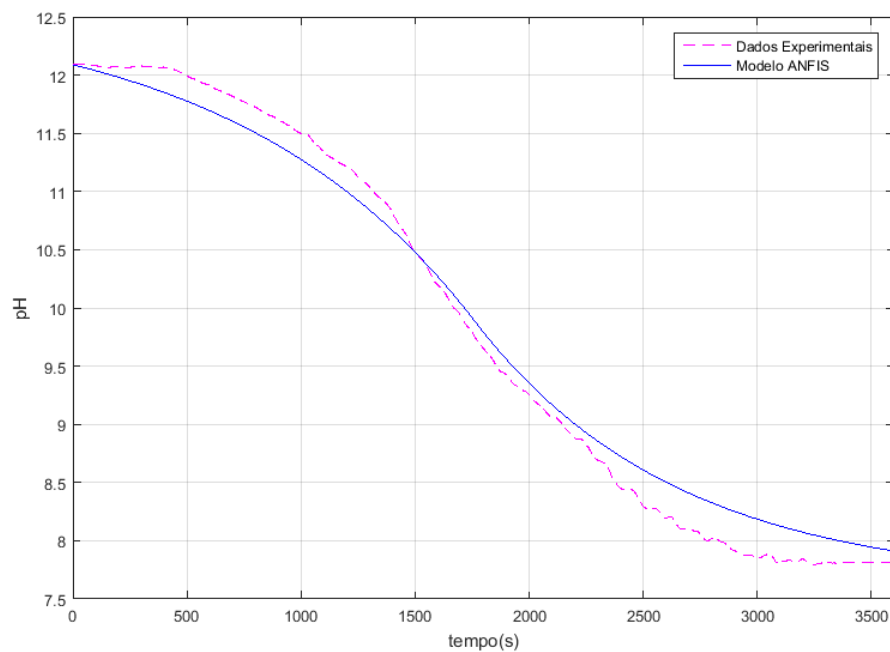


Figura A.2 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 4,0 L.min⁻¹

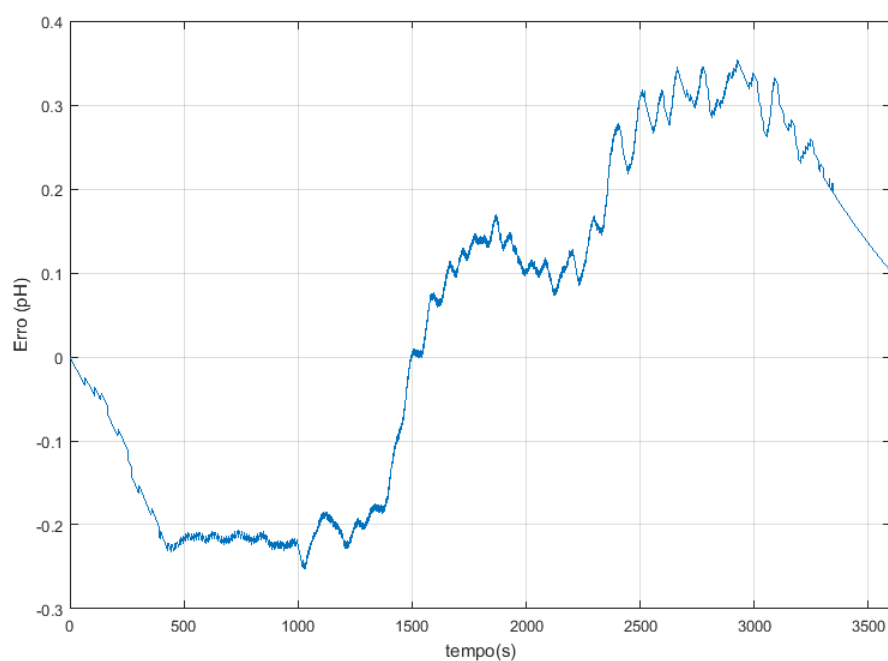


Figura A.3 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 6,0 L.min⁻¹

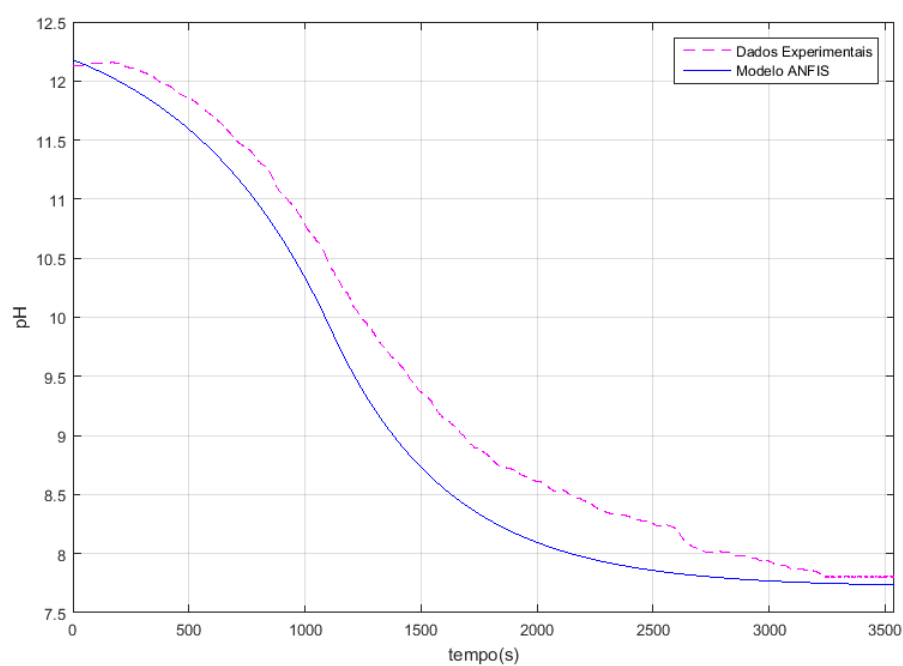


Figura A.4 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 6,0 L.min⁻¹

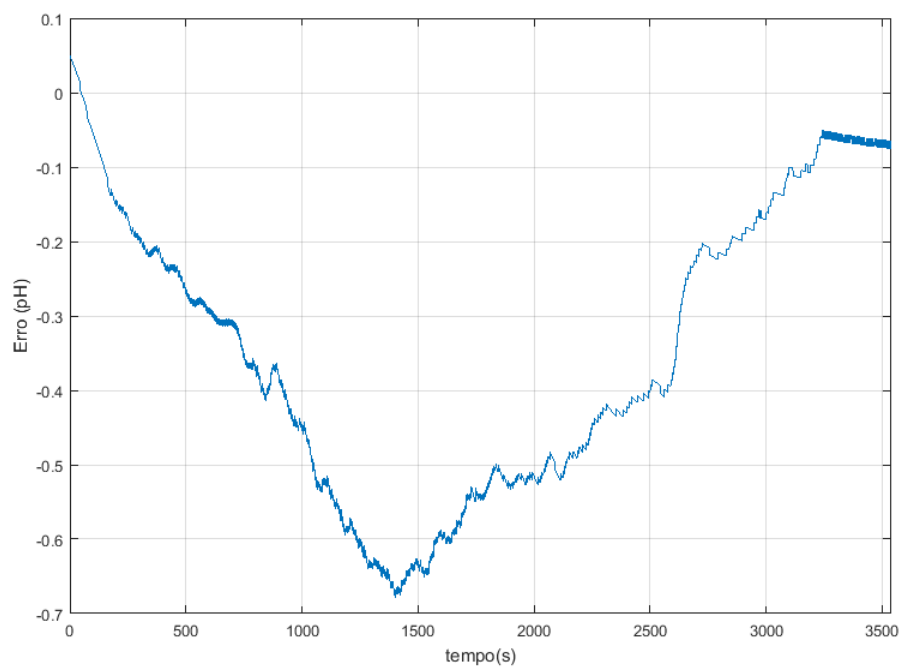


Figura A.5 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 9,0 L.min⁻¹

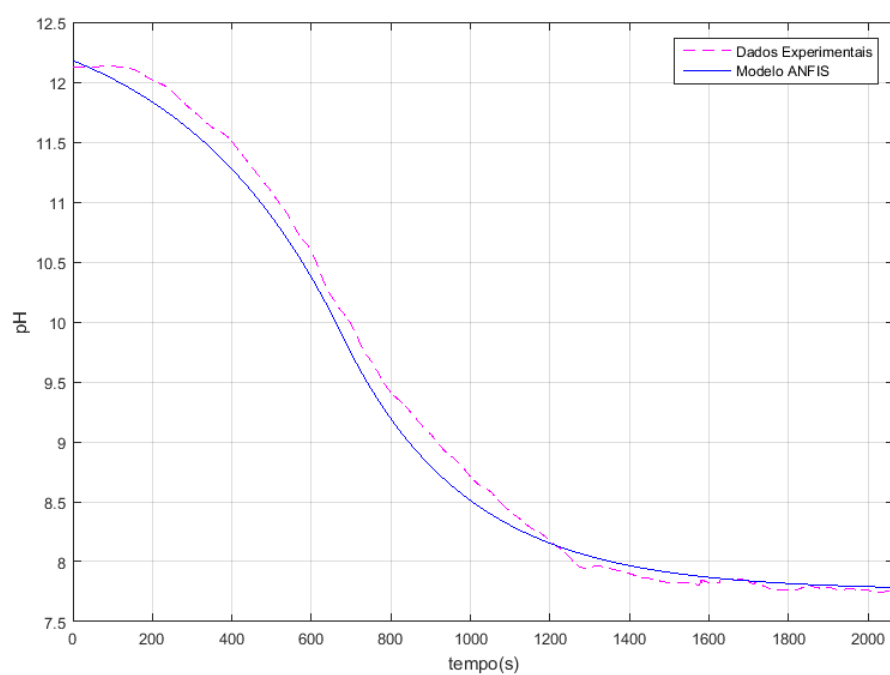


Figura A.6 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 9,0 L.min⁻¹

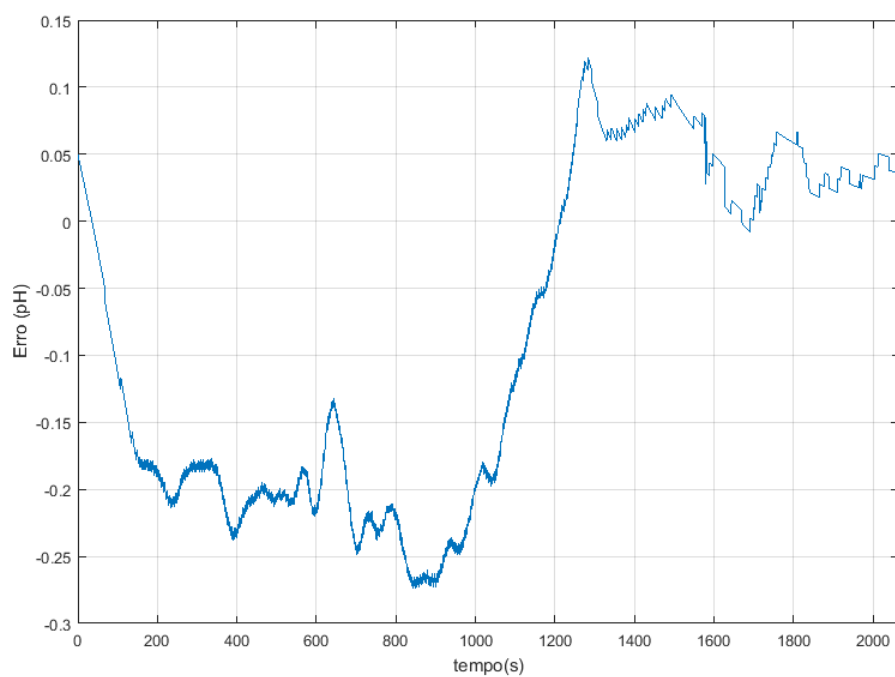


Figura A.7 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 10,5 L.min⁻¹

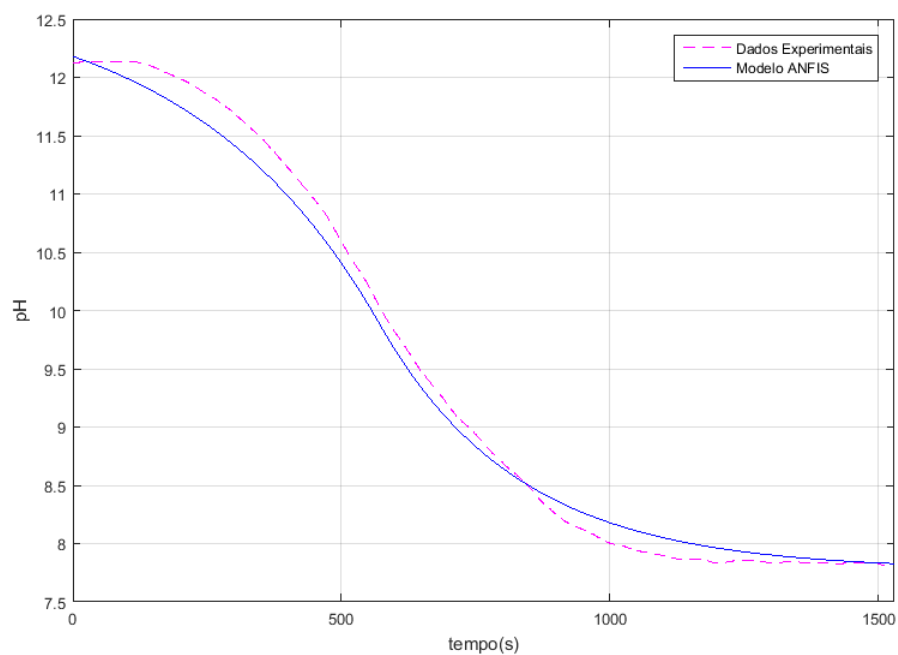


Figura A.8 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 10,5 L.min⁻¹

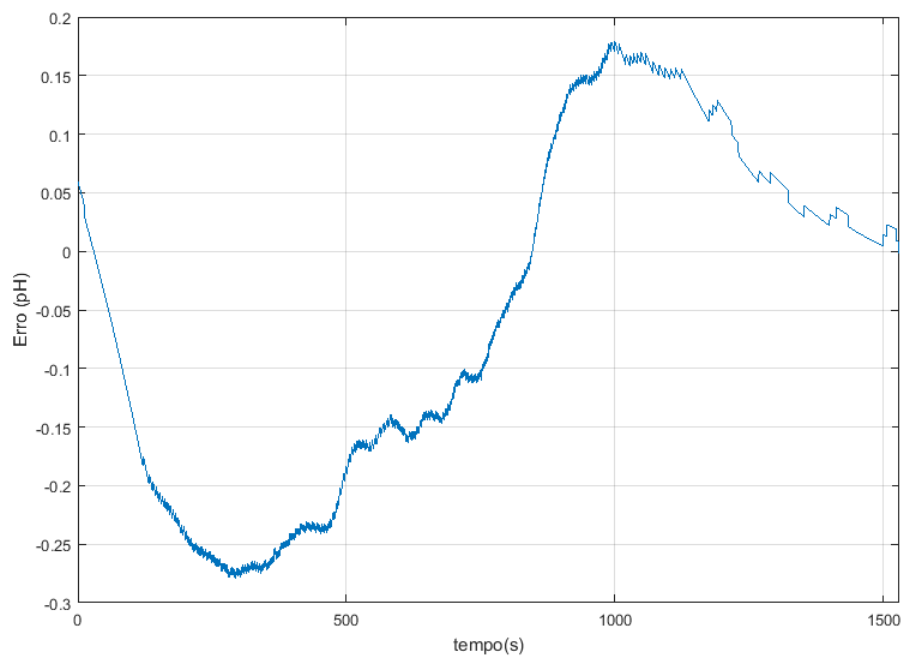


Figura A.9 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 12,0 L.min⁻¹

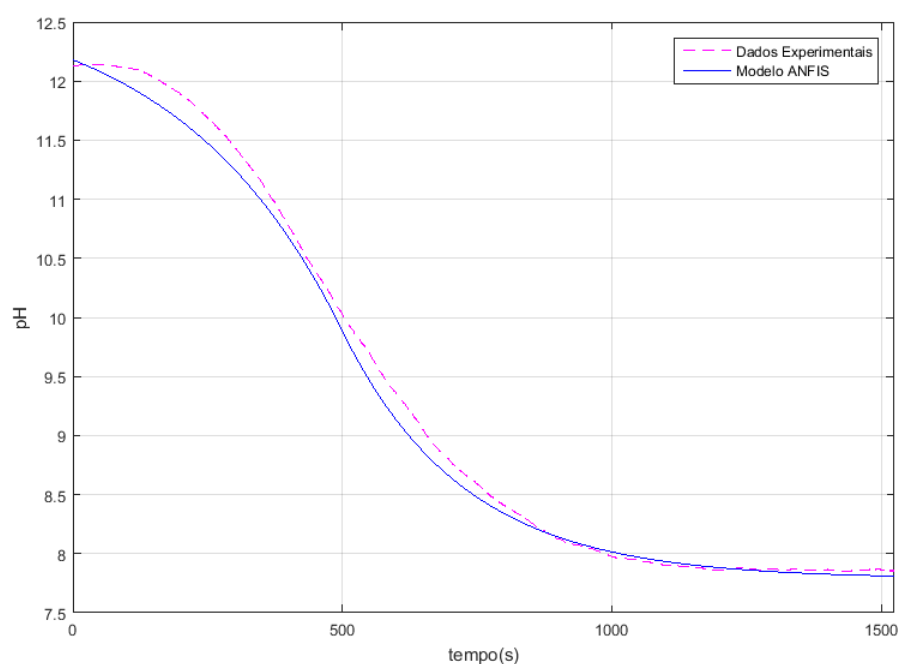


Figura A.10 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 12,0 L.min⁻¹

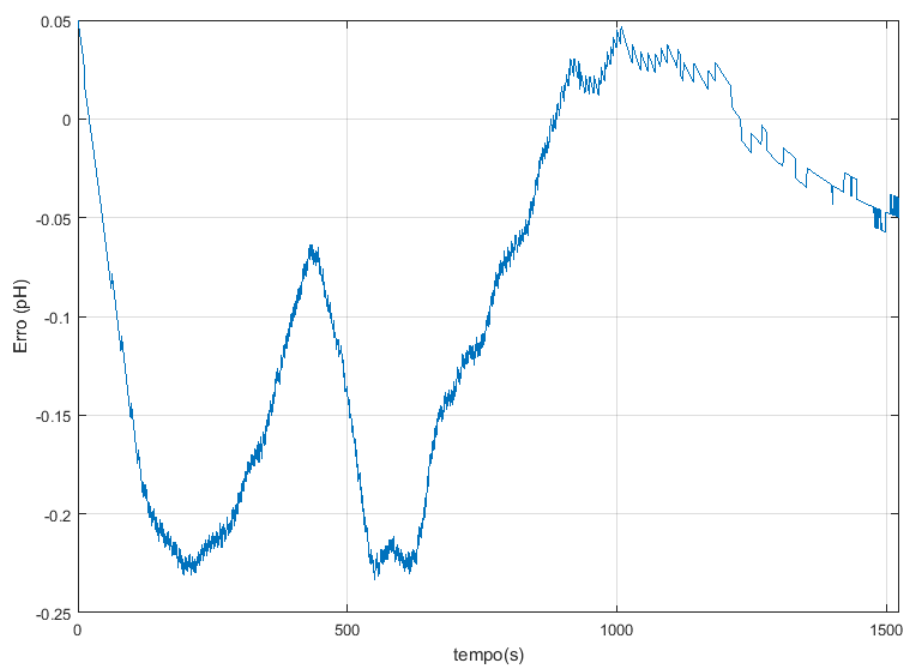


Figura A.11 – Resposta temporal de comparação entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 16 L.min⁻¹

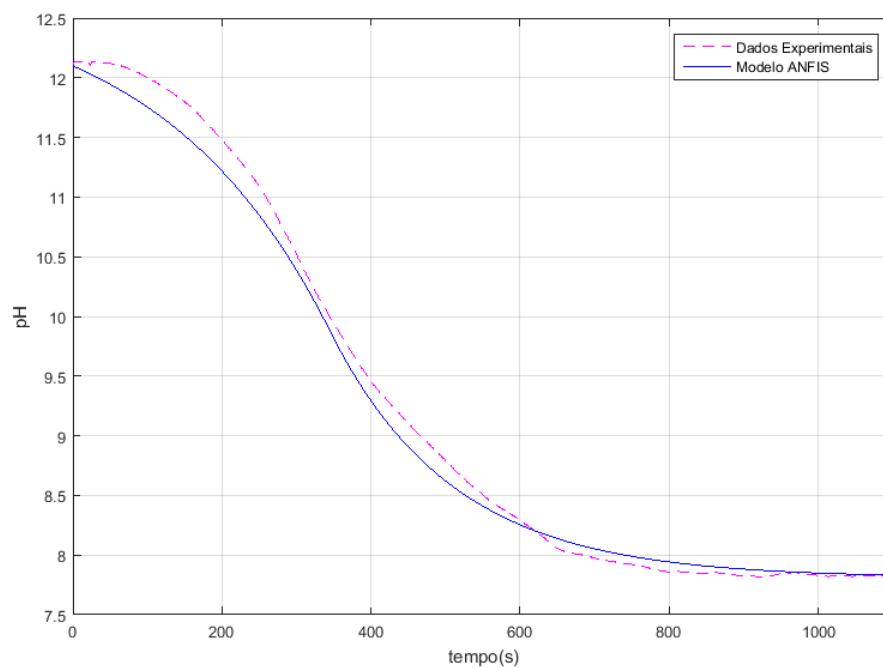
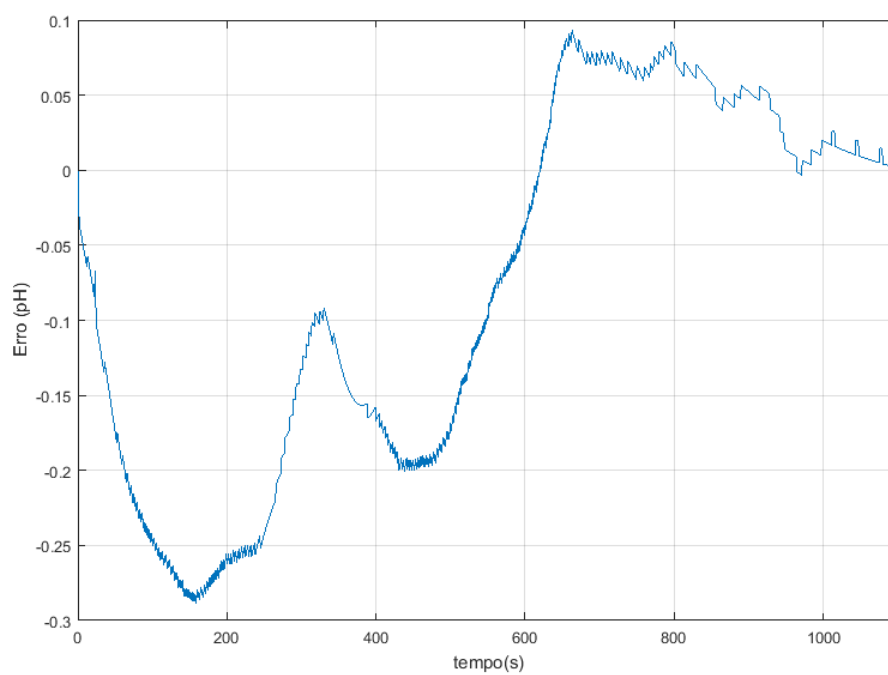


Figura A.12 – Resposta temporal do erro entre os dados experimentais e o Modelo ANFIS desenvolvido para a vazão de 16 L.min⁻¹





APÊNDICE C – Comportamentos temporais das simulações com set-point de água de enxágue variável

Figura C.1 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $6,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

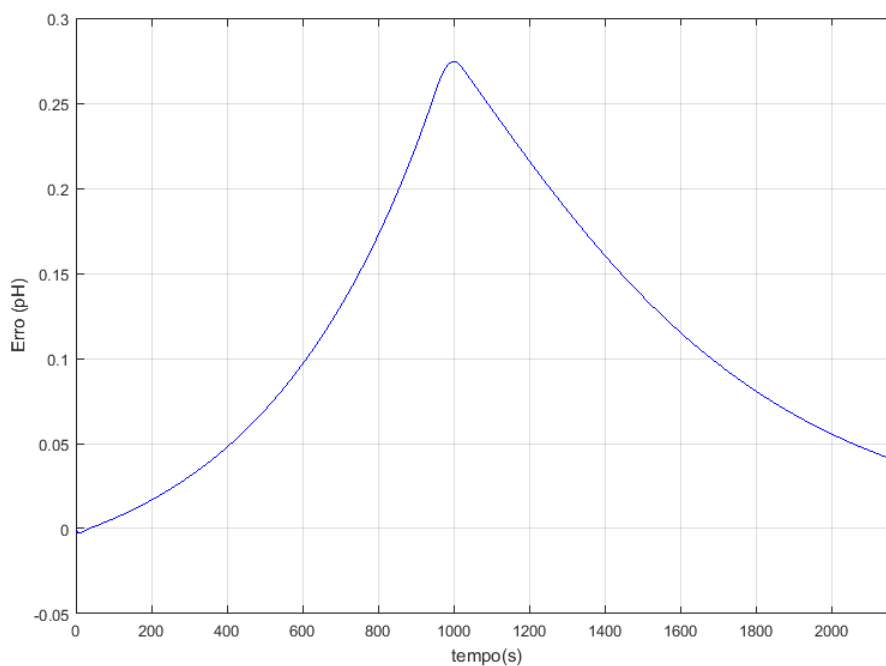


Figura C.2 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $6,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

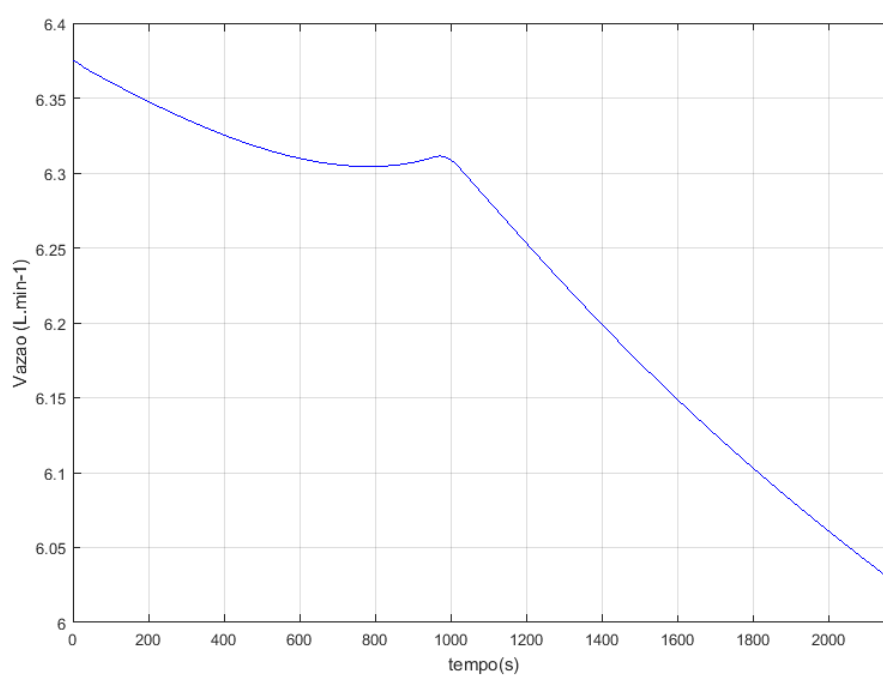


Figura C.3 – Comportamento temporal do comportamento do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 6,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

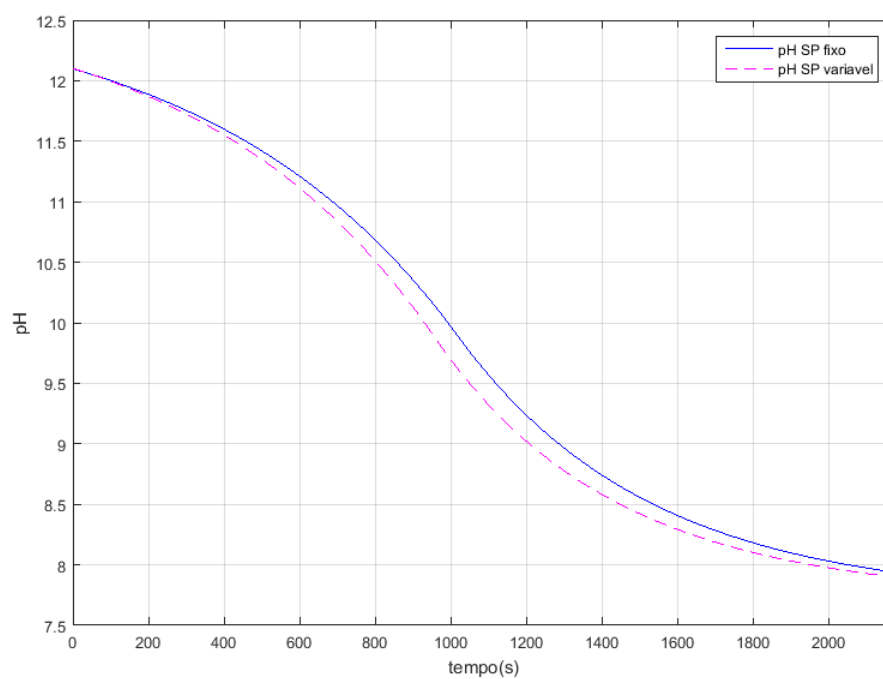


Figura C.4 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 8,0 L.min⁻¹ e set-point variável

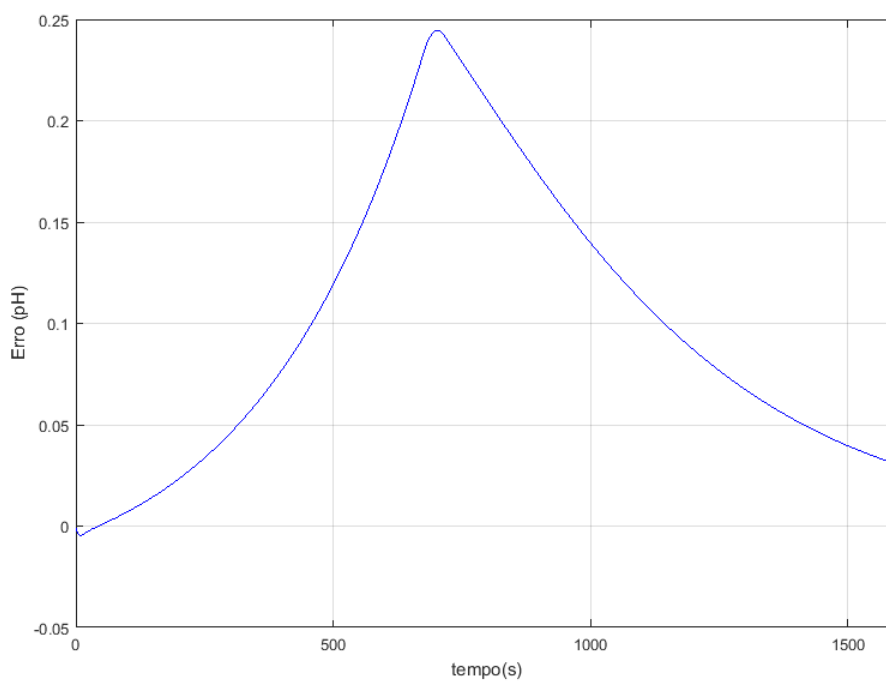


Figura C.5 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 8,0 L.min⁻¹)

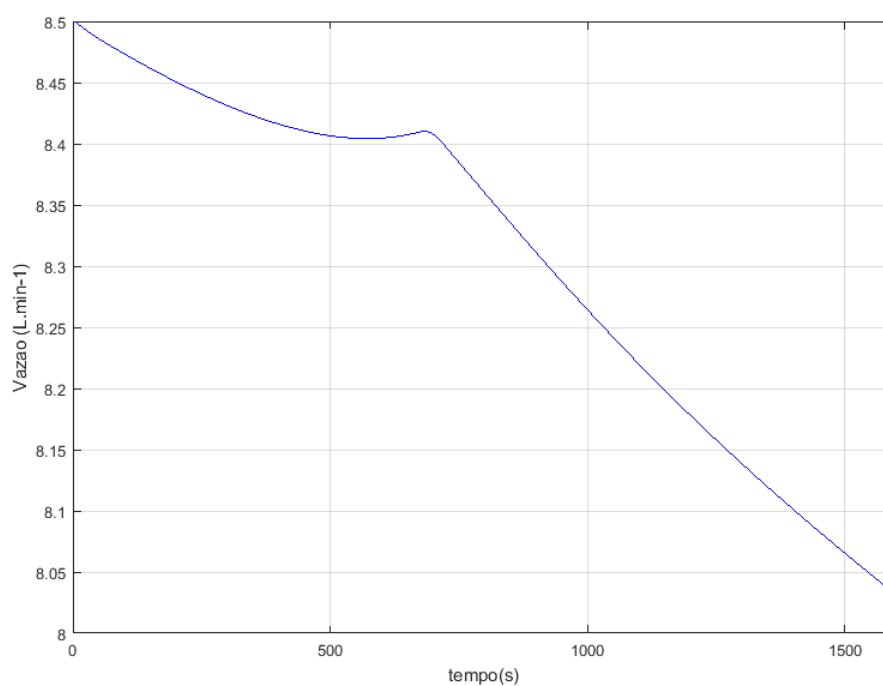


Figura C.6 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 8,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

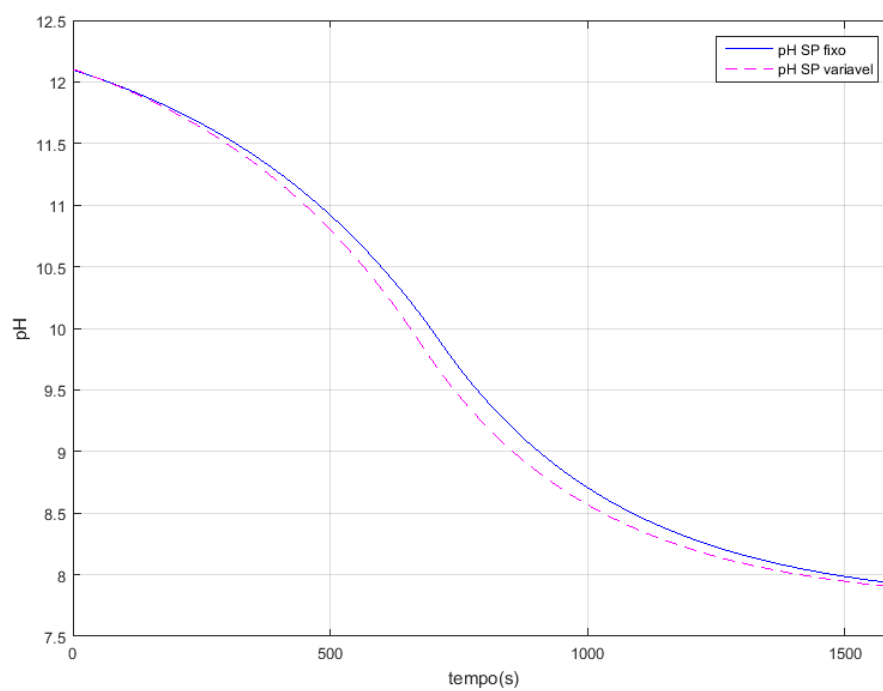


Figura C.7 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

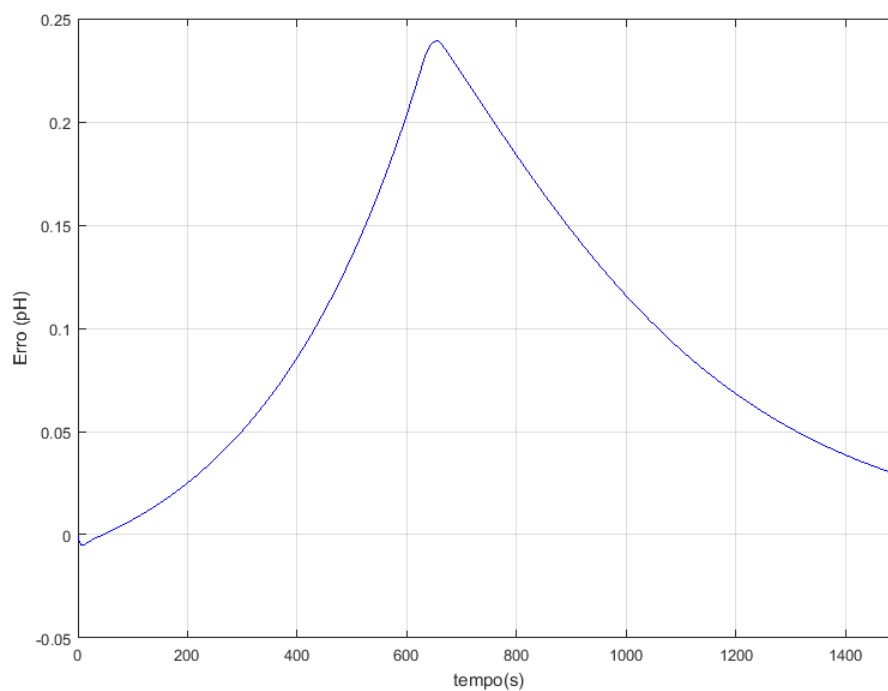


Figura C.8 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue ($\text{LSP} = 8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

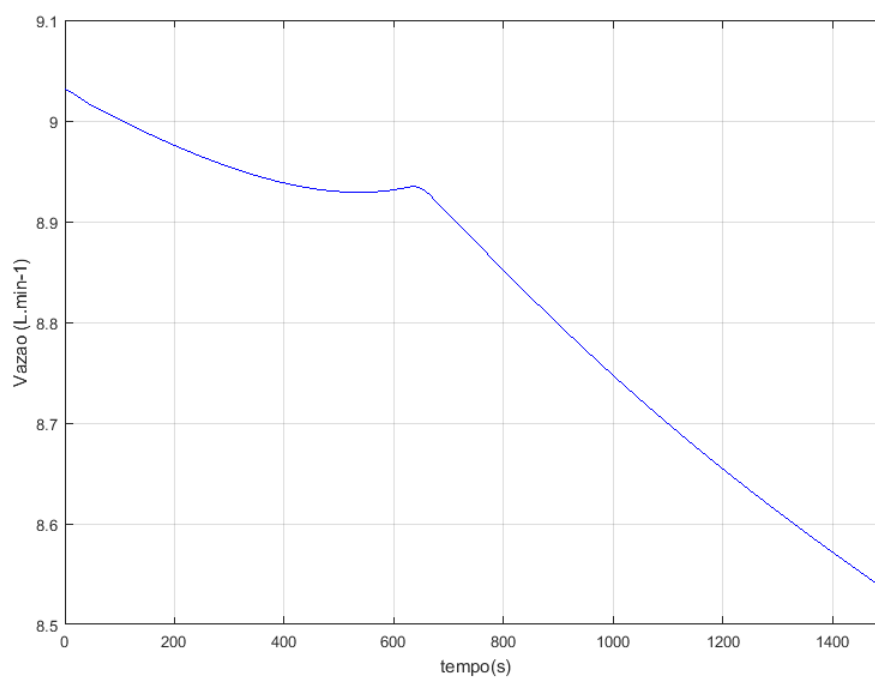


Figura C.9 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo ($LSP = 8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) e para o set-point variável (WSP)

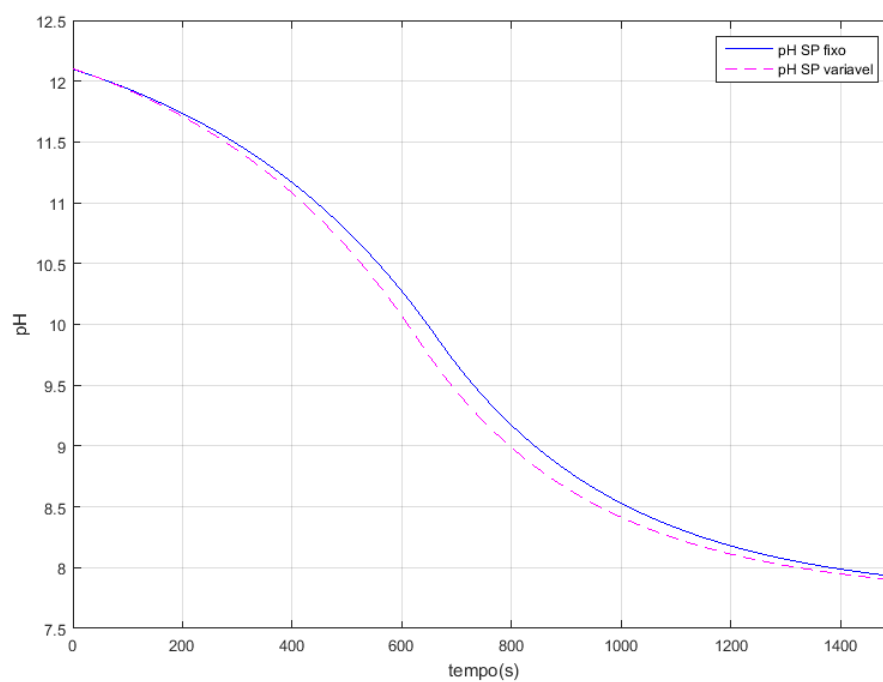


Figura C.10 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $9,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

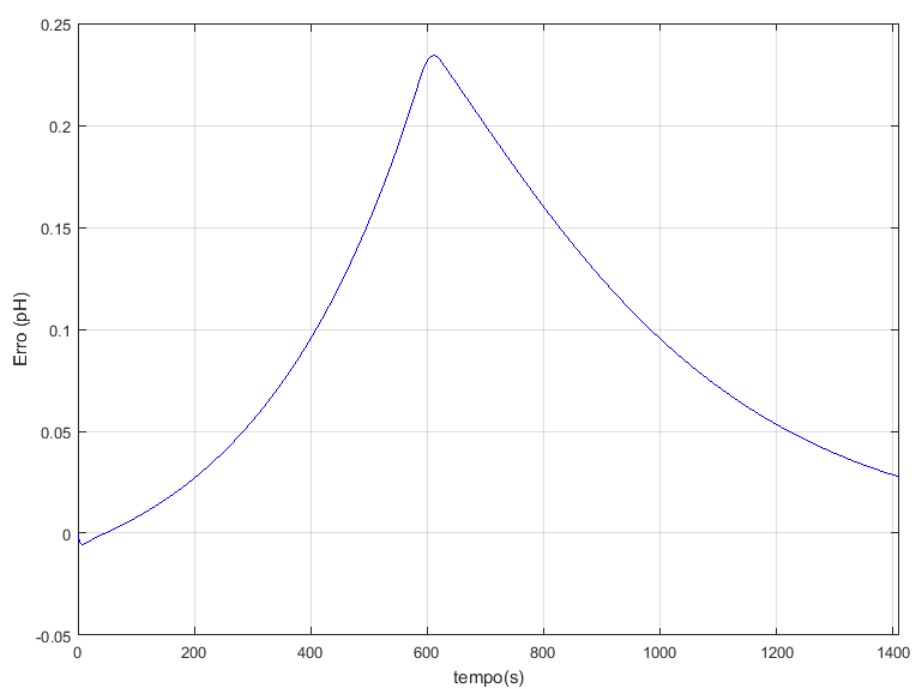


Figura C.11 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 9,0 L.min⁻¹)

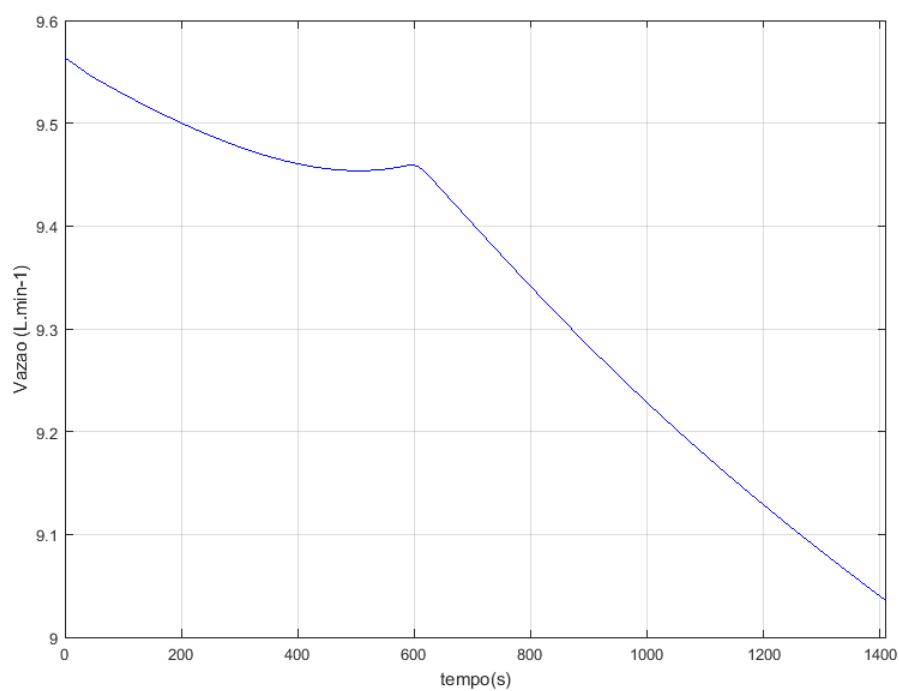


Figura C.12 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 9,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

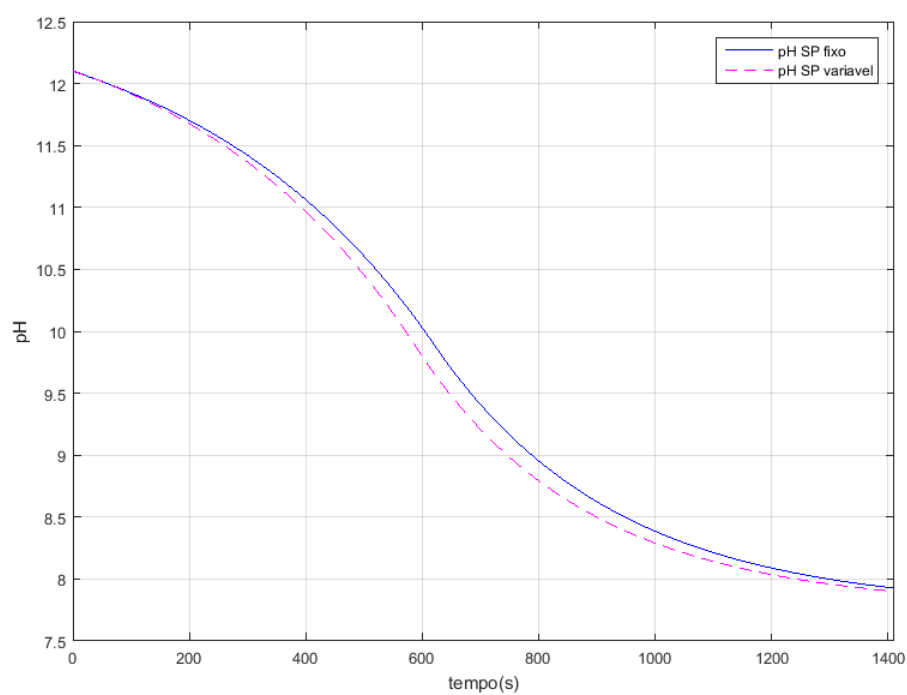


Figura C.13 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $9,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

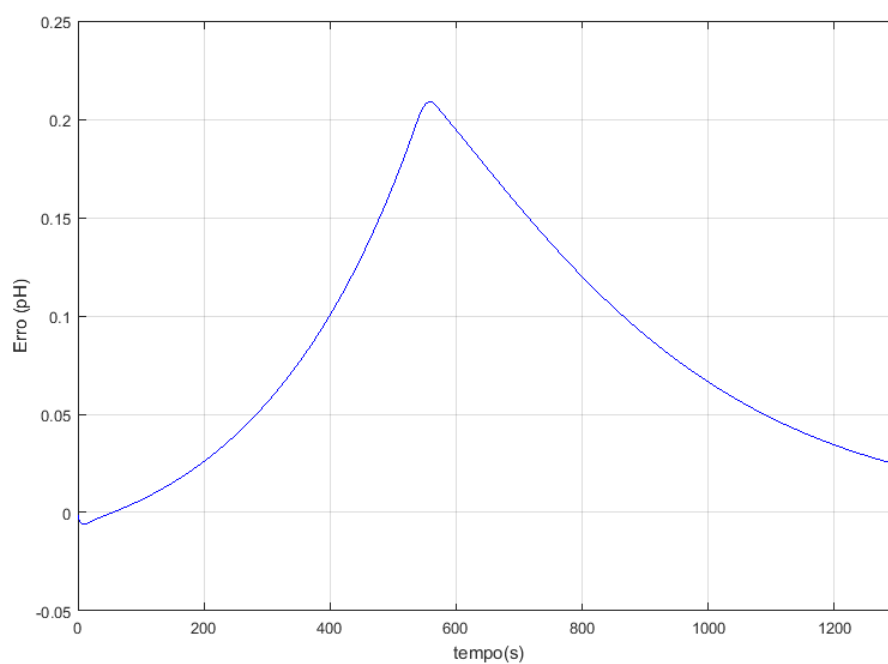


Figura C.14 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $9,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

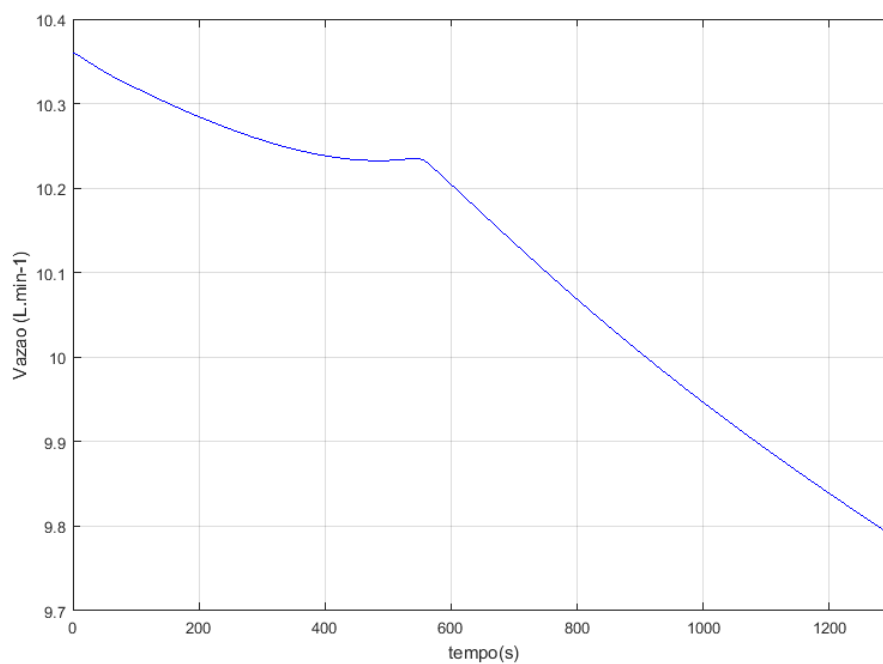


Figura C.15 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 9,75 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

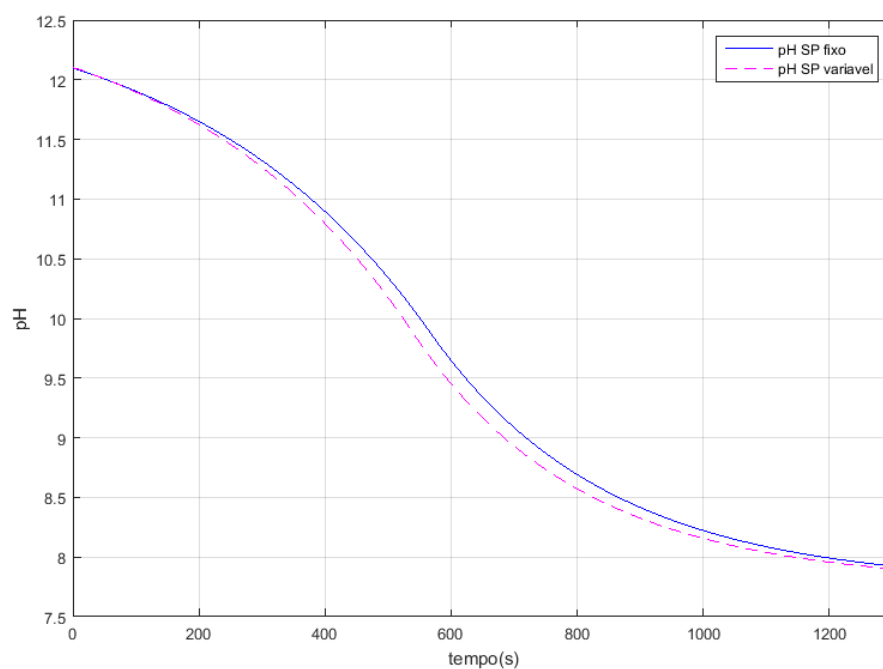


Figura C.16 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 10,0 L.min⁻¹ e set-point variável

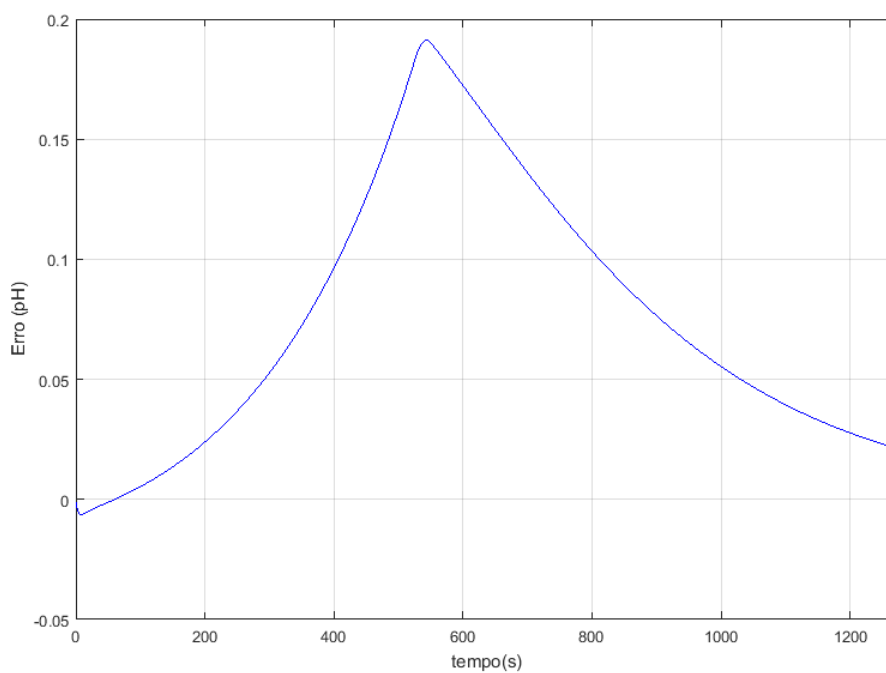


Figura C.17 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 10,0 L.min⁻¹)

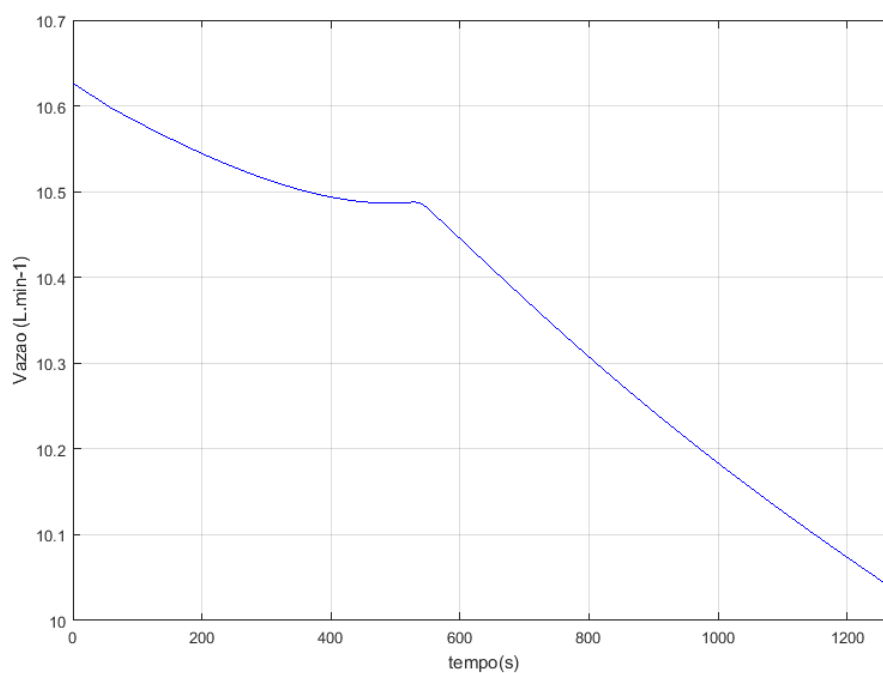


Figura C.18 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 10,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

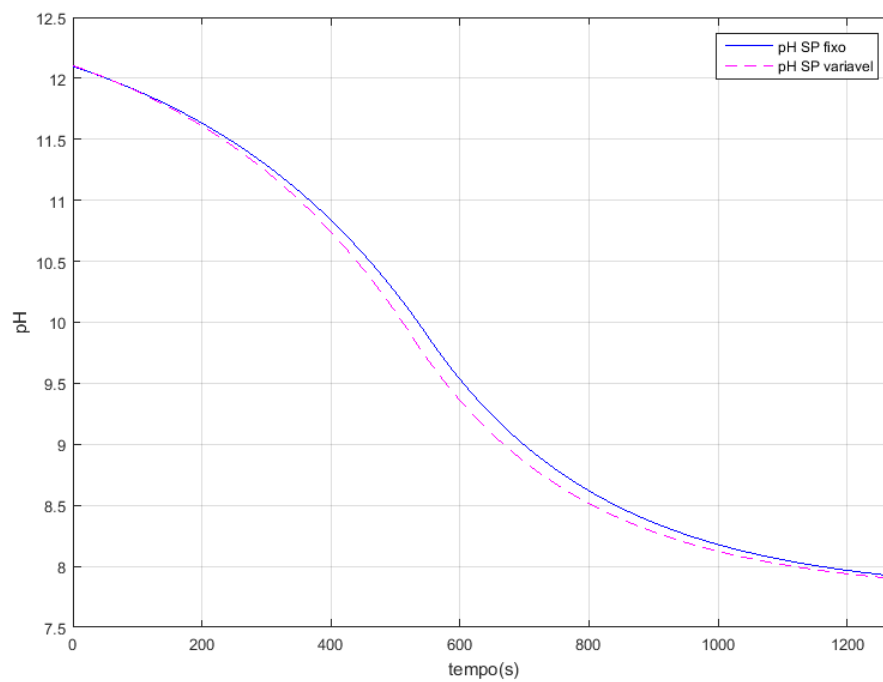


Figura C.19 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $10,25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

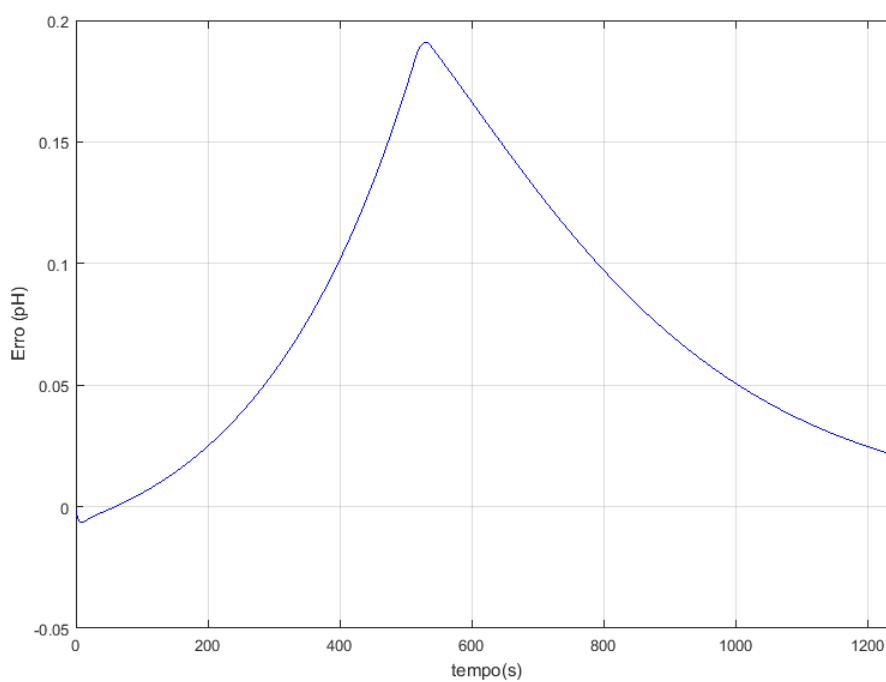


Figura C.20 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $10,25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

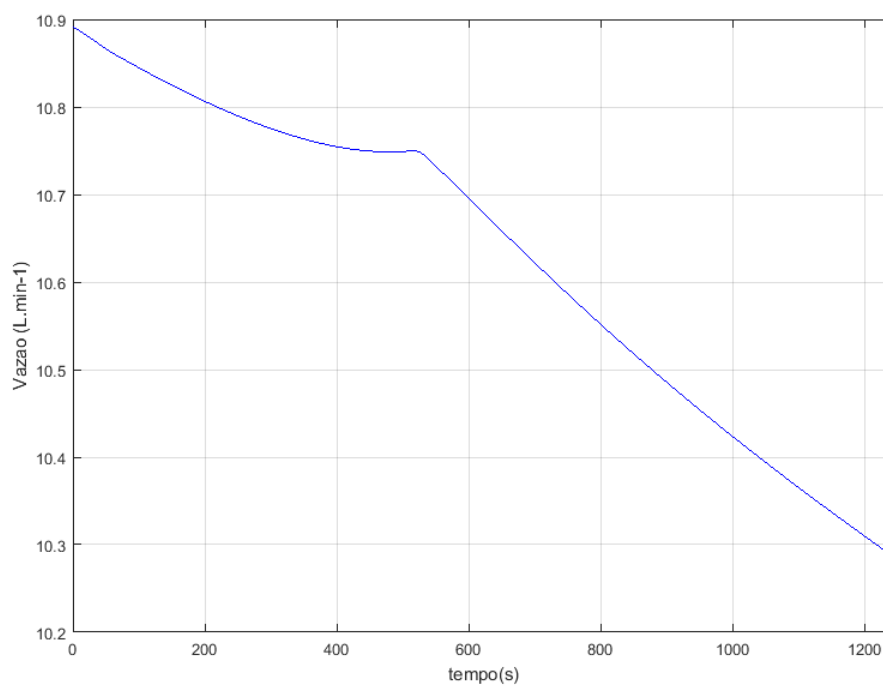


Figura C.21 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 10,25 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

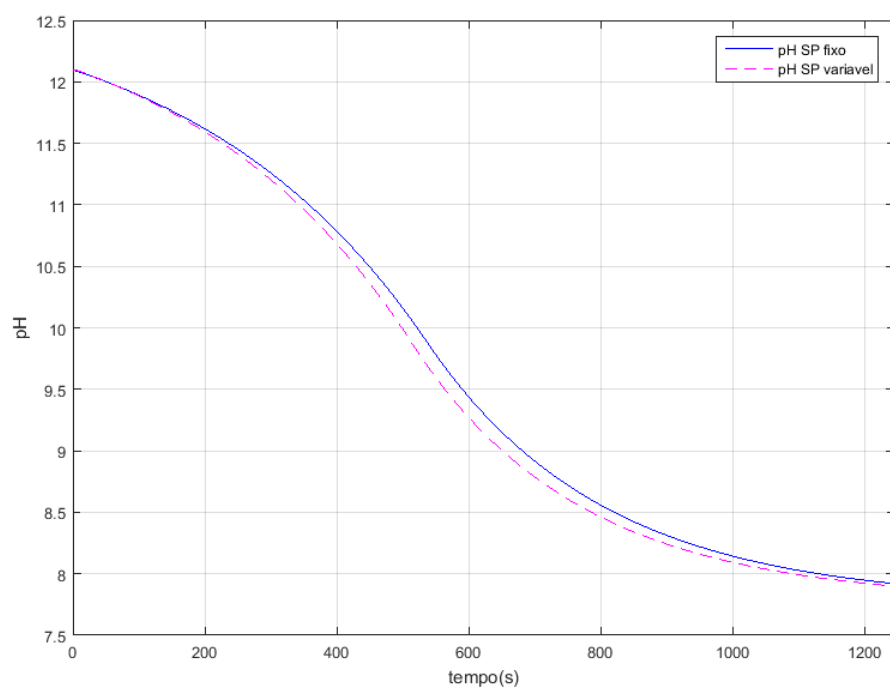


Figura C.22 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 10,5 L.min⁻¹ e set-point variável

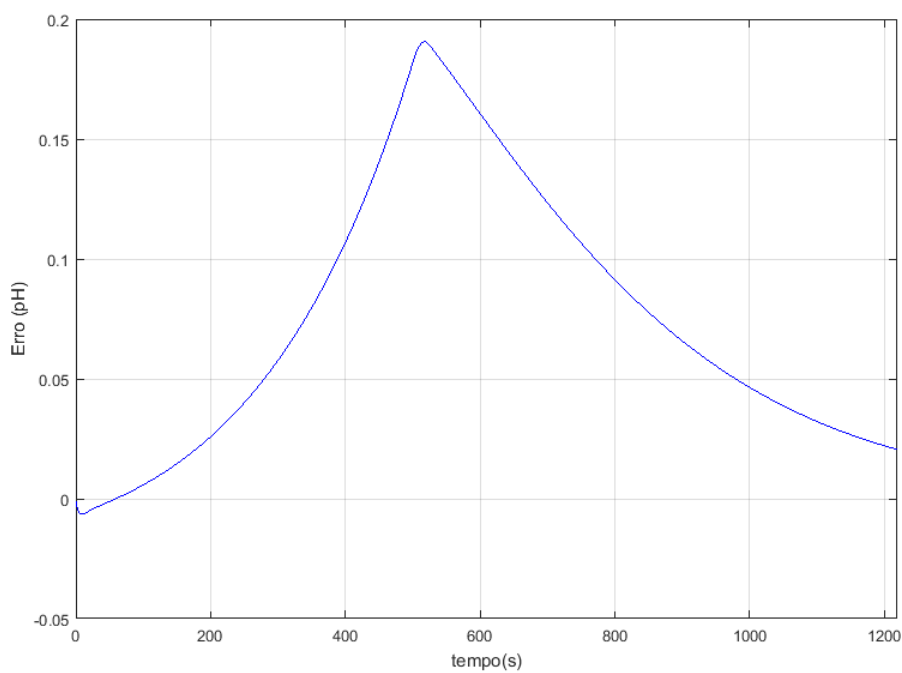


Figura C.23 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 10,5 L.min⁻¹)

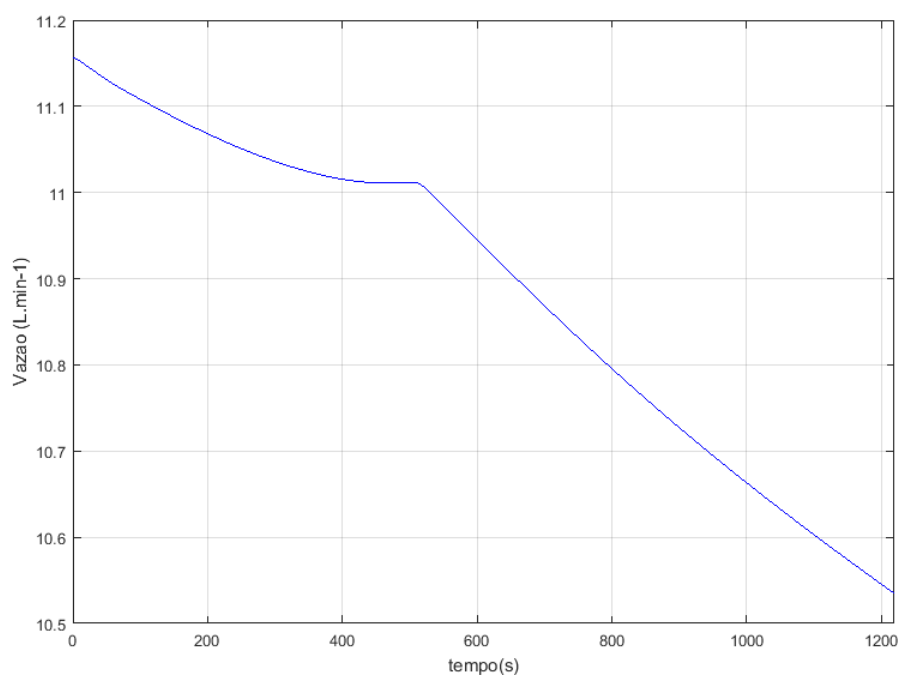


Figura C.24 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 10,5 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

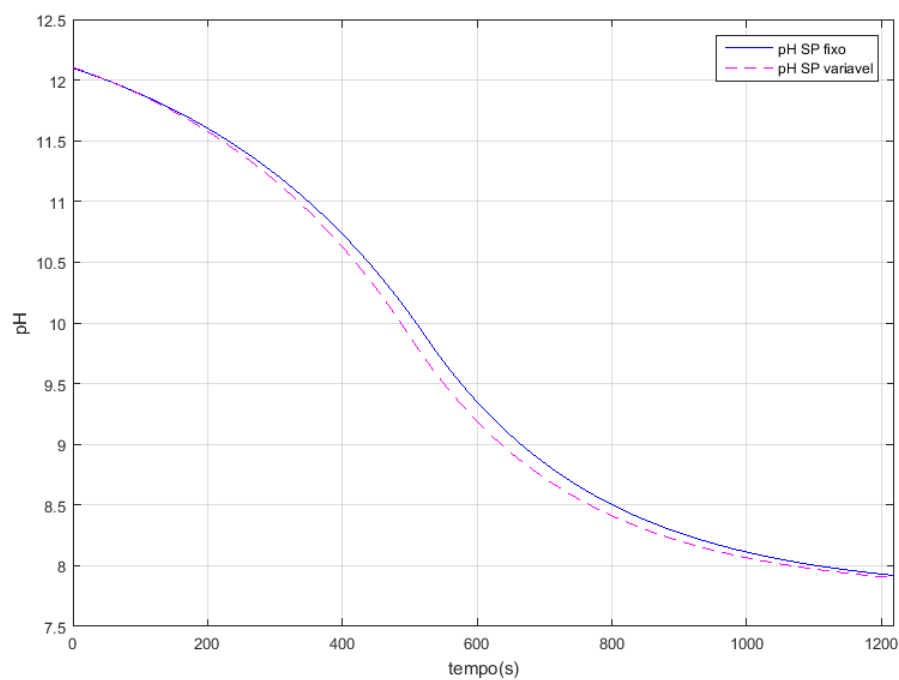


Figura C.25 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $11,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

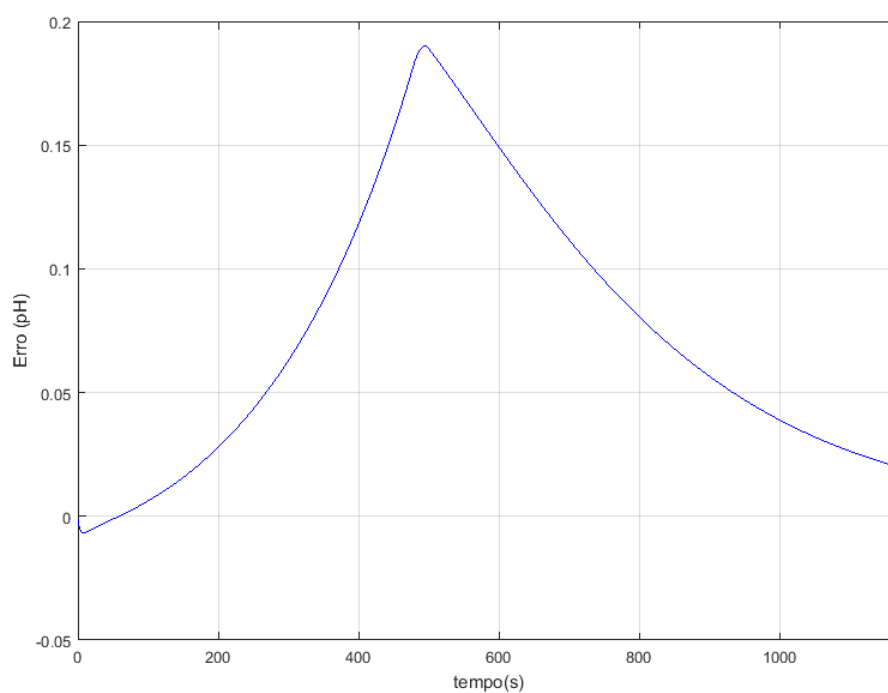


Figura C.26 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $11,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

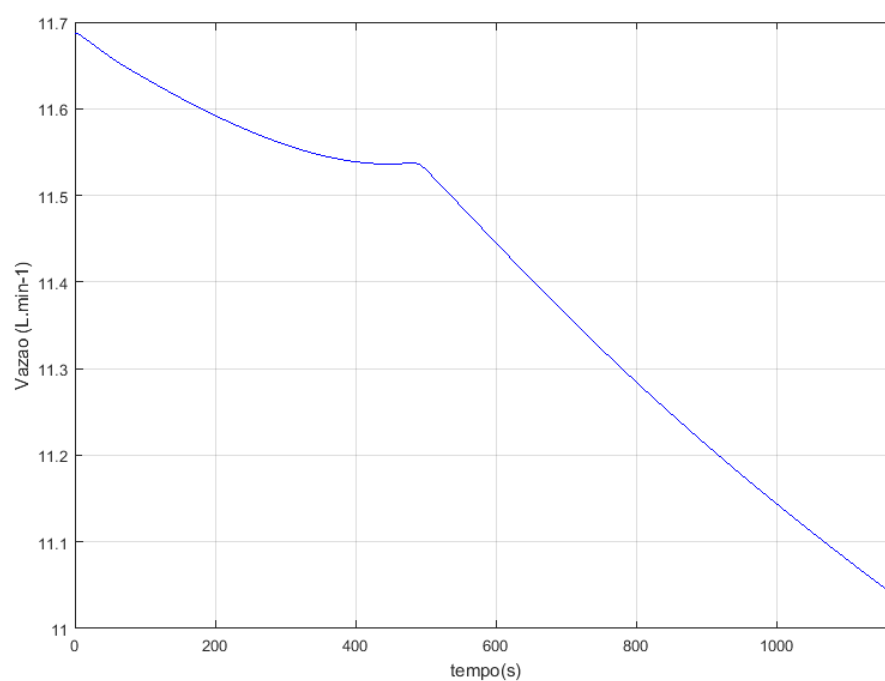


Figura C.27 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 11,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

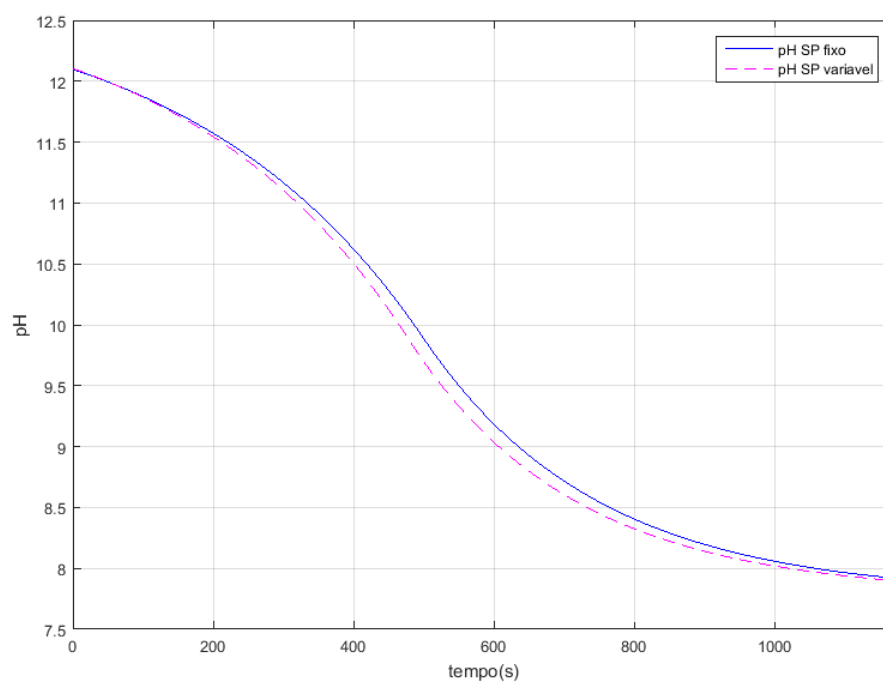


Figura C.28 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 11,5 L.min⁻¹ e set-point variável

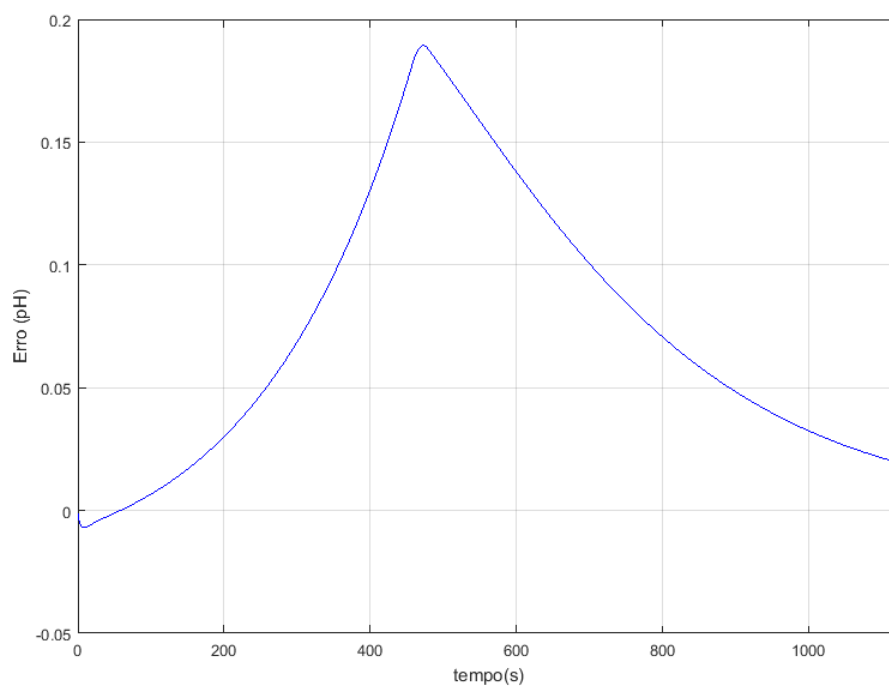


Figura C.29 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 11,5 L.min⁻¹)

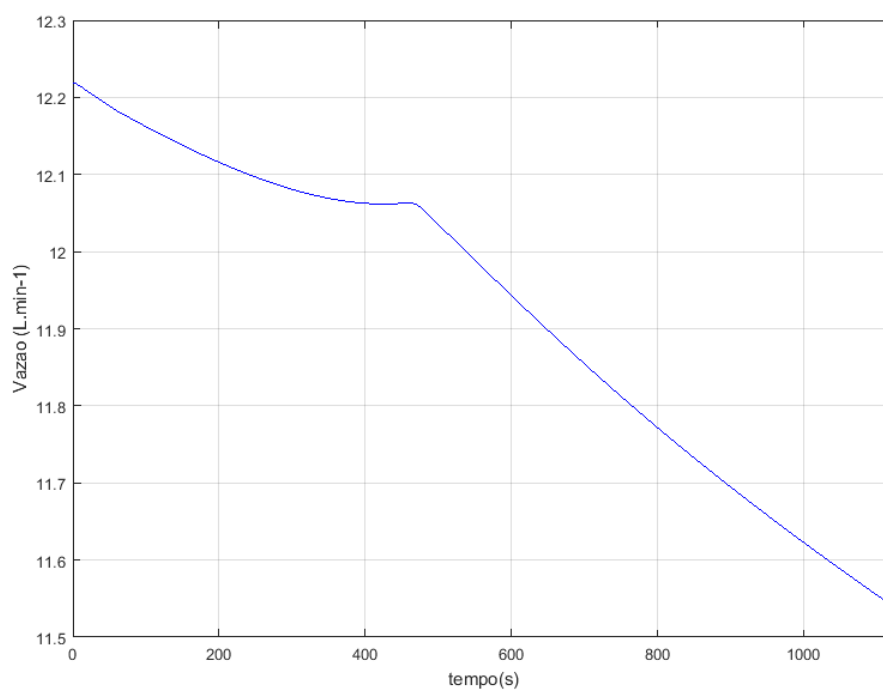


Figura C.30 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 11,5 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

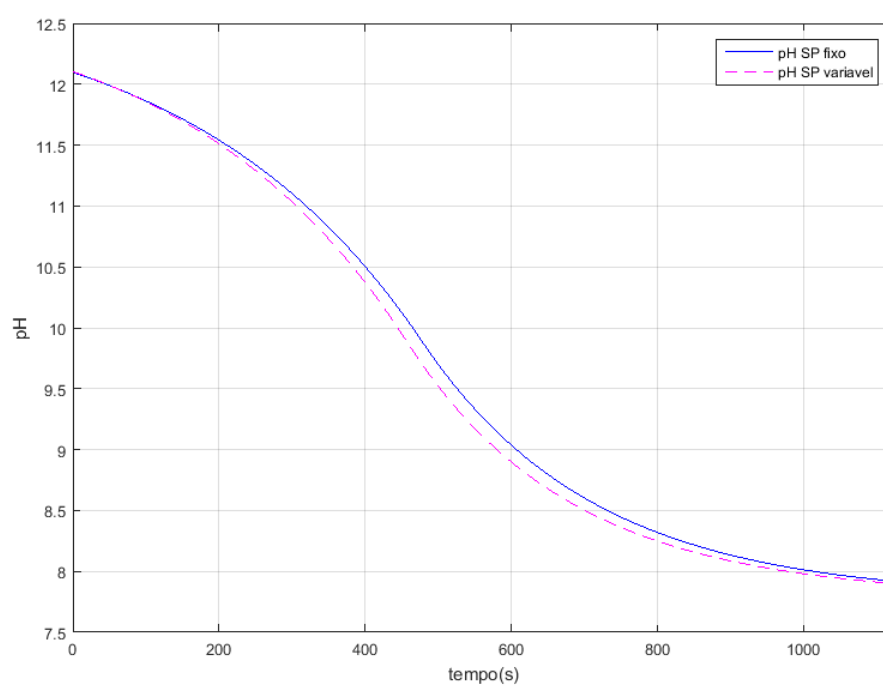


Figura C.31 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $12,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

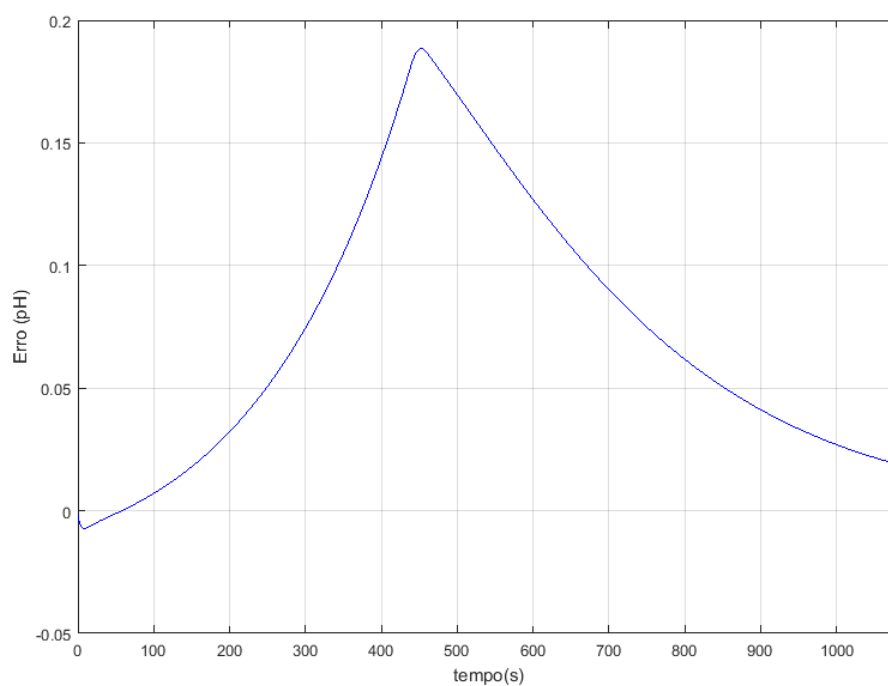


Figura C.32 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $12,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

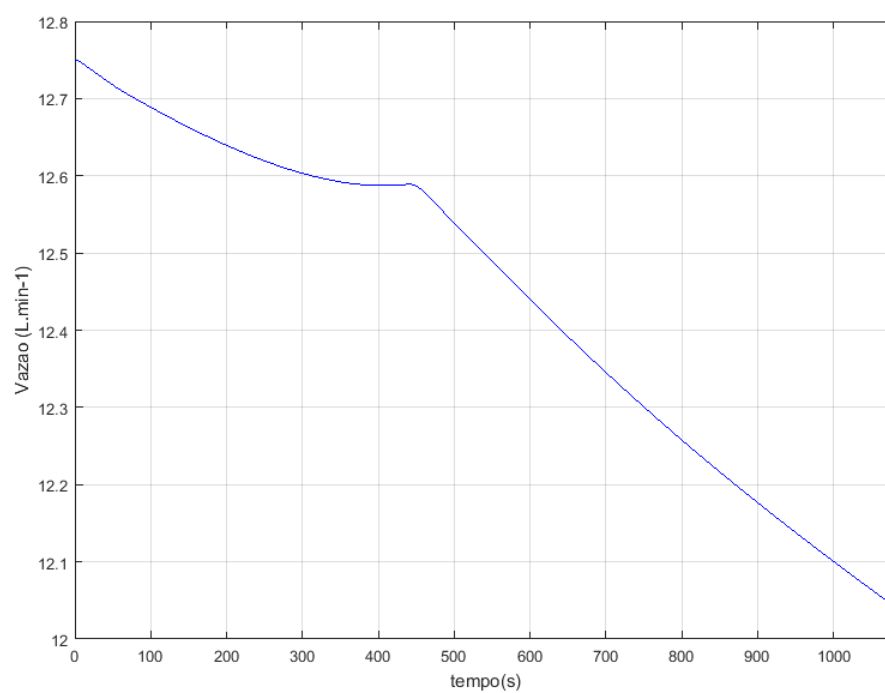


Figura C.33 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 12,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

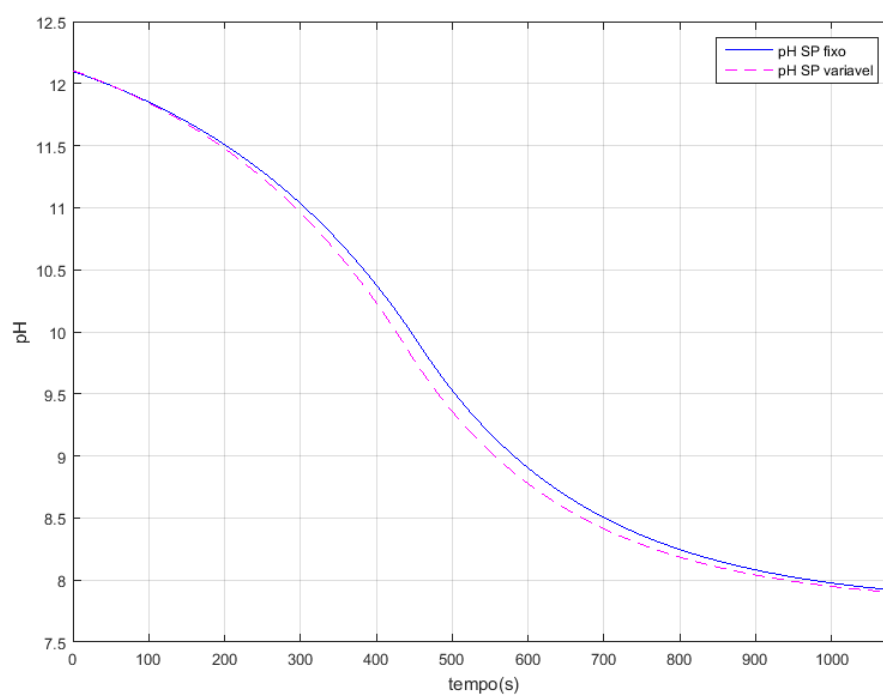


Figura C.34 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue 13,0 L.min⁻¹ e set-point variável

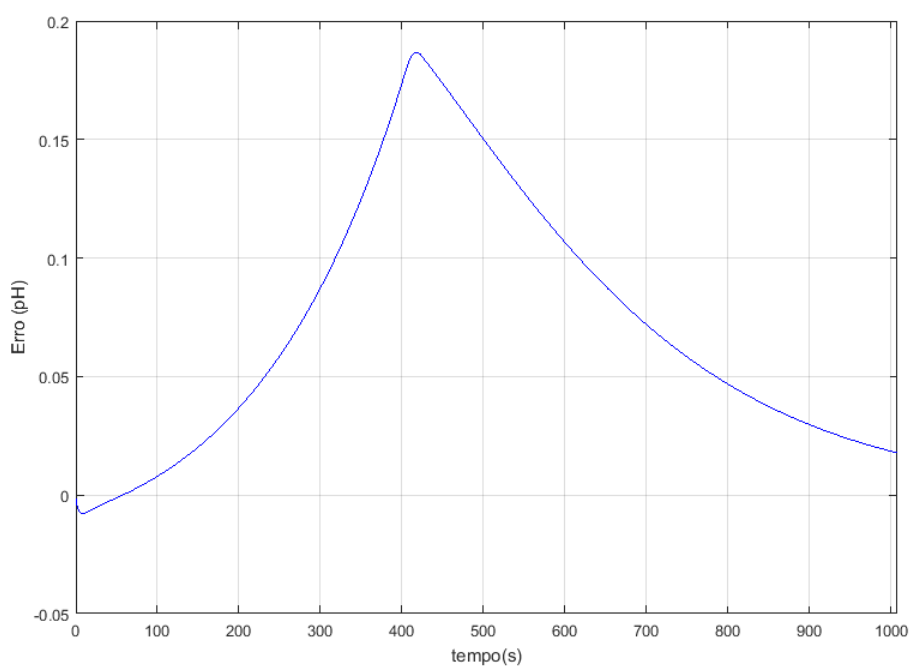


Figura C.35 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= 13,0 L.min⁻¹)

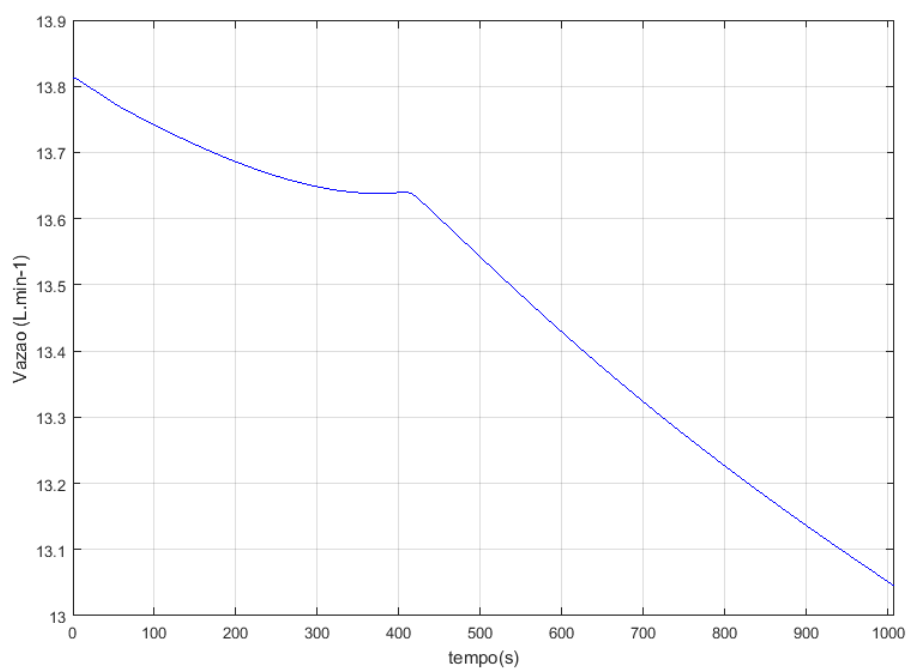


Figura C.36 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 13,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)

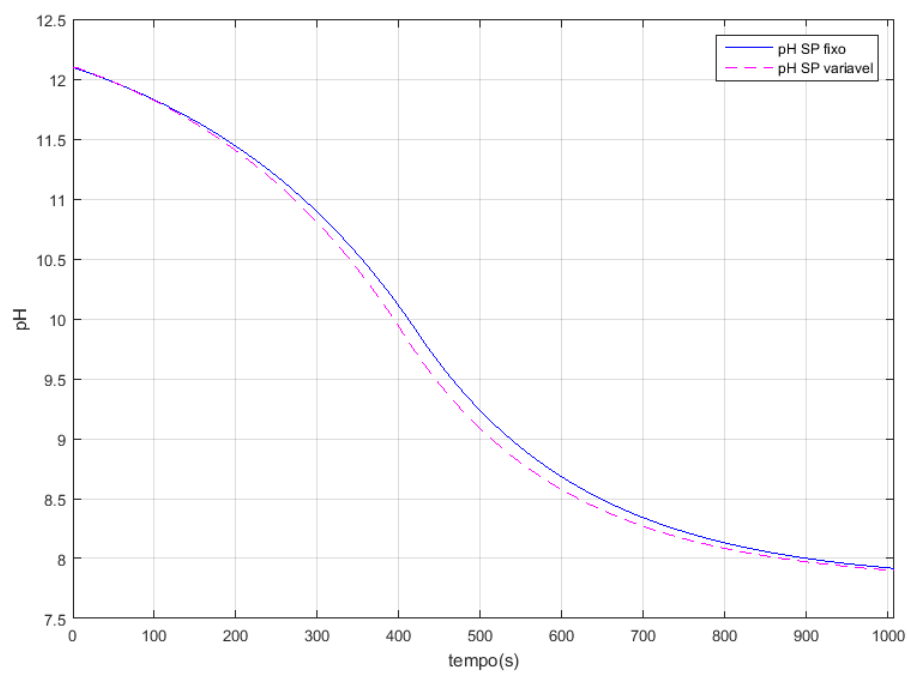


Figura C.37 – Comportamento temporal do erro entre o pH com set-point de vazão água de enxágue $15,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e set-point variável

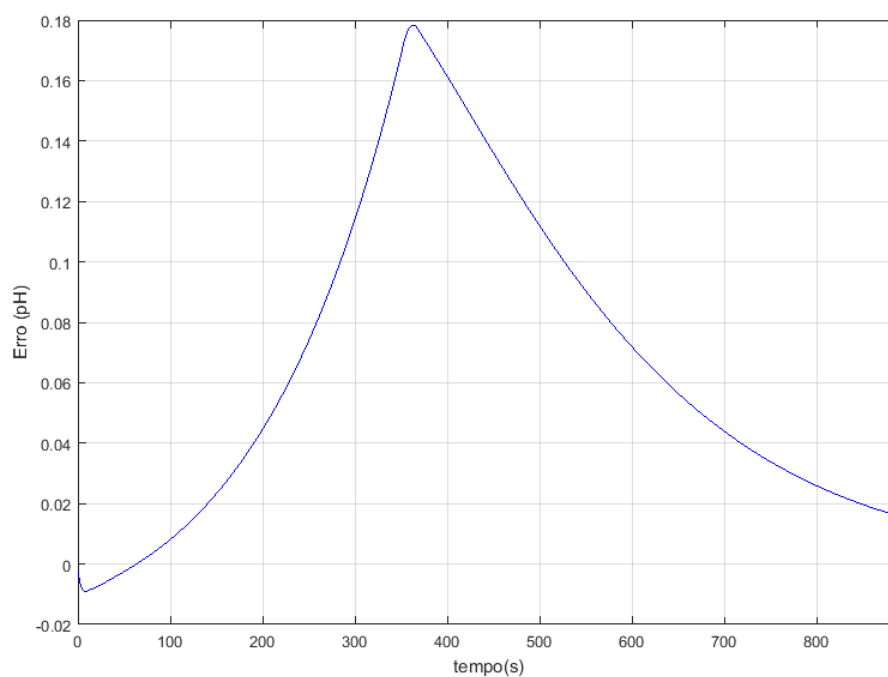


Figura C.38 – Comportamento temporal do set point variável de vazão de água de enxágue (LSP= $15,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

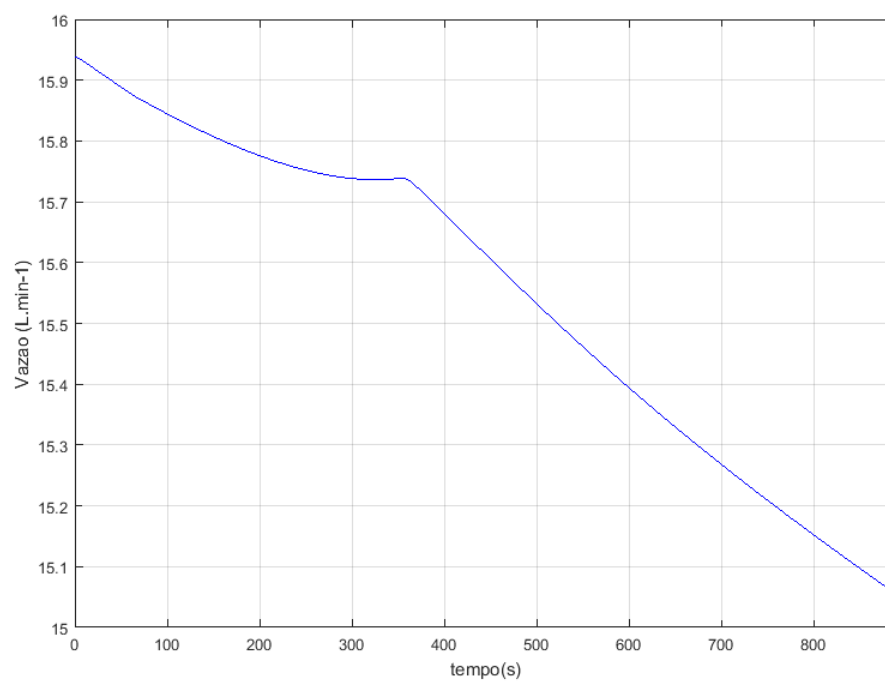
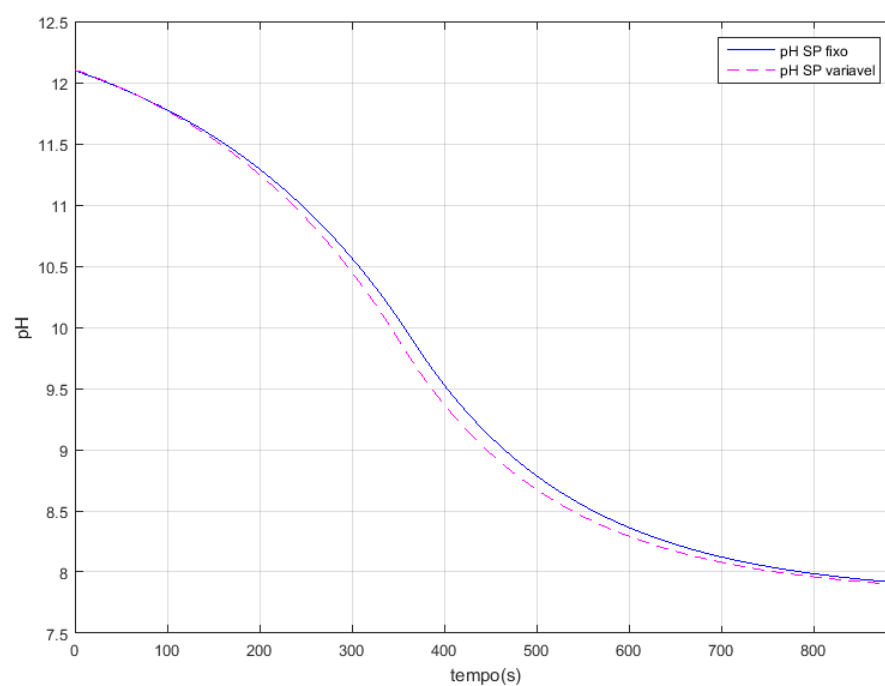
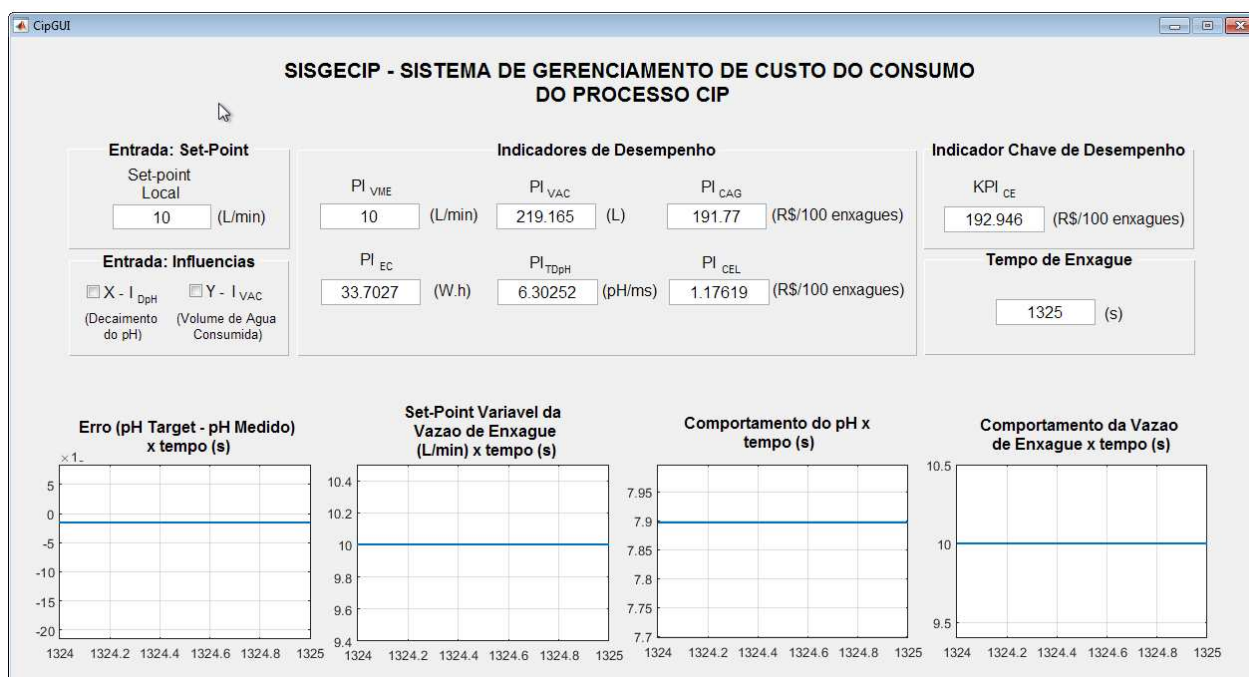


Figura C.39 – Comportamento temporal de resposta do pH para o set-point de vazão da água de enxágue fixo (LSP = 15,0 L.min⁻¹) e para o set-point variável (WSP)



APÊNDICE D – Interface gráfica de usuário - CipGUI

Figura D.1 – Interface de Usuário CipGUI.fig implementada do Simulador do Sistema de Gerenciamento de Custo do Consumo do Processo CIP (SISGECIP) na etapa de enxágue



APÊNDICE E – Função principal para o desenvolvimento da Interface gráfica de usuário (GUI)

Programa “CipGUI.m”:

```
function varargout = CipGUI(varargin)

% CipGUI M-file for CipGUI.fig

% Created by: Rodrigo Sislian, 22-May-2019

%   CIPGUI, by itself, creates a new CIPGUI or raises the existing
%   singleton*.

%
%   H = CIPGUI returns the handle to a new CIPGUI or the handle to
%   the existing singleton*.

%
%   CIPGUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in CIPGUI.M with the given input arguments.
%
%   CIPGUI('Property','Value',...) creates a new CIPGUI or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before CipGUI_OpeningFunction gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to CipGUI_OpeningFcn via varargin.
%
```

```
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
```

```
%
```

```
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
```

```
% Edit the above text to modify the response to help CIPGUI
```

```
% Last Modified by GUIDE v2.5 01-May-2019 23:05:16
```

```
% First Version: Nitin Skandan, 11-Aug-2011
```

```
% Edited by: Rodrigo Sislian, 22-May-2019
```

```
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
```

```
gui_Singleton = 1;
```

```
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
```

```
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
```

```
    'gui_OpeningFcn', @CipGUI_OpeningFcn, ...
```

```
    'gui_OutputFcn', @CipGUI_OutputFcn, ...
```

```
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
```

```
    'gui_Callback', []);
```

```
if nargin && ischar(varargin{1})
```

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
```

```
end
```

```

if nargout

    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

else

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

end

% End initialization code - DO NOT EDIT


% --- Executes just before CippGUI is made visible.

function CipGUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% This function has no output args, see OutputFcn.

% hObject    handle to figure

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% varargin    command line arguments to InpGUI (see VARARGIN)


% Choose default command line output for InpGUI

handles.output = hObject;


% Update handles structure

guidata(hObject, handles);


% UIWAIT makes CipGUI wait for user response (see UIRESUME)

% uiwait(handles.figure1);

```



```

% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = CipGUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INPUTS  %%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PIVME  %%%%%%%%%%%%%%%

function editbox_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to editbox (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of editbox as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of editbox as a double

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function editbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

% hObject handle to editbox (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

%%%%%%%%%% PIVAC %%%%%%%%%%

```
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% hObject handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PICAG  %%%%%%%%%%%%%%%

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%    PIEC    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  PICEL  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%


function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit10 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit10 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PITDpH  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit11 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit11 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% KPICE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit12 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.
if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%%%%%%%%%%%%%%      TEMPO      %%%%%%%%%%%%%%%

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```



```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit13 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% OUTPUTS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


function edtxt_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edtxt (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edtxt as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edtxt as a double


val = get(hObject,'String'); %get the string in edit field


ud =get(gcf,'UserData'); % get ud stored in fig userdata field

if str2num(val) %if number is stored in edit field

    ud.editfield = str2num(val);

else % if its not number

    ud.editfield = 0; % store 0

end

set(gcf,'UserData',ud) ; %update userdata


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edtxt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edtxt (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

ud =get(gcf,'UserData'); % get ud stored in fig userdata field

set(hObject,'String', num2str(ud.editfield)) ; %write value in userdata to field

guidata(hObject, handles); %update view


% --- Executes on button press in chkbox.

function chkbox_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to chkbox (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of chkbox


ud = get(gcf,'UserData') ; %retrieve user data

val = get(hObject,'Value') ; % get new value

```

```
%update user data
```

```
ud.chkbox = val ;
```

```
set(gcf,'UserData', ud) ;
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function chkbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to chkbox (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
ud =get(gcf,'UserData'); % get ud stored in fig userdata field
```

```
set(hObject,'Value', ud.chkbox) ; %write value in userdata to field
```

```
guidata(hObject, handles); %update view
```

```
% --- Executes on button press in checkbox2.
```

```
function checkbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to chkbox (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of chkbox
```

```
ud = get(gcf,'UserData') ; %retrieve user data
```

```
val = get(hObject,'Value') ; % get new value
```

```
%update user data
```

```
ud.chkbox2 = val ;
```

```
set(gcf,'UserData', ud) ;
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function checkbox2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to chkbox (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
ud =get(gcf,'UserData'); % get ud stored in fig userdata field
```

```
set(hObject,'Value', ud.chkbox2) ; %write value in userdata to field
```

```
guidata(hObject, handles); %update view
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function figure1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to figure1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
%set initial values
```

```
ud.chkbox2 = 0 ;
```

```
ud.editfield = 0 ;
```

```
ud.chkbox = 0;
```

```
set(hObject, 'UserData', ud) ; %store GUI initial values
```

```
%Store figure handle in block userdata - handle can then be used for
```

```
%manipulating the figure params
```

```
set_param(gcbh,'Userdata',hObject);
```