



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE SISTEMA CIP BASEADA EM MODELOS
MÚLTIPLOS

Uberlândia- MG- Brasil

2021



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE SISTEMA CIP BASEADA EM MODELOS MÚLTIPLOS

Autora: Rafaella Gaião Brasileiro
Orientador: Rubens Gedraite

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração: Modelagem, Controle e Otimização de Processos Químicos.

Uberlândia- MG

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B823 Brasileiro, Rafaella Gaiao, 1995-
2021 Estratégia de controle de sistema CIP baseada em
modelos múltiplos [recurso eletrônico] / Rafaella Gaiao
Brasileiro. - 2021.

Orientador: Rubens Gedraite.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.61>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Gedraite, Rubens ,1958-
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 04/2021, PPGEQ				
Data:	15 de fevereiro 2021	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	10:35
Matrícula do Discente:	11912EQU010				
Nome do Discente:	Rafaella Gaião Brasileiro				
Título do Trabalho:	Estratégia de controle de sistema CIP baseada em modelos múltiplos				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Modelagem, Controle e Otimização de Processos Químicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de sistemas de controle de processos tolerantes a falhas				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Rodrigo Sislian - IFSP/Campus Guarulhos; Sergio Mauro da Silva Neiro - PPGEQ/UFU e Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Rubens Gedraite apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/02/2021, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sislian, Usuário Externo**, em 15/02/2021, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Mauro da Silva Neiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/02/2021, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2561827** e o código CRC **2B83AFA4**.

RESUMO

Nas indústrias, a formação de incrustações nas superfícies de equipamentos e tubulações é um fenômeno preocupante, na medida em que podem diminuir a eficiência do processo além de causar outros problemas operacionais. Desse contexto advém a necessidade de uma rigorosa higienização das instalações para remoção desses resíduos. Com os processos em larga escala, ocorre o surgimento de sistemas *Clean in Place*- CIP, processo esse que ocorre por meio da circulação de água e produtos químicos. Esses sistemas, atualmente, são de fundamental importância para as indústrias, principalmente química e de alimentos, pois garante a qualidade e segurança dos produtos. Para tanto, muitas vezes o processo CIP é sobredimensionado, acarretando em um maior consumo de produtos químicos, água e energia, além do alto consumo de tempo na realização dessa etapa. Assim, visando a otimização deste processo e conseqüentemente uma economia dos custos e menor desperdício, gerando um menor impacto ambiental, investigou-se a dinâmica da etapa de enxágue do processo CIP, por meio da condutividade da solução, identificando modelos que a representassem para vazões entre 5L/min e 11L/min. Essa identificação foi realizada por meio de modelos empíricos de primeira ordem com tempo morto e posteriormente por meio de ajustes manuais buscando melhores adequações. Por fim, uma estratégia de controle, obtida na literatura, foi adaptada para uso com a variável condutividade e implementada, em Simulink/MATLAB™, permitindo quantificar e avaliar a eficiência dessa quanto a economia de água e de tempo. Os resultados encontrados demonstram a vantagem da utilização da estratégia de controle estudada, apresentando economias de 35,43% e 47,13% de volume de água para as vazões determinadas como ideais dentre as estudadas.

Palavras-chave: Identificação de sistemas. Controle de Processos. Sistema CIP. Clean-in-place.

ABSTRACT

In the industrial environment, the formation of fouling on the surfaces of equipment and pipes is a worrying problem, as they can decrease the efficiency of the process in addition to causing other operational problems. From this context comes the need for a rigorous cleaning of the facilities. With large-scale processes, Clean in Place-CIP systems emerge, a process that occurs through the circulation of water and chemicals. Currently, these systems are of fundamental importance for industries, mainly chemical and food, as they guarantee the quality and safety of products. Therefore, the CIP process is often oversized, resulting in a higher consumption of chemicals, water and energy, and in addition is very time-consuming. Thus, this work has as objective the optimization of this process and, consequently, a cost saving and less waste, generating less environmental impact, for which the dynamics behavior of the rinse stage of the CIP process was investigated, through the conductivity of the solution, identifying models that represented it for flow rates between 5L / min and 11L / min. This identification was carried out using empirical models of first-order-plus-time-delay and later through manual adjustments seeking better fits. Finally, a control strategy, obtained in the literature, was adapted for use with the conductivity variable and codified in Simulink/MATLAB™, allowing quantifying and evaluating its efficiency in terms of water and time savings. The results found demonstrate the advantage of using this control strategy in the rinse stage of CIP processes, presenting water savings of 35,43% and 47,13% for the flows determined as ideal among those studied.

Keyword: System identification. Process control. Clean-in-place.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1- Limpeza: Tipos 2 e 3	20
Figura 2-2- Círculo de Sinner	22
Figura 2-3- Sistema de uso único	29
Figura 2-4- Sistema com Recuperação Parcial	29
Figura 2-5- Sistemas com recuperação total	30
Figura 2-6- Fluxograma de um processo CIP padrão	31
Figura 2-7- Gasto com água e Energia em indústrias de laticínio	34
Figura 2-8- Resposta de um processo de primeira ordem para uma entrada degrau	37
Figura 2-9- Método da tangente e Método de Miller	38
Figura 2-10- Método de Smith	39
Figura 2-11- Diagrama de blocos: Controle feedback	40
Figura 2-12- Malha de Controle de Vazão proposta por Melero Jr. (2011)	48
Figura 2-13- Estratégia de controle proposta por Carneiro (2017)	49
Figura 2-14- Cálculo do desvio do pH como proposto por Carneiro (2017)	50
Figura 2-15- Cálculo do desvio de Volume conforme proposto por Carneiro (2017)	51
Figura 2-16- Malha de controle sugerida por Carneiro (2017)	52
Figura 3-1- Protótipo do sistema CIP utilizado	54
Figura 3-2- Diagrama de simulação revisado para trabalhar com a condutividade	55
Figura 3-3- Cálculo Erro Volume	55
Figura 3-4- Estratégia de controle revisada	56
Figura 3-5- Lógica de Parada	57
Figura 3-6- Bloco stop	58
Figura 4-1- Comportamento da condutividade para diferentes vazões	59
Figura 4-2- Comportamento da condutividade para diferentes vazões: $0 \leq t \leq 15$	60

Figura 4-3- Comportamento da condutividade para diferentes vazões: $t \geq 15$	60
Figura 4-4-Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 5 L/min.....	63
Figura 4-5-Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 6 L/min.....	64
Figura 4-6- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 7 L/min.....	66
Figura 4-7- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 8 L/min.....	67
Figura 4-8- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 9 L/min.....	68
Figura 4-9- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 10 L/min.....	70
Figura 4-10- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 11L/min.....	71
Figura 4-11- Condutividade Simulada (Eq 20) e Experimental para a vazão de 5 L/min	73
Figura 4-12- Condutividade Simulada e Experimental usando os modelos revisados.....	75
Figura 4-13- Diagrama de simulação: Vazão 9L/min	78
Figura 4-14- Bloco “Modelo Dinâmico da Planta”	79
Figura 4-15- Comportamento Condutividade- Vazão 9L/min	80
Figura 4-16- Comportamento Condutividade- Demais Vazões	81
Figura 4-17-Comportamento WSP- Vazão 9L/min.....	82
Figura 4-18- Comportamento WSP para os demais valores de vazão	82
Figura 4-19-Comportamento Erro Volume- Vazão 9L/min.....	83
Figura 4-20- Comportamento Erro Volume: Demais Vazões	83
Figura 4-21- Comportamento Vazão- Vazão inicial de 9L/min.....	84
Figura 4-22-Comportamento Vazão	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1- Classificação dos Resíduos	24
Quadro 2-2- Relações para 1º método de Ziegler-Nichols	42
Quadro 2-3- Relações - Cohen-Coon	43
Quadro 2-4- Relações para o método ITAE	44
Quadro 2-5- Relações método IMC.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 5 L/min	61
Tabela 4-2- Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 5 L/min	62
Tabela 4-3- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 6 L/min	63
Tabela 4-4- Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 6 L/min.....	64
Tabela 4-5 - Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 7 L/min.....	65
Tabela 4-6 - Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 7 L/min.....	65
Tabela 4-7- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 8 L/min	66
Tabela 4-8 - Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 8 L/min.....	67
Tabela 4-9- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 9 L/min	68
Tabela 4-10 - Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 9 L/min.....	69
Tabela 4-11 - Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 10 L/min.....	69
Tabela 4-12 - Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 10 L/min.....	69
Tabela 4-13- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 11 L/min	70
Tabela 4-14- Resultados da função " <i>stepinfo</i> " para a vazão de 11 L/min.....	71
Tabela 4-15- Resultados da função " <i>stepinfo</i> "- (Eq. 20) para a vazão de 5 L/min	73
Tabela 4-16- Modelos identificados e ajustados considerando duas dinâmicas para o processo	74
Tabela 4-17 - Erro acumulado simples (1) e quadrático acumulado (2): Demais vazões	75
Tabela 4-18- Resultados da função " <i>stepinfo</i> " usando os modelos revisados.....	76
Tabela 4-19- Resultados da função " <i>stepinfo</i> " usando os modelos revisados.....	77
Tabela 4-20- Comparação Resultados: Modelo Referência e Planta	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIP	<i>Clean in place</i>
COP	<i>Clean out of place</i>
FOPTD	<i>First Order Plus Dead Time</i>
LSP	<i>Local Setpoint</i>
WSP	<i>Work Setpoint</i>
Vol.	Volume

LISTA DE SÍMBOLOS

CT	Sensor de condutividade
TX	Sensor de temperatura
FS	Sensor de vazão
HL	Chave de nível alto
LL	Chave de nível baixo
F	Filtro
P	Bomba
V	Válvula
T	Tanque
PHE	Trocador de calor
Y	Variável de saída
U	Variável de entrada
K_p	Ganho do processo
τ_p	Constante de tempo
θ	Tempo morto
A	Amplitude
t	Tempo
G_v	Função de transferência válvula
G_m	Função de transferência sensor
G_p	Função de transferência processo
G_c	Função de transferência controlador
Y_{sp}	Setpoint
K_c	Ganho proporcional do controlador
τ_i	Constante ação integral
τ_D	Constante ação derivativa
e	Erro
τ_c	Constante de tempo em malha fechada
P_{cr}	Tempo entre picos sucessivos
K_m	Ganho de sensor
Q_{ref}	Vazão de referência
FQI	Totalizador de Vazão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 INCRUSTAÇÃO	16
2.2 HIGIENIZAÇÃO.....	18
2.2.1 Parâmetros Operacionais que Afetam a Higienização	21
2.2.2 Parâmetros Estruturais que Afetam a Higienização	23
2.2.3 Importância das Características dos Resíduos.....	23
2.2.4 Sistemas de higienização	25
2.3 CIP	26
2.3.1 Configurações dos sistemas CIP	28
2.3.1.1 Sistemas de Uso Único	28
2.3.1.2 Sistemas com Recuperação Parcial.....	29
2.3.1.3 Sistemas com Recuperação Total	30
2.3.2 Etapas de um processo CIP	30
2.3.2.1 Pré-lavagem	31
2.3.2.2 Circulação da solução de detergente.....	32
2.3.2.3 Enxágue intermediário	32
2.3.2.4 Sanitização	33
2.3.2.5 Enxágue final	33
2.3.3 Avaliação do processo CIP	33
2.3.4 Controle de processo CIP	33
2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS	34
2.4.1 Modelos teóricos	35
2.4.2 Modelos empíricos	35
2.5 CONTROLE DE PROCESSOS	40

2.5.1	Métodos de sintonia.....	42
2.5.1.1	Métodos de sintonia: Malha aberta.....	42
2.5.1.2	Métodos de sintonia: Malha fechada	45
2.6	TRABALHOS RELACIONADOS	46
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS DO PROCESSO.....	61
4.2	SIMULAÇÃO DO PROCESSO EM MALHA FECHADA.....	79
5.	CONCLUSÃO.....	86
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A- PROGRAMA COMPLETO	92

1. INTRODUÇÃO

As incrustações são um grande problema nas indústrias, principalmente nas de alimentos, já que diminuem a eficiência do processo, acarretam problemas operacionais nos equipamentos, como queda de pressão, e como o produto está em contato com a superfície podem gerar contaminação (BANSAL; CHEN, 2006; GOODE *et al.*, 2013). O que explica a importância e tempo gasto com a execução da higienização em indústrias.

A higienização consiste na limpeza e sanitização dos equipamentos e tubulações, com o objetivo de se remover os resíduos e microrganismos, e é um processo de grande complexidade que é influenciado por diversos parâmetros, incluindo parâmetros operacionais e estruturais.

Com a produção em grande escala, surge o processo CIP- *Clean in Place*, sendo que nesse, água de enxágue e detergentes são circulados dentro das tubulações e equipamentos sem a necessidade de desmonte desses (LI *et al.*, 2019).

Devido à complexidade desse processo e a exigência da realização de uma higienização bem feita, muitas vezes os procedimentos de limpeza são sobredimensionados, assim esse processo é um dos que mais consomem tempo e insumos nas indústrias, consequentemente acarretando em um alto impacto ambiental.

Logo, desenvolver estratégias para o processo CIP, de forma a se garantir uma limpeza adequada do equipamento, simultaneamente em que se minimiza os gastos com água e energia, além de diminuir o tempo utilizado para a limpeza, torna-se um ponto crítico para as indústrias (DIF *et al.*, 2013).

Entretanto, devido as diferentes características das plantas e dos processos, as dinâmicas destes variam conforme suas particularidades. Assim, evidencia-se a necessidade da determinação de modelos que emulem o processo, que poderão ser utilizados para desenvolvimentos de estratégias de controle e otimização, além de propiciarem um melhor entendimento do processo (SMITH; CORRIPIO, 2012).

Neste contexto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de modelos empíricos que representem a etapa de enxágue para diferentes vazões de um processo CIP e com esses

modelos, a implementação de uma estratégia de controle com objetivo de se obter economias de água e tempo durante a higienização por meio de processo CIP.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo investigar as características de processos de limpeza CIP- *Clean in Place* e avaliar a eficiência da estratégia de controle proposta por Carneiro (2017) quanto à economia de água no controle de uma etapa de enxágue. Quanto aos objetivos específicos pode-se enumerar:

- Modelar a etapa de enxágue para diferentes vazões;
- Avaliar o desempenho do controle proposto para essa etapa;
- Estimar a economia de tempo e de energia com o uso da estratégia de controle estudada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INCRUSTAÇÃO

Incrustação pode ser definida como o acúmulo de depósitos indesejados em superfícies de equipamentos em plantas de processamento, sendo que pode se tornar um elemento limitador na continuidade do processo (BOTT,1995; TULADHAR *et al.*, 2002). Esses depósitos ocorrem devido à adesão de espécies à superfície que resistem a serem removidas (FRYER *et al.*, 2011).

Esse fenômeno é um problema nas indústrias, uma vez que pode reduzir a eficiência da troca de calor em equipamentos bem como aumentar a queda de pressão nestes. Além disso, pode ocorrer uma piora na qualidade do produto final e causar contaminação (BANSAL; CHEN, 2006; FICKAK *et al.*, 2011).

Logo incrustações podem gerar custos adicionais quanto à energia, água, produtos químicos e até causar um maior impacto ambiental, além de maiores custos com o processo, como: dimensionamento de equipamentos de forma equivocada; tempo gasto com parada de manutenção e perda na produção (JUN; PURI, 2005).

Segundo Perry e Green (2008), o fenômeno de incrustação pode ser dividido em seis categorias de acordo com o mecanismo com o qual ocorre, sendo elas:

- Incrustação por corrosão: esse tipo ocorre quando há uma reação química entre a parede do equipamento e elementos do fluido em questão;
- Bioincrustação: ocorre devido à presença de organismos presentes no fluido, que se anexam a parede, onde se reproduzem e crescem;
- Incrustação particulada: fluidos com partículas em suspensão podem gerar esse tipo de incrustação, quando essas partículas se depositam na parede em áreas de menor velocidade de fluido;
- Incrustação devido à reação química: ocorre uma reação química do fluido, produzindo sólidos que irão aderir à parede do equipamento;
- Incrustação por precipitação: ocorre ao se supersaturar uma suspensão com material dissolvido, o que resulta numa cristalização do material na parede;

- Incrustação por congelamento: solidificação causada pela diminuição da temperatura de um fluido abaixo do seu ponto de congelamento.

Ressalta-se que a incrustação em equipamentos industriais não se restringe a um mecanismo por equipamento, podendo ocorrer mais de um tipo simultaneamente (PERRY; GREEN, 2008).

Assim, devido aos mecanismos envolvidos, a característica do fenômeno depende principalmente da temperatura de operação, das condições hidráulicas desta, além da composição do fluido em questão e da superfície de contato do equipamento (HOOPER *et al.*, 2006).

Explica-se: temperaturas mais elevadas são favoráveis à ocorrência de mais incrustação adsorvidas nas superfícies, bem como o tempo de produção também é um fator a ser levado em consideração, pois tempos mais longos aumentam a chance da ocorrência desse fenômeno e a dificuldade para a limpeza dos mesmos (PAK, 2016; BURTON, 1994). Já velocidades menores de escoamento aumentam a taxa de incrustação devido a menor turbulência no equipamento (BANSAL; CHEN, 2006).

Quanto à composição do fluido, sabe-se que a grande maioria dos materiais sólidos em solução pode gerar incrustação, desde materiais inorgânicos a orgânicos. Assim, tanto as características inerentes ao material quanto as características da solução, por exemplo, concentração e viscosidade, afetam o fenômeno em questão (BOTT, 1995).

Além dos fatores ligados ao equipamento e fluido, o fenômeno pode, ainda, ser influenciado por fatores externos a estes. Por exemplo, se ocorrer a formação de bolhas de ar no interior do equipamento, estas atuam como núcleos de deposição, favorecendo a deposição de resíduos (BANSAL; CHEN, 2006).

Destaque-se que a formação da incrustação, em geral se dá na forma das seguintes etapas (BOTT, 1995; CHANGANI *et al.*, 1997):

- Inicialmente, caso necessário, ocorre a conversão de um componente do fluido numa forma passível de depósito, a forma como essa conversão ocorre depende do mecanismo que transcorre;

- O transporte de massa do sólido a ser depositado para a superfície onde acontecerá o fenômeno;
- A adesão do depósito seja na superfície (camada inicial) ou em si próprio, aumentando o tamanho da camada de incrustação;
- Estabilização da camada de incrustação através da remoção mecânica de parte desta por meio de forças de cisalhamento, enquanto ainda ocorre o depósito de material nesta.

Com conhecimento do fenômeno da incrustação e as características destas é possível implementar métodos para diminuí-las, além de efetuar métodos de limpeza mais eficazes.

Dentre os métodos para diminuição da incrustação, pode-se citar: para bioincrustação, o uso de cobre ou tratamento térmico no fluido diminui o fenômeno; incrustação por corrosão pode se utilizar materiais menos corrosivos no equipamento; para incrustação particulada deve-se aumentar o fluxo de forma a diminuir as áreas com velocidade baixa e fluido estagnado (PERRY; GREEN, 2008).

Já o conhecimento das características das incrustações existentes auxilia no processo de limpeza da seguinte forma: se forem solúveis em água são mais facilmente removidos, enquanto depósitos insolúveis causam maiores problemas durante a limpeza. Assim a escolha dos produtos químicos a serem utilizados depende dessas características (PAK, 2016).

Como explicitado, percebe-se que a presença de incrustações nos equipamentos impacta diretamente na produção, na necessidade de higienização e em seus custos, ocasionando a relevância de uma maior compreensão do fenômeno e no processo de limpeza deste.

2.2 HIGIENIZAÇÃO

Os processos de higienização na indústria são de fundamental importância tanto para garantir as condições higiênicas ou de especificação do produto, quanto para garantir um bom funcionamento da planta. Devido ao gasto com água e energia desses processos, estes se tornam importantes objetos de estudo (SCHÖLER *et. al.*, 2012).

A higienização consiste em práticas que visam assegurar a remoção de resíduos, além da destruição de microrganismos para permitir um desempenho adequado dos equipamentos e garantir a qualidade do produto final (KANEGBERG, 2001).

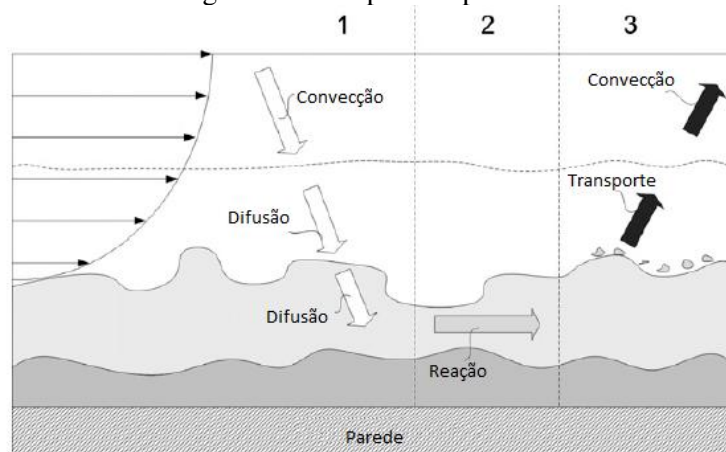
Como anteriormente destacado, incrustações geram impactos negativos no desempenho do equipamento, como maior queda de pressão, menor eficiência na troca de energia e a possibilidade de contaminação do produto. Assim, a higienização é essencial para a minimização desses impactos, sendo que uma higienização insuficiente deixa os equipamentos suscetíveis a esses, enquanto uma higienização adequada poderá gerar benefícios econômicos, já que as incrustações tem relação direta com paradas e perda de produção (BANSAL; CHEN, 2006; LI *et al.*, 2019; JUN; PURI, 2005). Logo, nota-se a importância da compreensão dos processos de higienização nas indústrias.

A higienização pode ser dividida em duas etapas: limpeza e sanitização. O processo de limpeza se refere à eliminação de resíduos presentes na superfície por meio do uso de detergentes químicos, enquanto a sanitização é a remoção de microrganismos e sua inativação (ICTA, 2010; WIRTANEN, SALO, 2003).

De acordo com a dificuldade da limpeza e dos mecanismos de remoção, os problemas de limpeza na indústria podem ser divididos, sendo que os mais difíceis de serem limpos são: o tipo 1, que se refere à limpeza de fluidos altamente viscosos por água; tipo 2, limpeza de biofilmes e tipo 3, a limpeza de depósitos sólidos por ação química. (FRYER; ASTERIADOU, 2009).

Enquanto o tipo 1 é removido apenas com a ação de um fluido, os tipos 2 e 3 necessitam de agentes químicos para realizar a limpeza. Assim, para os tipos 2 e 3 a limpeza, envolve geralmente as etapas apresentadas na Figura 2-1.

Figura 2-1- Limpeza: Tipos 2 e 3



Fonte: Adaptado de SCHÖLER *et. al.* (2012)

Na Figura 2-1 é apresentada a vista lateral de uma parede de tubulação, a incrustação formada e o fluido de limpeza presente e em contato. Inicialmente o fluido de limpeza deve ser transportado até a interface fluido/incrustação e se difundir nesta. Em seguida ocorre a reação da solução com a incrustação, sendo que essa reação pode ocorrer de diferentes formas: dissolução, quebra da coesão, quebra adesiva da superfície. O produto da reação é então disperso, sendo removido da superfície e transportado para o fluido. (SCHÖLER *et. al.*, 2012).

Com base na Figura 2-1 e levando em conta que a limpeza envolve diferentes fenômenos, pode se compreender que ela pode ser afetada por qualquer um destes, quer seja a transferência de massa que acontece no processo quanto a possível reação química entre a solução e a incrustação (SCHÖLER *et. al.*, 2012).

Quanto à etapa de sanitização, esta, de forma geral, pode ser realizada de três maneiras: por métodos químicos, por calor ou por radiação. A sanitização por métodos químicos utiliza agentes sanitizantes, sendo sua escolha fundamental para a eficiência da etapa e é a mais utilizada nas indústrias. O método por intermédio do calor utiliza vapor ou água quente, enquanto o método por radiação é mais utilizados em hospitais (ICTA, 2010).

A etapa de sanitização depende diretamente da limpeza anterior a ela, pois se esta for deficiente, caso a sanitização ocorra por métodos químicos, o sanitizante reagirá com os resíduos remanescentes e terá pouca efetividade para agir nos microrganismos, e no caso de sanitização por calor, mais vapor será necessário (ARCURI, 2000).

Percebe-se que a higienização é um processo complexo e uma combinação de ações físicas e químicas, nas quais certos fatores tem papel primordial (HANKINSON; CARVER, 1968). Isso porque a limpeza das incrustações depende da superação das forças adesivas dessas com a superfície através de forças contrárias (PAK, 2016).

2.2.1 Parâmetros Operacionais que Afetam a Higienização

Os quatro principais parâmetros que afetam a limpeza e são independentes da instalação da planta são: temperatura, tempo de contato, energia mecânica e energia química (LELIEVELD *et al.*, 2005; SEIBERLING, 2007).

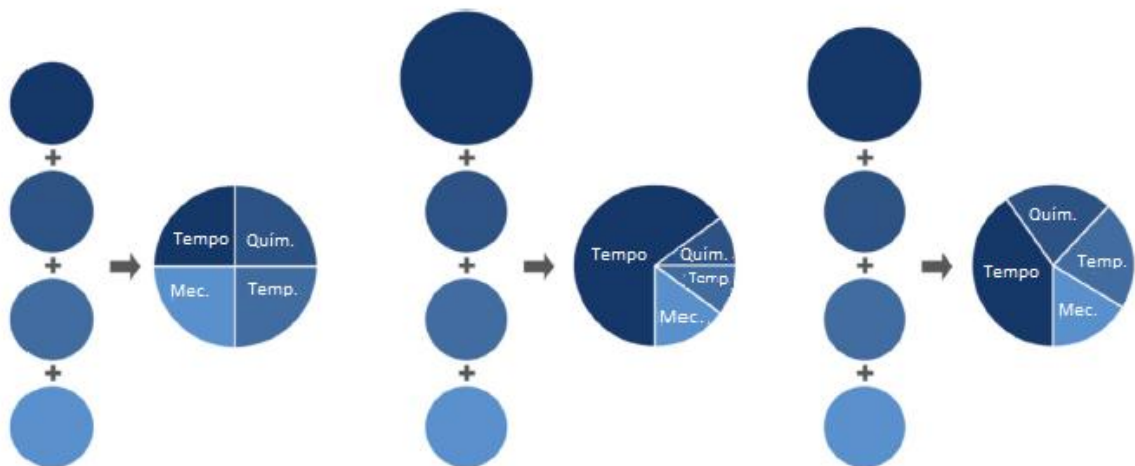
- Temperatura: Altas temperaturas implicam em velocidades maiores de reação, gerando uma ação mais efetiva dos detergentes. Além disso, caso a temperatura seja muito elevada pode acarretar mudanças nos resíduos, por exemplo, temperaturas acima do ponto de derretimento de gorduras facilitam sua remoção, entretanto temperaturas muito altas podem provocar a desnaturação de proteínas, o que dificultaria o processo. Por isso, como regra geral, o processo de limpeza deve ser realizado na mesma temperatura de processamento (GIBSON *et al.*, 1999; PAK, 2016; FORNI, 2007);
- Tempo de contato: A determinação do tempo de contato adequado para o processo de higienização é fundamental para a eficiência deste, isto porque o tempo deve ser suficientemente longo para que as reações químicas ocorram. Entretanto, essas reações ocorrem de forma mais rápida nos minutos iniciais. Assim existe um determinado tempo a partir do qual a eficácia do processo não será aumentada (LELIEVELD *et al.*, 2005; LORENZEN; GMBH, 2005). Este parâmetro deve ser adequadamente escolhido, pois tempos excessivos acarretam uma menor produtividade da indústria devido à pausa na produção para higienização, além de acarretar um aumento nos custos (ANDRADE; MACEDO, 1996).
- Energia mecânica: Esta é responsável pelo contato entre os resíduos e os agentes de higienização, sendo que pode ocorrer de forma manual ou através da energia cinética pela circulação de soluções de limpeza, que se traduz em uma força de cisalhamento nas paredes das tubulações responsável pela remoção (ANDRADE; MACEDO, 1996; FRIIS; JENSEN, 2005). No caso do escoamento, este transportará o detergente à incrustação, promovendo o contato e arrastando as sujidades para fora do

equipamento em questão. Assim, com a finalidade de favorecer a transferência de massa e calor no equipamento, o ideal é a utilização de um fluxo turbulento, diminuindo a camada laminar entre a superfície e a solução (LELIEVELD *et al.*, 2005; PAK, 2016).

- Energia química: A energia química está relacionada à etapa de reação da limpeza, diminuindo a força de adesão dos resíduos a superfície e facilitando sua remoção. As soluções de limpeza, denominadas de detergentes, devem se dissolver em água, agir de forma rápida no resíduo, conseguir carregar estes resíduos sem que o mesmo se deposite novamente, possibilitar um enxague fácil e ser capaz de dissolver ou solubilizar os resíduos (LELIEVELD *et al.*, 2005; GIBSON *et al.*, 1999; VAN ASSELT *et al.*, 2002).

Os quatro parâmetros anteriormente descritos não são independentes entre si e uma combinação eficiente destes é fundamental para a eficácia da limpeza do equipamento. O Círculo de Sinner, representado na Figura 2-2, pode ser utilizado para explicar estes parâmetros e sua dependência (PAK, 2016; WERNE, 2016).

Figura 2-2- Círculo de Sinner



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, (2019)

Da Figura 2-2, percebe-se que se um parâmetro é restringido, pode-se compensar aumentando o efeito de outro. Destaca-se que o círculo de Sinner é apenas uma representação da correlação entre os parâmetros. Além disso, fatores estruturais e de implantação da planta podem afetar a higienização desta (LI *et al.*, 2019).

2.2.2 Parâmetros Estruturais que Afetam a Higienização

Os parâmetros estruturais têm influência no gasto de construção e de operação, por isso devem ser cuidadosamente considerados, além de afetarem a higienização da planta. Para se obter uma higienização adequada dos equipamentos é necessário que a estrutura e o design destes possibilitem da melhor forma possível essa etapa (HELDMAN; LUND, 2007).

Desenho higiênico é o projeto e a construção de equipamentos pensando, também, na etapa de higienização destes e não apenas no processamento do produto final. Isto inclui, por exemplo: o material de construção das superfícies dos equipamentos que deve considerar as características do produto, pois determinarão a magnitude das forças envolvidas e a geometria dos equipamentos, uma vez que essas podem gerar acúmulos de água e produtos indesejáveis, além de afetar o fluxo e o contato da solução de limpeza com as paredes (HELDMAN; LUND, 2007; LELIEVELD *et. al.*, 2005).

Deve-se destacar que além dos parâmetros operacionais e estruturais, o treinamento dos funcionários é primordial para uma higienização eficiente dos equipamentos, além de garantir a segurança dos próprios funcionários (TAMIME, 2008).

2.2.3 Importância das Características dos Resíduos

Assim como a natureza e design da superfície tem influência na força de adesão entre essa e o resíduo, as características do resíduo também irão influenciar nessa força. Deste modo o método de limpeza e sua intensidade dependem diretamente dessas características (HELDMAN; LUND, 2007; HOLAH, 2014).

Essas características influenciam também, como anteriormente explicitadas, no detergente a ser utilizado na etapa de limpeza, já que este deve ser capaz de dissolver ou solubilizar o resíduo. Assim, torna-se fundamental para uma limpeza satisfatória o conhecimento das características dos resíduos em questão (ICTA, 2010).

Inicialmente os resíduos podem ser divididos em dois tipos básicos: os solúveis em água e os insolúveis. Os resíduos solúveis em água são facilmente removidos, pois requerem somente uma ação de dissolução, dentre esses estão os sais inorgânicos, açúcares e amidos. Enquanto os resíduos solúveis em água geram problemas maiores durante o procedimento de

higienização e podem ser divididos em resíduos orgânicos e inorgânicos (TAMIME, 2008; GORMEZANO, 2007).

Os resíduos orgânicos possuem origem animal ou vegetal e podem se apresentar, principalmente, como proteínas, gorduras e óleos e possuem como principal problema o fato de formarem resíduos carbonizados se submetidos a temperaturas muito altas, que são extremamente difíceis de serem removidos. Este tipo de resíduo pode, ainda, facilitar a formação de depósitos microbiológicos, pois são os substratos destes (LELIEVELD *et. al.*, 2005).

Já os resíduos inorgânicos resultam principalmente da dureza da água e apresentam como principal complicação o fato de, se não removidos, reduzirem a eficiência da transferência de calor dos equipamentos (TAMIME, 2008).

Os resíduos orgânicos devem ser geralmente removidos utilizando detergentes com compostos alcalinos, enquanto os inorgânicos através de produtos ácidos (MARRIOT; GRAVANI, 2006). No Quadro 2-1 é apresentada a classificação dos resíduos, bem como qual componente deve ser utilizado para sua limpeza.

Quadro 2-1- Classificação dos Resíduos

Tipo de Sólido	Subclasse	Exemplos	Componente Limpeza
Inorgânico	Advindos da dureza da água	Carbonatos de cálcio e magnésio	Detergentes ácidos
	Depósitos Metálicos	Ferrugem e outros óxidos	
	Depósitos Alcalinos	Filmes deixados por lavagem insuficiente, após o uso de detergente alcalino	
Orgânico	Derivados de Petróleo	Óleos Lubrificantes e graxa	Solventes
	Não Derivados de Petróleo	Gordura Animal e óleos vegetais	Detergentes Alcalinos

Fonte: Adaptado de MARRIOT; GRAVANI (2006)

Os detergentes alcalinos podem ser divididos de acordo com sua alcalinidade: os altamente alcalinos são utilizados para resíduos mais difíceis de serem removidos, por exemplo, se estiverem queimados e são altamente corrosivos, podendo causar queimaduras; os moderadamente alcalinos podem ser utilizados na remoção de gorduras, entretanto não são

eficientes na remoção de resíduos minerais; já os alcalinos suaves não são eficazes na remoção de incrustações, apenas em áreas parcialmente sujas (ICTA, 2010).

O álcali mais utilizado é o hidróxido de sódio, pois é bastante eficiente na remoção de proteínas e gorduras, não geram a corrosão de aço inoxidável, além de possuir um menor custo em comparação aos outros (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Já os detergentes ácidos podem remover resíduos inorgânicos e podem ser agrupados de acordo com sua acidez: os fortemente ácidos removem depósitos minerais e materiais incrustados, mas corroem a maioria dos metais, enquanto os moderadamente ácidos são menos corrosíveis, mais adequados para limpezas manuais e mais caros (ICTA, 2010).

Assim, com o conhecimento das características do resíduo e do tipo de superfície a ser limpa, o método de higienização pode ser escolhido de forma a se obter uma maior eficiência.

2.2.4 Sistemas de higienização

Como já explicado, a decisão de qual método de higienização a ser utilizado depende, fundamentalmente, do resíduo a ser retirado, do nível de higienização necessário, dos equipamentos e dos custos. Os principais métodos de higienização utilizados são: espuma e gel, imersão, alta pressão, pulverização, limpeza manual e limpeza de equipamentos e circuitos fechados (ICTA, 2010; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

No método de higienização espuma e gel, uma espuma é aplicada em todas as superfícies e deve-se garantir longo tempo de contato entre o detergente ou sanitizante com essas (HELDMAN; LUND, 2007). Já os sistemas de imersão são utilizados, geralmente, para a higienização de parte de equipamentos ou utensílios menores, que serão tratados, previamente, com água morna, e então imersos em uma solução com detergente, sendo no final do processo, escovados e enxaguados (JUNIOR, 2011).

O método de alta pressão é realizado com pressões entre 15 e 120 bar, por meio dos jatos de fluido, onde forças de cisalhamento são aplicadas, necessitando de pouco detergente (HELDMAN; LUND, 2007). No processo de pulverização o detergente é aplicado em diâmetros muito pequenos, em forma de névoa, o que facilita a higienização de superfícies escondidas (ICTA, 2010).

O processo de limpeza manual é denominado COP- *Clean-Out-of-Place*. Neste método o equipamento é desligado e desmontado, permitindo a limpeza de suas partes e peças de forma braçal. Sendo que essa limpeza é realizada por meio de trabalhadores utilizando detergentes, geralmente menos agressivos e em menores temperaturas para garantir a segurança, e utensílios como raspadores, materiais abrasivos e escovas (HELDMAN; LUND, 2007; ICTA, 2010; CARLOTTI, 2008).

O método COP apresenta como principais desvantagens: os grandes períodos de tempo que são requeridos, sendo que nesses a planta estaria parada; possuem um alto custo com mão de obra e necessitam de bastante atenção já que possuirão resultados variáveis, pois dependem exclusivamente da ação humana. Entretanto possuem como vantagem um baixo custo de instalação (LELIEVELD *et. al.*, 2005).

Já o método de limpeza de equipamentos e circuitos fechados, mais conhecido como CIP- *Clean-In-Place*, é a realização da higienização dos equipamentos ou tubulações da planta, sem a necessidade de desmontá-los. Essa higienização é realizada sem a intervenção de um operador e ocorre através da circulação de água e soluções de limpeza em condições específicas (LI *et al.*, 2019).

Em comparação com o método COP, o CIP apresenta como desvantagem seu maior custo de instalação, um risco de contaminação cruzada, alto gastos com insumos e água e exigência de uma mão de obra mais qualificada. Entretanto suas vantagens mais que compensam: é necessário um menor tempo em comparação ao COP, o que aumenta a produtividade da planta; menor custo com mão de obra; gasto menor com manutenção, pois o desgaste dos equipamentos é menor; níveis de higienização melhores e economia de água e agentes químicos (TAMIME, 2008; PAK, 2016).

Como a produção em maior escala atualmente requer processos automatizados o método CIP se sobressai aos demais, pois é, geralmente, automatizado possibilitando o controle dos parâmetros de limpeza acarretando uma maior confiabilidade (TAMIME, 2008; CHANDRAKASH, 2012).

2.3 CIP

O processo CIP é o processo foco deste trabalho e pode ser definido como um processo que visa à higienização de equipamentos e tubulações, seja para a retirada de

incrustação e assim permitir uma melhor eficiência do equipamento, seja para preparar a linha para que outro produto seja processado (BREMNER *et al.*, 2006; PAK, 2016).

Esse processo ocorre sem a necessidade das linhas ou dos equipamentos serem desmontados, por meio da circulação de soluções de limpeza. O CIP é, atualmente, um dos processos de limpeza mais utilizados do mundo, muito devido às vantagens que oferece em comparação aos outros métodos (LI *et al.*, 2019; FORSYTHE, S. J.; HAYES, 2002).

Dentre as vantagens geradas pela utilização do processo CIP, em relação a outros métodos, destaca-se:

- Redução do tempo necessário para o processo de limpeza da planta, pois não há a necessidade de desmontar os equipamentos e tubulações, bem como remonta-los (PAK, 2016).
- Maior eficiência na produção, já que o tempo de inatividade da planta diminui (TAMIME, 2008);
- Menor desgaste dos equipamentos, também devido a estes não serem desmontados, o que gera um menor gasto com manutenção (PAK, 2016).
- Redução dos custos e consumo de água e produtos químicos, o que gera um menor impacto ambiental (LI *et al.*, 2019).
- Um menor custo com mão de obra, já que um menor número de funcionários é necessário (TAMIME, 2008);
- Maior segurança dos funcionários, pois não precisarão entrar em contato direto com equipamentos e produtos químicos (MARRIOTT; GRAVANI,2006).
- Melhor padrão de higienização é alcançado, já que maiores temperaturas e soluções com maiores concentrações podem ser utilizadas (TAMIME, 2008);
- Possibilidade de automatização do processo, o que além de possibilitar uma higienização padrão e aumentar a confiança nesta, diminui a influência de erros humanos (PAK, 2016).

Para que se realize o CIP nas tubulações e equipamentos já existentes na planta, são necessários tanques para estocar os produtos químicos, se for o caso também para a recuperação das soluções de limpeza, juntamente com bombas, válvulas e tubulações que permitam que essas soluções, além de água, sejam direcionadas onde a limpeza ocorrerá (TAMIME, 2008).

Assim, percebe-se que os processos CIP são complexos e os fenômenos que ocorrem durante a sua realização são de difícil compreensão, por isso o estudo destes são importantes, de forma a auxiliar compreensão da influência dos parâmetros para possibilitar melhorias nesses procedimentos (LELIÈVRE *et al.*, 2002).

2.3.1 Configurações dos sistemas CIP

As características e a complexidade do sistema CIP empregado dependem, também, da configuração utilizada. Basicamente existem três arranjos para o sistema CIP, sendo que a diferença entre eles reside no reaproveitamento das soluções e fisicamente, na quantidade de tanques necessários (TAMIME, 2008).

Já os elementos presentes nas três configurações são os sensores, dentre estes sensores de condutividade (CT), de temperatura (TX), de vazão (FS), chave de nível alto (HL), de nível baixo (LL), além de filtros (F), bombas (P), válvulas (V), tanques (T) e trocadores de calor (PHE).

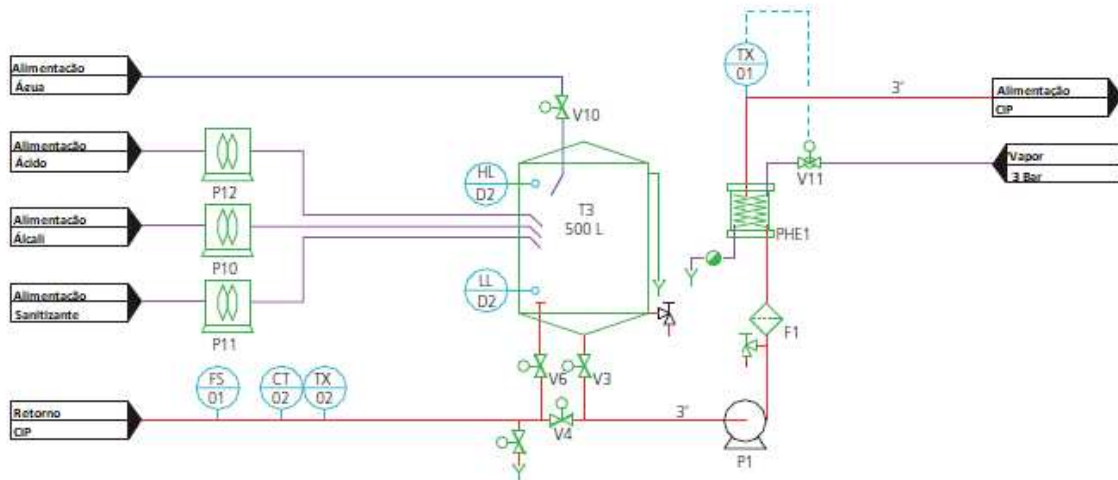
2.3.1.1 Sistemas de Uso Único

No sistema de uso único, a solução de limpeza é abastecida a planta, onde circula e no final é drenada, sendo utilizada uma única vez no sistema. Essa configuração tem menor custo de instalação, pois são mais simples, entretanto geram um maior custo de produtos químicos em longo prazo, além de gerarem um maior impacto ambiental (LELIEVELD *et al.*, 2005).

Esta configuração é recomendada para plantas menores, equipamentos muito sujos, quando se deve garantir a esterilidade do equipamento e quando o risco de contaminação cruzada é alto (HELDMAN; LUND, 2007).

Na Figura 2-3, é explicitado um sistema de uso único. Neste, as soluções de limpeza são direcionadas ao tanque T3 dos tanques de armazenamento, através das bombas P10, P11, P12. Do tanque são direcionadas ao trocador de calor PHE1 e finalmente para os equipamentos e tubulações a serem limpos, sendo que após a limpeza são descartadas.

Figura 2-3- Sistema de uso único

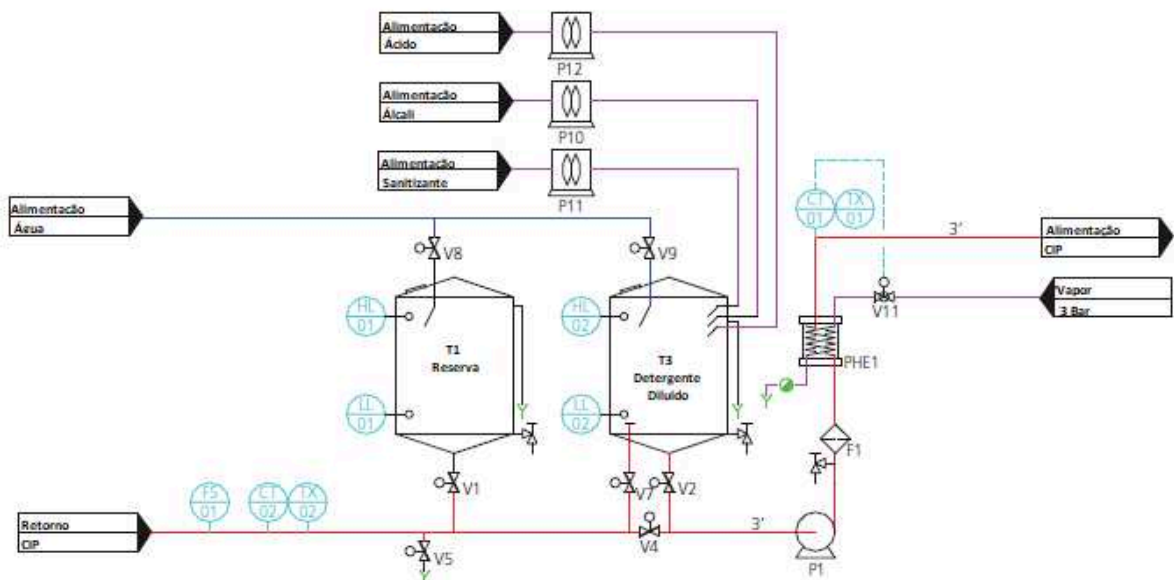


Fonte: Adaptado de TAMIME (2008)

2.3.1.2 Sistemas com Recuperação Parcial

Esta configuração está demonstrada na Figura 2-4, sendo possível perceber a existência de dois tanques: um para armazenamento de água e outro para a recuperação da solução de detergente.

Figura 2-4-Sistema com Recuperação Parcial



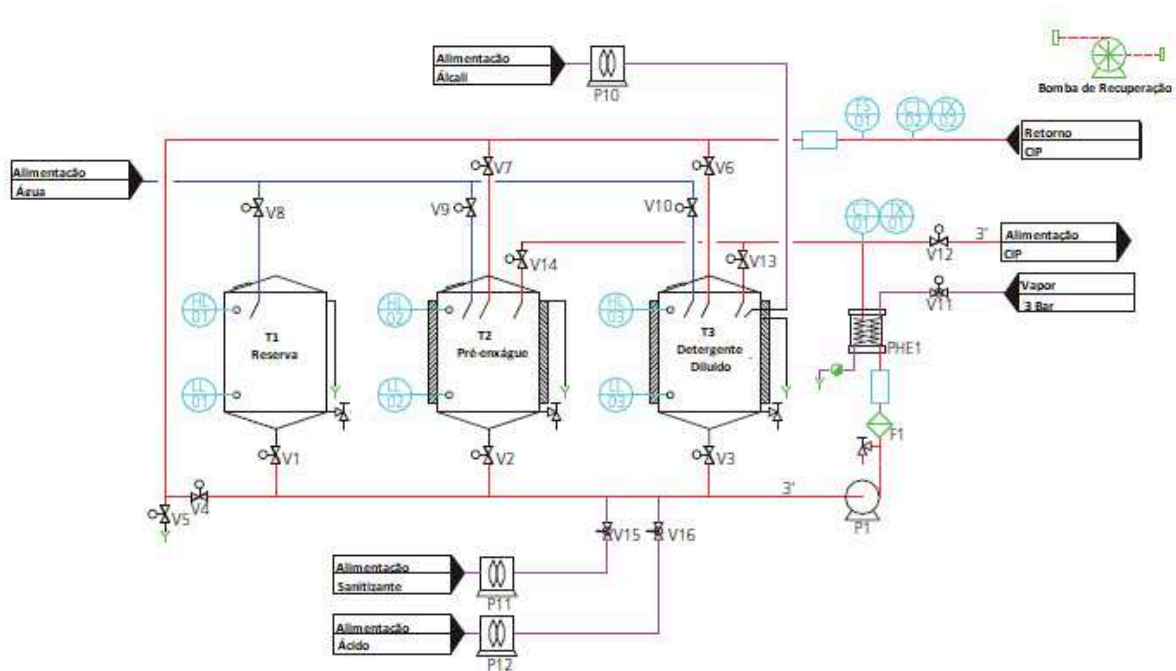
Fonte: Adaptado de TAMIME (2008)

Nesta configuração, a solução de detergente é recuperada, sendo que para garantir a eficiência desta sua condutividade deve ser acompanhada, e a água a ser utilizada para o pré-enxágue deve ser limpa, sendo que a água do enxágue final é descartada (TAMIME, 2008).

2.3.1.3 Sistemas com Recuperação Total

Este sistema difere do sistema de recuperação parcial, pois este recupera, além da solução de detergente, a água do enxágue final que será utilizada na pré-lavagem. Pode-se observar na Figura 2-5, a presença de três tanques nessa configuração, sendo suas funções: recuperar e armazenar a solução detergente, água do enxágue final e armazenar água limpa (LELIEVELD *et. al.*, 2005; MOERMAN *et. al.*, 2014).

Figura 2-5-Sistemas com recuperação total



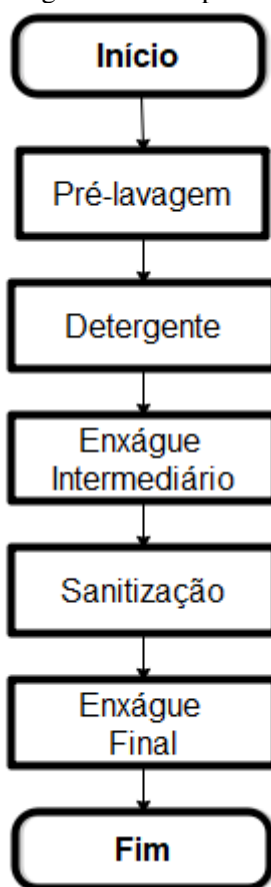
Fonte: Adaptado de TAMIME (2008)

Esta configuração apresenta duas vantagens em relação às configurações anteriores: menor utilização de água e a etapa de pré-enxague será mais efetiva devido à presença de detergente residual na água reutilizada. Entretanto, também é necessário um acompanhamento da solução de detergente, através da sua condutividade, de forma a garantir sua eficiência (TAMIME, 2008).

2.3.2 Etapas de um processo CIP

Um processo CIP adequado segue um procedimento padrão, que está exemplificado no fluxograma presente na Figura 2-6.

Figura 2-6- Fluxograma de um processo CIP padrão



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

As etapas explicitadas na Figura 2-6 serão detalhadas na sequência.

2.3.2.1 Pré-lavagem

A etapa inicial do processo CIP é realizada apenas com a utilização de água, sendo que o fluxo desta possibilitará a remoção dos resíduos mais fracamente aderidos, além de líquidos residuais que porventura ainda permanecem nos equipamentos ou tubulações. Esta etapa é importante para a redução da quantidade de detergente utilizada (FRYER *et al.*, 2006).

A água desta etapa pode ser de reuso da etapa de enxágue, o que ocorre com dois objetivos: diminuir a quantidade de água utilizada no processo e reaproveitar, se existir, detergente residual. Além disso, geralmente, essa água é aquecida para evitar a ocorrência de um choque térmico no equipamento ou tubulação (TAMIME, 2008).

Esta etapa é regulada pelo tempo em que ocorre, sendo que este deve ser cuidadosamente determinado, já que se muito alto causará um grande gasto com água e,

portanto, gerará um volume alto de efluente, ou se utilizarem valores reduzidos resultaria na presença de altas quantidades de resíduos (TAMIME, 2008).

2.3.2.2 Circulação da solução de detergente

Esta etapa se baseia na limpeza do equipamento ou tubulação através da circulação de uma solução de detergente específica, com objetivo de remover os resíduos aderidos a superfície que não foram removidos na etapa anterior (HELDMAN; LUND, 2007).

Destaca-se que a escolha do detergente a ser utilizado e sua concentração é de fundamental importância para a eficiência do processo, pois os compostos químicos presentes nestes reagem de forma diferente de acordo com as características dos resíduos, além de poderem causar rachaduras ou corrosão do material do equipamento. Além desses aspectos a temperatura em que os detergentes são aplicados é de fundamental importância, já que temperaturas maiores favorecem as reações químicas (SCHMIDT, 1997; NIAMSUWAN *et al.*, 2011).

2.3.2.3 Enxágue intermediário

Esta etapa é realizada com o intuito de se remover o detergente residual e os sólidos ainda presentes no equipamento ou tubulação. Além disso, em sistemas com ocorrência de recuperação, a água desta etapa é recuperada de forma a se utilizar o detergente residual (TAMIME, 2008).

Esta etapa é afetada, principalmente, por dois parâmetros: temperatura, que influencia na solubilidade do resíduo e vazão que interfere na força de cisalhamento, e sua duração é determinada pela condutividade da água efluente, sendo que esta é interrompida quando a concentração do detergente é menor que um valor já estabelecido (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Em alguns processos CIP, após o enxágue intermediário, pode ocorrer outra etapa de circulação de detergente e outro enxágue, sendo estes opcionais. Geralmente, essa opção é utilizada para remoção de depósitos minerais, quando estes existem em alta quantidade e ocorrem na seguinte sequência: a circulação de uma solução de detergente alcalina na primeira circulação, enxágue, circulação de uma solução ácida e, novamente uma etapa de enxágue (TAMIME, 2008).

2.3.2.4 Sanitização

A sanitização é o processo utilizado para eliminar microrganismos patogênicos e reduzir microrganismos responsáveis por contaminação. Como já descrito neste trabalho a sanitização pode ocorrer de diferentes maneiras e a escolha do método ideal depende de diversos fatores, entre eles: a eficiência do método contra o microrganismo em questão, o produto que é processado na planta e a interação entre material do equipamento e sanitizante (PAK, 2016).

2.3.2.5 Enxágue final

A etapa final é realizada com circulação de água de forma a se retirar o sanitizante, sendo que para evitar contaminação após o processo CIP, a água utilizada deve possuir alta qualidade, ou seja, água tratada (HELDMAN; LUND, 2007).

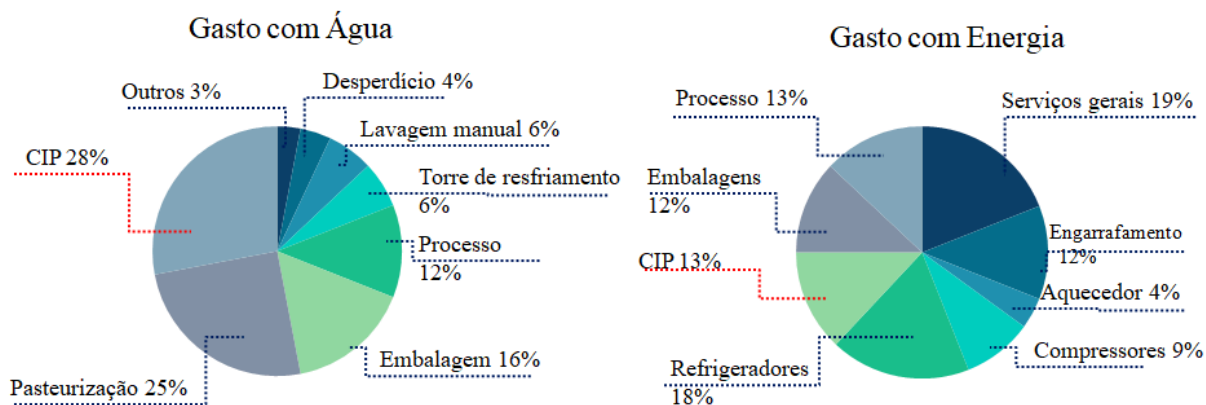
2.3.3 Avaliação do processo CIP

A avaliação do processo CIP e sua verificação devem ocorrer de forma periódica, para permitir que medidas corretivas sejam tomadas se necessário. Essa avaliação pode considerar o critério visual, mas também deve avaliar análises da superfície, de forma a se garantir que essas não possuem resíduos, detergentes ou sanitizantes residuais, além do número de microrganismos estar dentro do nível aceitável (ICTA, 2010).

2.3.4 Controle de processo CIP

Como já explicitado neste trabalho, a utilização de um processo CIP para a higienização de uma indústria tem várias vantagens quando comparado ao processo de higienização manual. Entretanto, uma das principais desvantagens na utilização deste procedimento é o alto gasto com água e energia, o que é explicitado na Figura 2-7.

Figura 2-7-Gasto com água e Energia em indústrias de laticínio



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, (2019)

Na Figura 2-7, é utilizado como exemplo indústrias de laticínio para demonstrar esses elevados gastos, onde 28% da água utilizada na indústria é despendida no processo CIP, assim como 13% da energia gasta em toda ela. De forma geral, assim como no exemplo utilizado, a higienização através de CIP é uma das operações que mais consomem energia e recursos (LI *et al.*, 2019).

Assim, devido aos significantes gastos com o processo CIP, o conhecimento deste, sua modelagem, controle e otimização devem ser objetos de constante estudo. Logo o foco deste trabalho reside na modelagem e controle da etapa de enxágue de um processo CIP.

2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS

As dinâmicas dos processos químicos possuem a particularidade de variar conforme as características destes (SMITH; CORRIPIO, 2012). Devido a essa diversidade torna-se de fundamental importância a determinação de modelos que emulem o processo. Estes podem ser utilizados para um melhor entendimento do processo, para desenvolvimento de uma estratégia de controle, para o dimensionamento de equipamentos, como também para se otimizar as condições de operação do processo (SEBORG *et al.*, 2011; BEQUETTE, 2012).

Os modelos são classificados conforme a sua forma de obtenção: quando desenvolvidos a partir de dados experimentais são denominados de modelos empíricos; quando gerados a partir de princípios fenomenológicos são os modelos teóricos e quando obtidos pelos dois métodos são os chamados modelos semi-empíricos (SEBORG *et al.*, 2011).

Todos os métodos descritos apresentam vantagens e desvantagens. Os modelos teóricos têm como vantagem permitirem uma visão física do comportamento do processo e de

admitirem utilização em uma grande faixa de condições. Entretanto apresentam como desvantagem serem mais caros em comparação a outros modelos e de necessitarem um maior tempo de desenvolvimento, além de, eventualmente, incluírem parâmetros de difícil obtenção ou indisponíveis (SEBORG *et al.*, 2011; BEQUETTE, 2012).

Ao contrário do modelo teórico, modelos empíricos são de desenvolvimento mais fácil, necessitando de menos tempo e menos recurso para sua obtenção, porém possuem uma faixa de utilização restrita que depende dos dados utilizados para o seu desenvolvimento (SEBORG *et al.*, 2011).

2.4.1 Modelos teóricos

Os modelos teóricos utilizam de princípios fenomenológicos para seu desenvolvimento. Podem-se citar como exemplo as leis de conservação de massa e conservação de energia como ponto de partida para alguns modelos.

Utilizando estas leis o seguinte procedimento pode ser utilizado para a obtenção de modelos fenomenológicos: deve-se ter o conhecimento dos objetivos do modelo e do diagrama do processo, e com esses são realizadas hipóteses para o desenvolvimento do modelo. Com as hipóteses, as equações de massa e energia, por exemplo, adequadas são escritas de forma a se construir o modelo, sendo que a análise de graus de liberdade é realizada para determinar se o modelo gerado é passível de ser resolvido (SEBORG *et al.*, 2011).

2.4.2 Modelos empíricos

Como anteriormente descrito, modelos teóricos podem requerer muitas variáveis e parâmetros desconhecidos e ainda possuir um grande número de equações, tornando-os complexos e requerendo mais tempo para serem resolvidos (SEBORG *et al.*, 2011).

Alternativamente ao desenvolvimento de modelos teóricos estão os modelos empíricos que são desenvolvidos a partir de dados experimentais obtidos através de testes realizados na planta, que permitem com apenas o conhecimento das variáveis de entrada e saída obter-se uma função de transferência que corresponda ao processo, sendo que esta é válida dentro das condições de realização do teste (ISERMANN, 2011; LJUNG, 1999).

Na planta, o teste mais comumente realizado para a obtenção de modelos empíricos é, com o processo em estado estacionário, realizar-se uma mudança degrau na variável de entrada para, então, a variável de saída ter sua resposta acompanhada (BEQUETTE, 2012).

Como para o desenvolvimento do modelo empírico é necessário a realização de um teste na planta e este é realizado através de uma mudança degrau na variável de entrada, a amplitude desse degrau deve ser observada: deve possuir amplitude o suficiente para causar uma variação perceptível na variável de saída, mas não pode ser excessivamente grande a ponto de retirar o processo de suas especificações (BEQUETTE, 2012).

Assim, considerando Y a variável de saída e U a variável de entrada, modelos empíricos, quando o processo pode ser aproximado para primeira ordem com tempo morto (*FOPTD- First Order Plus Dead Time*), possuirão uma função de transferência como explicitada pela Equação (1).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{(\tau_p \cdot s + 1)} \cdot e^{-\theta_p \cdot s} \quad (1)$$

Na Equação, K_p é o ganho do processo, τ_p a constante de tempo e θ_p o tempo morto do processo, sendo que todos podem ser determinados através dos dados de saída do processo. Caso o processo não possua tempo morto, θ_p é zero e a Equação (1) se resume a Equação (2).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{(\tau_p \cdot s + 1)} \quad (2)$$

Quando a entrada realizada for um degrau de amplitude A , pode-se escrever a Equação (3).

$$U(s) = \frac{A}{s} \quad (3)$$

Substituindo a Equação (3) nas Equações (1) e (2), resulta as Equações (4) e (5), com e sem o tempo morto respectivamente.

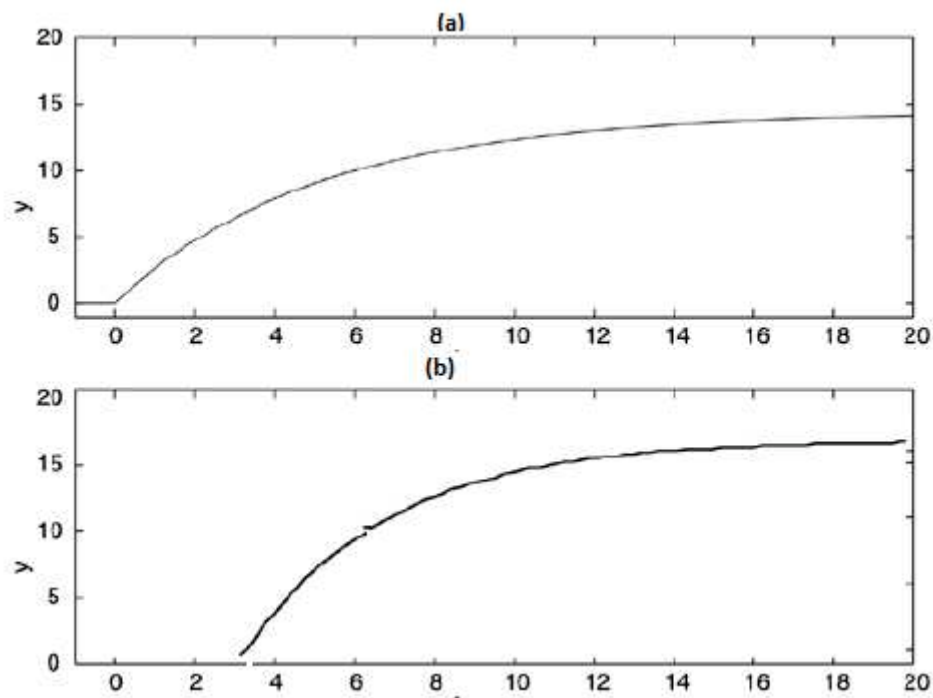
$$Y(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta_p \cdot s}}{(\tau_p \cdot s + 1)} \cdot \frac{A}{s} \quad (4)$$

$$Y(s) = \frac{K_p}{(\tau_p \cdot s + 1)} \cdot \frac{A}{s} \quad (5)$$

Como modelos empíricos identificados necessitam apenas dos valores de saída ($Y(s)$) e de entrada ($U(s)$), obtidos com base no teste realizado, com essas informações é possível obter K_p , τ_p e θ_p , conforme será descrito ainda nesta seção.

Na Figura 2-8 (a) é apresentado o comportamento de um processo de primeira ordem sem tempo morto (Equação 5), enquanto que na Figura 2-8 (b) o comportamento de um processo de primeira ordem com tempo morto (Equação 4), quando é aplicado um degrau na variável de entrada.

Figura 2-8- Resposta de um processo de primeira ordem para uma entrada degrau



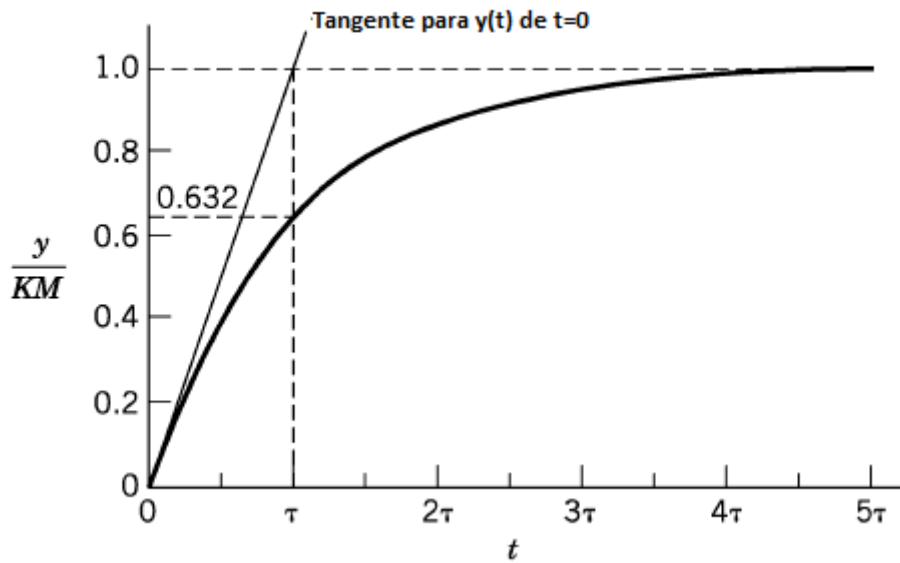
Fonte: Adaptado de BEQUETTE (2012)

O ganho do processo, K_p , será determinado pela razão entre a variação da saída e a variação da entrada, conforme apresentado na Equação (6).

$$K_p = \frac{\Delta y}{A} \quad (6)$$

Já a constante de tempo do processo, τ_p , pode ser determinada através do método da tangente o qual uma reta tangente é traçada em $t=0$ e a interseção desta com a linha horizontal $K_p \cdot A$ (linha horizontal traçada no valor do estado estacionário final) ocorre em $t = \tau_p$. O método da tangente está representado na Figura 2-9 (SEBORG *et. al.*, 2011).

Figura 2-9- Método da tangente e Método de Miller



Fonte: Adaptado de SEBORG *et. al.* (2011)

Outro método gráfico existente é o método de Miller no qual o valor de 63,2% do produto $K_p \cdot A$ (63,2% do valor no estado estacionário) é calculado e esse ocorre em $t = \tau_p$. Este método também está exemplificado na Figura 2-9.

O termo referente ao tempo morto do processo (θ_p) pode ser adicionado devido ao fato de que poucos processos geram uma resposta exata de primeira ordem para uma mudança em degrau no valor da variável de entrada. Este comportamento se deve principalmente ao fato de os processos geralmente não serem lineares e nem de primeira ordem e estes poderem apresentar um componente aleatório advindo de ruídos na variável de saída, além da possibilidade de perturbações alterarem esta saída do processo. Assim, para englobar esses processos que não seguem exatamente a dinâmica de primeira ordem ou processos de ordem maior adiciona-se o termo referente ao tempo morto do processo, de forma a se realizar uma aproximação para uma função de primeira ordem, com uma função de transferência conforme Equação (1) (SEBORG *et. al.*, 2011).

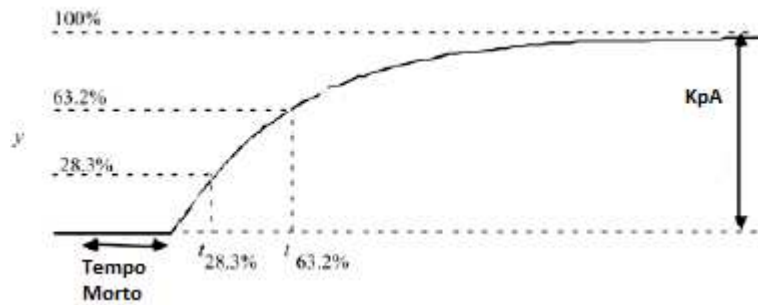
Para processos que possuam tempo morto, os métodos da tangente e de Miller são realizados de forma similar. No método da tangente esta passa a ser traçada em $t = \theta_p$, quando a resposta do sistema começa a variar. Já no método de Miller, o valor referente a 63,2% do produto $K_p \cdot A$ ocorrerá em $t = \theta_p + \tau_p$.

O método da tangente e o método de Miller utilizam apenas um ponto para construir a função de transferência, sendo deste modo mais imprecisos. Os métodos que utilizam mais

de um ponto da curva de reação do processo podem produzir melhores resultados quanto aos parâmetros da função de transferência. Pode-se citar o método de Smith e o método de Sundaresan e Krishnaswamy (S&K) como métodos que utilizam mais de um ponto da resposta.

O Método de Smith é proposto de forma a que o modelo e os valores experimentais coincidam em pontos de grande mudança da resposta, sendo que dois instantes são adotados para a determinação dos parâmetros: os tempos requeridos para que o sistema alcance 28,3% e 63,2% do valor do estado estacionário final, conforme demonstrado na Figura 2-10 (BEQUETTE, 2012; MARLIN, 2014).

Figura 2-10- Método de Smith



Fonte: Adaptado de BEQUETTE (2012)

Assim, com os valores de $t_{28,3}$ e $t_{63,2}$ é possível determinar os parâmetros da função de transferência através das Equações (7) e (8), que foram desenvolvidas analiticamente a partir da equação do modelo.

$$\tau_p = 1,5 \cdot (t_{63,2} - t_{28,3}) \quad (7)$$

$$\theta_p = t_{63,2} - \tau_p \quad (8)$$

O método de S&K assim como o método de Smith utiliza dois pontos da resposta do sistema e evita a utilização do ponto de inflexão da curva. Neste método, os tempos propostos pelos autores são os tempos necessários para alcançar 35,3% (t_1) e a 85,3% (t_2) do valor do estado estacionário final. Por meio do emprego das Equações (9) e (10), pode-se determinar τ_p e θ_p (SEBORG *et. al.*, 2011).

$$\tau_p = 0,67 \cdot (t_2 - t_1) \quad (9)$$

$$\theta_p = 1,3 \cdot t_1 - 0,29 \cdot t_2 \quad (10)$$

Os métodos descritos podem fornecer excelentes aproximações para os parâmetros dos modelos empíricos identificados. Contudo, deve ser ressaltado o fato de que pode ser necessário ajustar manualmente os valores dos parâmetros encontrados em busca de melhores aproximações.

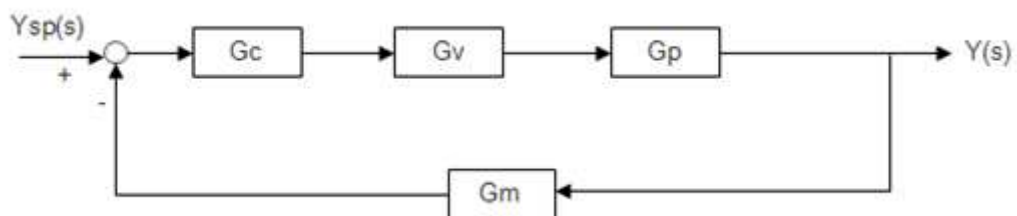
O conhecimento dos modelos empíricos identificados possibilita a implementação de estratégias de controle melhores, além da otimização do processo.

2.5 CONTROLE DE PROCESSOS

Um processo em malha fechada deve, idealmente, ser estável, minimizar os efeitos das perturbações respondendo de forma rápida a estas, bem como às mudanças de *setpoint*, eliminar o erro em regime estacionário (*offset*) e preferencialmente ser robusto, além de garantir a segurança do processo e manter o produto nas condições especificadas. Como satisfazer todos esses aspectos simultaneamente não é viável, a escolha dos parâmetros do controlador é de extrema importância, pois esses devem satisfazer o objetivo do controle, balanceando desempenho e robustez (SEBORG *et. al.*, 2011).

A estratégia de controle *feedback* é uma das mais utilizadas. Nesta a variável de saída do processo é medida permitindo que a ação corretiva ocorra independente de perturbações, realizando-se assim o controle da variável de interesse (SEBORG *et. al.*, 2011). Pode-se esquematizar um controle *feedback* conforme a Figura 2-11, sendo que G_v é a função de transferência referente à função válvula, G_m à função de transferência do sensor, G_p a função referente ao processo e G_c a do controlador.

Figura 2-11-Diagrama de blocos: Controle feedback



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Também na Figura 2-11, $Y_{sp}(s)$ é o valor de *setpoint* da variável controlada e $Y(s)$ o valor da variável controlada, todos expressos na forma de variável desvio.

Um controlador PID é assim denominado, pois neste existe um modo de controle proporcional, um modo de controle integral e um modo de controle derivativo. Assim, a função de transferência referente a esse controlador, G_C é dada pela Equação (11).

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_I \cdot s} + \tau_D \cdot s \right) \quad (11)$$

Sendo que na Equação (11), K_C é o ganho proporcional do controlador, τ_I é o tempo integral, τ_D é o tempo derivativo, $U(s)$ o sinal de saída do controlador e $e(s)$ o sinal de erro calculado pela Equação (12).

$$e(s) = Y(s) - Y_{sp} \quad (12)$$

Entretanto é possível realizar o controle de um processo sem utilizar todas os modos de controle. Assim, para um controlador *PI* (proporcional e integral) a função de transferência se resume à Equação (13), enquanto para um controlador puramente proporcional se resume a Equação (14).

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_I \cdot s} \right) \quad (13)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_C \quad (14)$$

No aplicativo MATLAB™ a Equação (11) é apresentada na forma da Equação (15), sendo $P = K_C$, $I = \frac{1}{\tau_I}$ e $D = \tau_D$.

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = P \cdot \left(1 + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}} \right) \quad (15)$$

O termo N , na Equação (15), se refere a um termo de filtro, que possui a função de diminuir a sensibilidade dos cálculos no termo derivativo devido a possíveis ruídos (CARNEIRO, 2017).

Para a escolha do tipo de controlador a ser utilizado deve-se atentar às características que cada modo de controle apresenta, a saber: o modo de controle puramente proporcional tende a apresentar *offset*, pois a variável de saída do controlador (variável de entrada do processo) e a variável de saída do processo chegam a um equilíbrio antes de o erro tender a

zero, o que pode ser corrigido ao se utilizar o controle *PI*. No controle *PI*, a presença do modo integral força o erro a tender zero, mas pode gerar oscilações e sobressinal. Ainda pode-se adicionar uma maior complexidade ao controlador ao adicionar o modo derivativo – controle *PID*, o que permite ao controlador antecipar a correção dos erros (BEQUETTE, 2012).

Assim, para um controle satisfatório do processo é necessária a escolha correta do controlador e de seus parâmetros, sendo que a determinação destes parâmetros é denominada de sintonia do controlador.

2.5.1 Métodos de sintonia

É possível realizar a sintonia de um controlador através de métodos consolidados na literatura, sendo que existem métodos que realizam a sintonia considerando o processo em malha aberta e alguns que consideram o processo em malha fechada. Neste trabalho estarão descritos os métodos mais conhecidos de sintonia de controladores.

2.5.1.1. Métodos de sintonia: Malha aberta

Considerando a função de transferência do processo, $G_p(s)$, como uma função de primeira ordem com tempo morto, descrita conforme Equação (1), é possível calcular os parâmetros do controlador desse processo através das relações de sintonia propostas por de Ziegler-Nichols (Quadro 2-2) ou Cohen-Coon (Quadro 2-3), que desenvolveram essas relações de modo a possuir uma resposta em malha fechada com $\frac{1}{4}$ de taxa de decaimento (BEQUETTE, 2012).

Quadro 2-2- Relações para 1º método de Ziegler-Nichols

Controlador	K_c	τ_i	τ_D
P	$\frac{\tau_p}{K_p \theta_p}$	-	-
PI	$\frac{0,9\tau_p}{K_p \theta_p}$	$3,33\theta_p$	-
PID	$\frac{1,2\tau_p}{K_p \theta_p}$	$2\theta_p$	$0,5\theta_p$

Fonte: BEQUETTE, 2012

Quadro 2-3- Relações - Cohen-Coon

Controlador	K_c	τ_I	τ_D
P	$\frac{\tau_p}{K_P \theta_P} \left(1 + \frac{\theta_P}{3\tau_p} \right)$	-	-
PI	$\frac{\tau_p}{K_P \theta_P} \left(0,9 + \frac{\theta_P}{12\tau_p} \right)$	$\frac{\theta \left(30 + \frac{3\theta_P}{\tau_p} \right)}{9 + \frac{20\theta_P}{\tau_p}}$	-
PID	$\frac{\tau_p}{K_P \theta_P} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta_P}{4\tau_p} \right)$	$\frac{\theta_P \left(32 + \frac{6\theta_P}{\tau_p} \right)}{13 + \frac{8\theta_P}{\tau_p}}$	$\frac{4\theta_P}{11 + \frac{2\theta_P}{\tau_p}}$

Fonte: BEQUETTE, 2012

Ainda com o conhecimento da função de transferência do processo em malha aberta pode-se determinar os parâmetros de sintonia pelo critério ITAE e pelos métodos IMC.

O método baseado no critério ITAE também se utiliza de funções de transferência da forma da Equação (1). Esse método foi desenvolvido de forma a melhorar a resposta do processo em malha fechada, minimizando a integral do erro (SEBORG *et al.*, 2011).

O critério ITAE é dado pela Equação (16), mas ainda existem outros critérios para analisar o desempenho da malha fechada, sendo eles o IAE, dado pela Equação (17) e o ISE, definido conforme Equação (18).

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (16)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| \cdot dt \quad (17)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) \cdot dt \quad (18)$$

Assim, para o cálculo dos parâmetros do controlador pelo método ITAE são utilizadas as equações explicitadas no Quadro 2-4, tanto para controladores que tem como principal função a mudança de *setpoint* (controlador servo) ou a rejeição de perturbações (controlador regulador).

Quadro 2-4- Relações para o método ITAE

	Controlador	Modo	A	B
Carga	PI	P	0,859	0,977
		I	0,674	-0,68
Carga	PID	P	1,357	-0,947
		I	0,842	-0,738
		D	0,381	0,995
Set Point	PI	P	0,586	-0,916
		I	1,03 ^b	-0,165 ^b
Set Point	PID	P	0,965	-0,85
		I	0,796 ^b	-0,1465 ^b
		D	0,308	0,929
<p>Relações: $Y = A \left(\frac{\theta_P}{\tau_p} \right)^B$, onde $Y = K_P K_C$, para o modo proporcional, τ_p/τ_i para o modo integral e τ_D/τ_p para o modo derivativo.</p> <p>b. Para mudanças no <i>set-point</i> a relação para o modo integral é: $\frac{\tau_p}{\tau_i} = A + B(\theta_P/\tau_p)$.</p>				

Fonte: SEBORG *et. al.* (2011)

Já o método IMC é baseado em assumir o modelo do processo e desenvolver expressões analíticas para o controlador, sendo que expressões para diversos tipos de função de transferência já foram desenvolvidas e algumas estão explicitadas no Quadro 2-5 (SEBORG *et al.*, 2011).

Quadro 2-5- Relações método IMC

Caso	Modelo	$K_c K_p$	τ_i	τ_D
A	$\frac{K_p}{\tau_p s + 1}$	$\frac{\tau_p}{\tau_c}$	T	-
B	$\frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
C	$\frac{K_p}{\tau^2 s + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
D	$\frac{k(-\beta s + 1)}{\tau^2 s + 2\zeta \tau s + 1}, \beta > 0$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c + \beta}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
E	$\frac{K_p}{s}$	$\frac{2}{\tau_c}$	$2\tau_c$	-
F	$\frac{K_p}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c + \tau}{\tau_c^2}$	$2\tau_c + \tau$	$\frac{2\tau_c \tau}{2\tau_c + \tau}$
G	$\frac{K_p \theta_p^{-s}}{\tau_p s + 1}$	$\frac{\tau_p}{\tau_c + \theta_p}$	T	-
H	$\frac{K_p k \theta_p^{-s}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau + \frac{\theta_p}{2}}{\tau_c + \frac{\theta_p}{2}}$	$\tau + \frac{\theta_p}{2}$	$\frac{\tau \theta_p}{2\tau + \theta_p}$

Fonte: SEBORG, *et al.* (2011)

No Quadro 2-5, o parâmetro τ_c é a constante de tempo em malha fechada e a escolha desse parâmetro é uma decisão importante para a determinação dos parâmetros do controlador, pois, de forma geral, maiores valores de τ_c geram controles mais conservadores (SEBORG *et al.*, 2011).

2.5.1.2 Métodos de sintonia: Malha fechada

A sintonia de controladores pode também ser realizada considerando o processo em malha fechada. O 2º método de Ziegler-Nichols e o método da auto-sintonia via relé são exemplos de métodos que consideram o processo já em malha fechada.

Esses métodos não serão detalhados nesta dissertação, mas o 2º método de Ziegler-Nichols consiste, basicamente, na utilização do controlador puramente proporcional até que se atinja o limiar de estabilidade da malha de controle, onde se determina o valor de K_{cr} , valor que proporcionou essa situação, e o valor de P_{cr} correspondente ao tempo entre picos

sucessivos e com K_{cr} e P_{cr} determina-se os parâmetros do controlador por meio das relações de sintonia dadas pelo método (BEQUETTE, 2012).

Já o método de auto-sintonia via relé permite a determinação de K_{cr} e P_{cr} através de um teste experimental, no qual o controle *feedback* é temporariamente substituído por um controlador *on-off*. Com esses valores determina-se os parâmetros do controlador através das relações do 2º método de Ziegler-Nichols (SEBORG *et al.*, 2011).

É importante destacar o fato de que existe no mercado alguns aplicativos que apresentam ferramentas que possibilitam realizar a sintonia de controladores de maneira automática.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

Os processos de incrustação e limpeza são caracterizados por mecanismos bastante complexos com poucos trabalhos experimentais abordando o emprego de modelos matemáticos que descrevam o processo associados com a melhoria do desempenho do sistema de automação tipicamente empregado por sistemas de limpeza CIP.

Assim, a abordagem empregada nesta dissertação complementa alguns estudos já existentes, buscando um melhor desempenho do sistema de controle do processo CIP, com um interesse específico na redução do consumo de água. Para tanto, trabalhos publicados na literatura referentes a este assunto são discutidos neste subitem.

Gormezano (2007) estudou a cinética de remoção de resíduos de leite utilizando um protótipo que emulava um tubo de um trocador de calor, variando a vazão da solução de limpeza e considerando a utilização de eletrólise. Para o acompanhamento da quantidade de resíduo removido, o autor realizou medições utilizando espectrofotometria. Os resultados obtidos sugeriram que a utilização de eletrólise acarreta, de modo geral, uma melhora na eficiência da remoção e que a cinética do processo pode ser representada por um modelo semiempírico identificado de primeira ordem, sendo este determinado de acordo com cada vazão utilizada.

Melero Jr. (2011), utilizando-se de um trocador de calor do tipo casco e tubos em escala semi-industrial, teve como objetivo instrumentar o trocador e realizar experimentos

para a determinação do comportamento da cinética de remoção do detergente residual na etapa de enxágue. O autor também empregou modelos matemáticos semiempíricos identificados do tipo FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) para representar o comportamento do sistema em estudo.

O trabalho de Melero Jr. (2011) possibilitou, também, o estudo da influência da temperatura e vazão empregadas nos experimentos realizados sobre o tempo necessário para se completar a etapa de enxágue, visando à redução do consumo de água. Assim, modelos FOPDT que representassem o comportamento dinâmico do pH para vários valores de vazão de água de enxágue foram obtidos, bem como foi verificado que a temperatura não é relevante para a cinética do processo.

Sislian (2012) utilizou o mesmo equipamento que Melero Jr. (2011) na realização de experimentos para a determinação do comportamento da cinética de remoção do detergente residual na etapa de enxágue. O autor empregou modelos matemáticos do tipo *Neuro-Fuzzy* para representar o comportamento do processo de remoção do detergente residual. O autor validou os modelos desenvolvidos experimentalmente e, também, por comparação com os resultados obtidos com os modelos do tipo FOPDT identificados por Melero Jr. (2011).

Santos (2014) e Carrera (2015) realizaram trabalhos similares em indústrias. Santos (2014) desenvolveu seu trabalho na empresa Fromageries Bel S.S. Para tanto, elaborou um fluxograma de processo da instalação e acompanhou a execução do processo de limpeza CIP como um todo, visando a obtenção dos parâmetros necessários. Na sequência determinou-se todas as não conformidades e foram elaborados manuais de operação que contribuíram para o aumento da eficiência do processo CIP.

Carrera (2015) estudou a validação do processo de limpeza CIP em uma microcervejaria, através da qualificação das instalações e da verificação se elas seguiam as recomendações de projeto higiênico, além da análise da existência de pontos mortos no equipamento. Por meio deste trabalho foi possível identificar erros de projeto higiênico, determinar que a vazão utilizada estava fora do requerido, além de permitir a realização de sugestões de forma a se aumentar a eficiência do processo CIP.

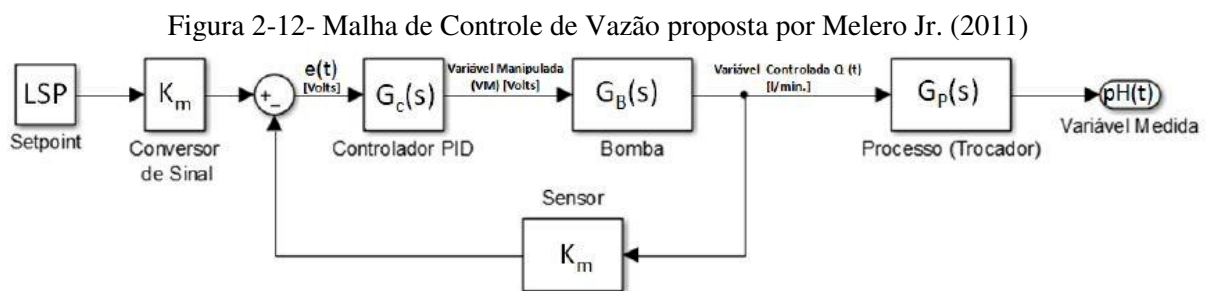
Carneiro (2017) desenvolveu um modelo matemático dinâmico que possibilitava a alteração do *setpoint* do controlador de forma automática e estudou uma estratégia de

otimização dos parâmetros de sintonia do controlador de vazão de água de enxágue empregando um algoritmo genético, sendo essa estratégia simulada no ambiente Simulink™ do aplicativo MATLAB™. Os resultados obtidos pela autora contribuíram para a determinação dos intervalos de vazão mais adequados para a operação de enxágue e sugeriu uma melhor eficiência no processo ao se utilizar a otimização.

Silva (2018) estudou o comportamento da etapa de enxágue do processo CIP, ao se utilizar vazão pulsada de água nessa etapa para a identificação de modelos semiempíricos identificados do processo de remoção do detergente residual, sendo que a variável de controle neste trabalho foi a condutividade elétrica da solução efluente. O trabalho foi realizado em bancada experimental compacta e empregou técnicas de fluidodinâmica computacional para tentar explicar o mecanismo da remoção do detergente residual em trechos de geometria mais complexa. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de vazão pulsada na etapa de enxágue aumenta a eficiência da remoção e gera economia de energia.

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a eficiência da estratégia de controle proposta por Carneiro (2017), utilizando a bancada experimental compacta empregada por Silva (2018), considerando a economia de água de enxágue. É importante deixar claro que a proposta de Carneiro (2017) era a melhoria do desempenho do sistema de controle empregado por Melero Jr. (2011) no trocador de calor em escala semi-industrial.

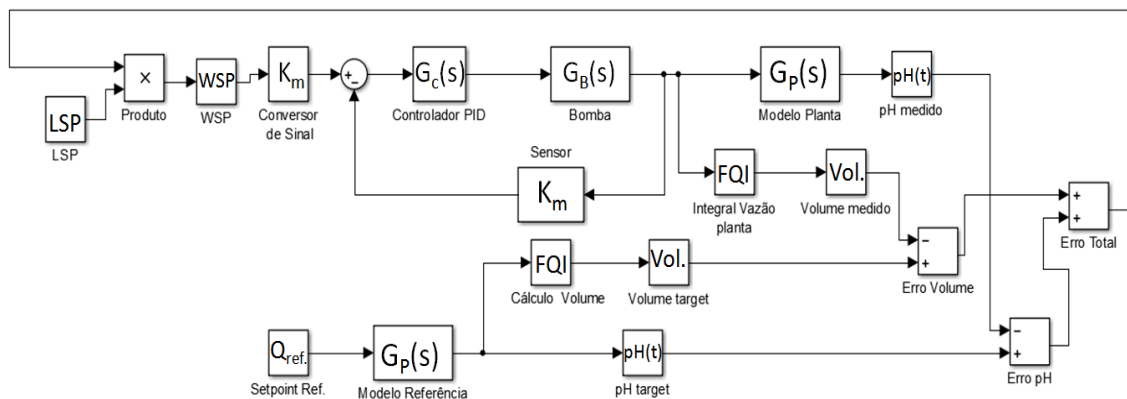
Analisando o sistema de controle empregado por Melero Jr. (2011), tem-se na Figura 2-12, o diagrama de simulação da malha de controle de vazão de água de enxágue, na qual *LSP* é o *Local Setpoint*, que representa o valor da vazão definida pelo operador, K_m o ganho do sensor de vazão e do *LSP*, responsável por converter o sinal de entrada de L/min para o sinal de saída em Volts, $G_c(s)$ o modelo do controlador, $G_B(s)$ o modelo empírico da bomba, $G_P(s)$ o modelo empírico do processo (CARNEIRO, 2017).



Fonte: CARNEIRO (2017)

Na estratégia de controle da Figura 2-12, percebe-se que o pH durante a etapa de enxágue não está sendo controlado. A malha de controle por realimentação está controlando apenas a vazão de água de enxágue por meio de uma bomba. Assim, de forma a se otimizar o consumo de água dessa etapa Carneiro (2017), criou uma estratégia de controle de vazão cujo *setpoint* é dinamicamente definido pelos desvios medidos do pH e do volume de água definido como meta a ser alcançada. Para testar o funcionamento teórico da malha de controle foram utilizados os modelos obtidos por Melero Jr. (2011). A nova estratégia de controle sugerida por Carneiro (2017) está apresentada na Figura 2-13, onde se percebe que nesta estratégia a etapa de enxágue participa da malha fechada.

Figura 2-13- Estratégia de controle proposta por Carneiro (2017)



Fonte: CARNEIRO (2017)

Enquanto anteriormente o LSP, permanecia constante até o final do processo, nesta nova estratégia de controle esse valor será alterado automaticamente. Para isso os modelos do processo, obtidos por Melero Jr. (2011), geram valores de pH e volume de água gasto, em tempo real, que são realimentados e utilizados para se calcular o novo valor de *setpoint*, denominado *Work Setpoint (WSP)*, calculado por meio da Equação (19) (CARNEIRO, 2017).

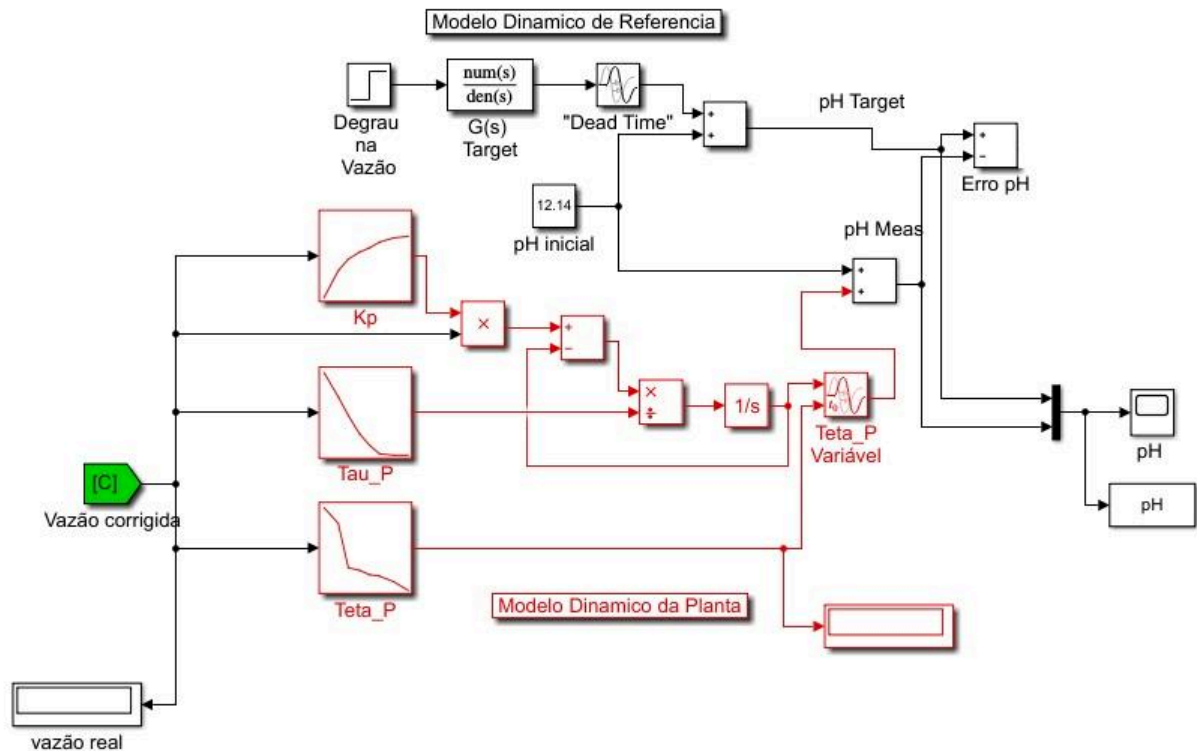
$$WSP = LSP \cdot (0,5 \cdot Erro\ pH + 0,5 \cdot Erro\ Vol.) \quad (19)$$

Na Equação (19), os desvios *Erro pH* e *Erro Vol.* foram ponderados com o emprego de pesos constantes e iguais a 0,5. Optou-se por utilizar os pesos com valores iguais para levar em consideração tanto a trajetória de comportamento do pH quanto a do volume de água gasto. Importante destacar, também, que os referidos desvios foram calculados utilizando valores normalizados entre 0 e 1.

O WSP após calculado é direcionado para o cálculo do erro que é direcionado para o controlador (WSP-Vazão). Como pode ser observado na Figura 2-13, o controlador recebe esse sinal do erro e o sinal de saída deste é a vazão, que será direcionada ao processo e também para um totalizador para ser utilizada para o cálculo do erro de Volume. Do processo tem-se o sinal de pH medido que será realimentado a estratégia por meio do cálculo do erro de pH.

Logo para o cálculo do valor do *WSP*, como definido por Carneiro (2017), é necessário a determinação dos desvios de pH e de volume a cada instante. O Erro do pH é calculado conforme demonstrado no diagrama de simulação apresentado na Figura 2-14.

Figura 2-14- Cálculo do desvio do pH como proposto por Carneiro (2017)



Fonte: CARNEIRO (2017)

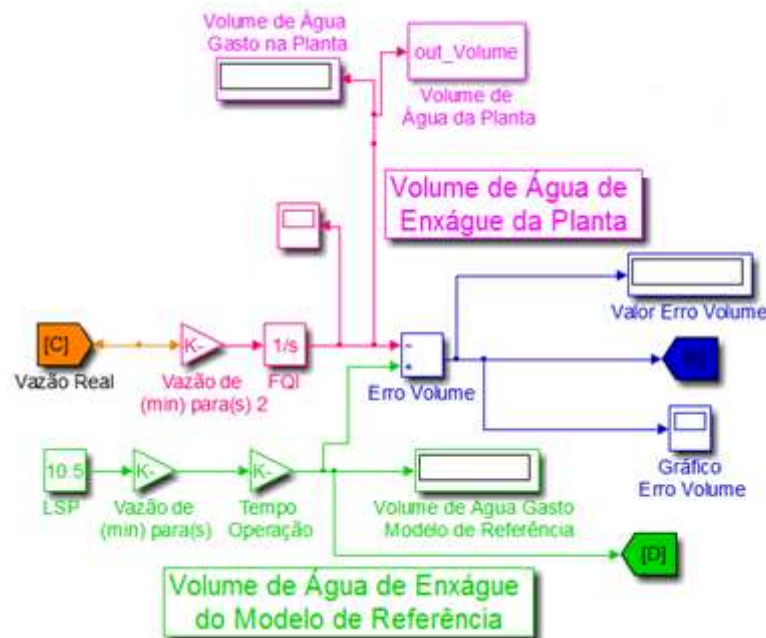
Na Figura 2-14, o modelo de referência citado por Carneiro (2017) representa a condição desejada ideal de comportamento do pH para um determinado valor de vazão de água de enxágue. Ele é obtido experimentalmente com base nas melhores práticas adotadas pelos operadores de processo mais experientes.

O modelo dinâmico do processo é aquele desenvolvido por Melero Jr. (2011), contemplando os valores de vazão de água de enxágue estudados. Trata-se na realidade de um

modelo múltiplo, identificado com base nos comportamentos experimentais observados do pH. Assim, o desvio é calculado pela diferença entre o valor medido – calculado com base no modelo dinâmico múltiplo – e o valor *target*, gerado pelo modelo de referência, (CARNEIRO, 2017).

Já o Erro de Volume é calculado conforme apresentado na Figura 2-15. Neste a vazão de água, Bloco C, que varia conforme a operação do controlador é direcionada ao totalizador que calcula o gasto de volume total da estratégia de controle. Esse valor é utilizado para o cálculo do erro do volume, que é a diferença entre volume gasto e volume do modelo de referência, sendo esse erro direcionado ao cálculo do WSP (CARNEIRO, 2017).

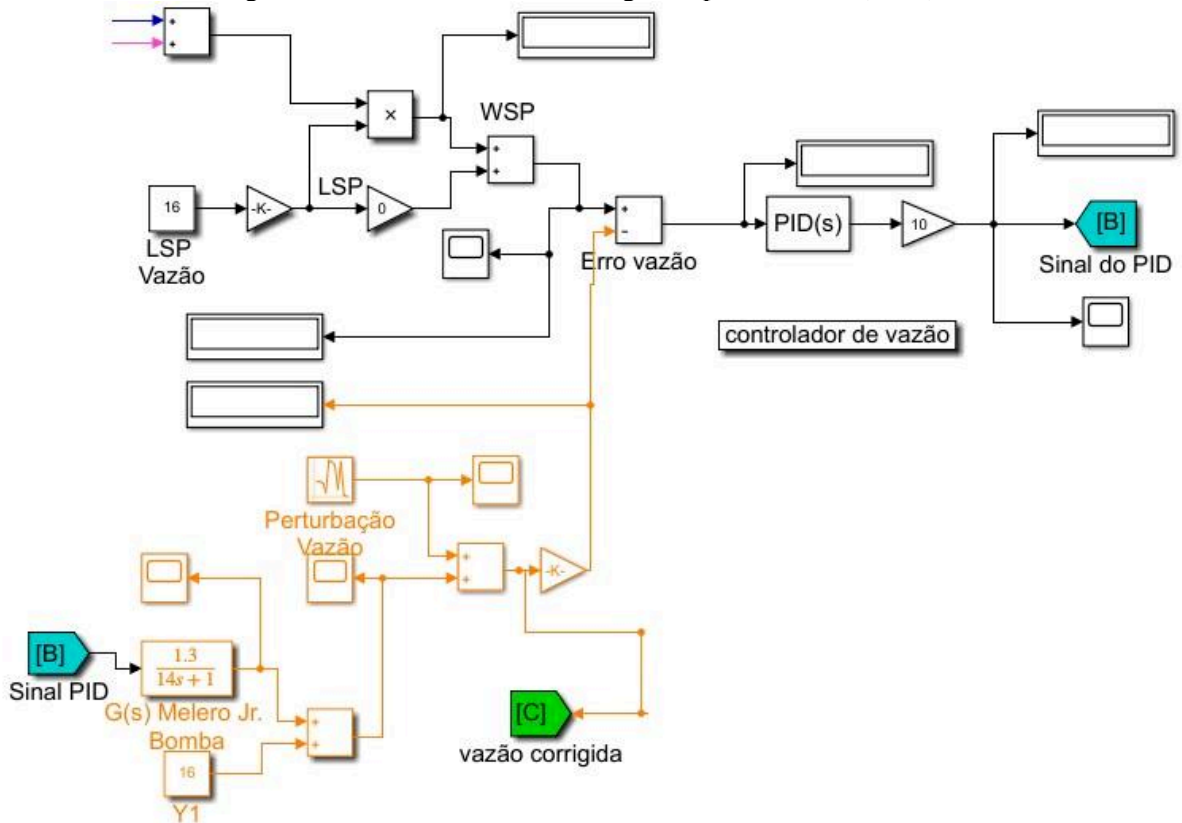
Figura 2-15- Cálculo do desvio de Volume conforme proposto por Carneiro (2017)



Fonte: CARNEIRO (2017)

É importante salientar que os erros são normalizados para que apresentem a mesma ordem de grandeza. Os desvios gerados são direcionados para o cálculo do *WSP* que é o *setpoint* do controlador de vazão. Assim, o valor do desvio introduzido no controlador é a diferença entre o *WSP* e o valor da vazão medida e o sinal de saída do controlador é a entrada da função de transferência do inversor da bomba que irá ajustar a vazão do processo, como pode ser observado na Figura 2-16.

Figura 2-16- Malha de controle sugerida por Carneiro (2017)



Fonte: CARNEIRO (2017)

Essa estratégia de controle sugerida por Carneiro (2017) será, no presente trabalho, modificada para utilização com outra variável e avaliada quanto a economia de água e de tempo propiciada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia de controle proposta por Carneiro (2017) considera os desvios de pH e do volume de água gasto para o cálculo do *WSP*. Nesta dissertação, as variáveis de processo consideradas foram a condutividade elétrica da solução efluente e o volume de água gasto. A substituição da variável pH por condutividade deve-se ao fato dessa última ser mais utilizada industrialmente, pois os condutivímetros apresentam melhor desempenho para processos dinâmicos e analíticos quando comparados à pHmetros (MELERO JR., 2011)

Como a variável condutividade foi utilizada, é necessário o conhecimento da dinâmica dessa, como ela se comporta no processo com o tempo, para a determinação dos modelos que a representam. Para tanto, experimentos foram conduzidos por Silva (2018) para diferentes valores de vazão, visando a aquisição dos dados necessários para a identificação da dinâmica do processo.

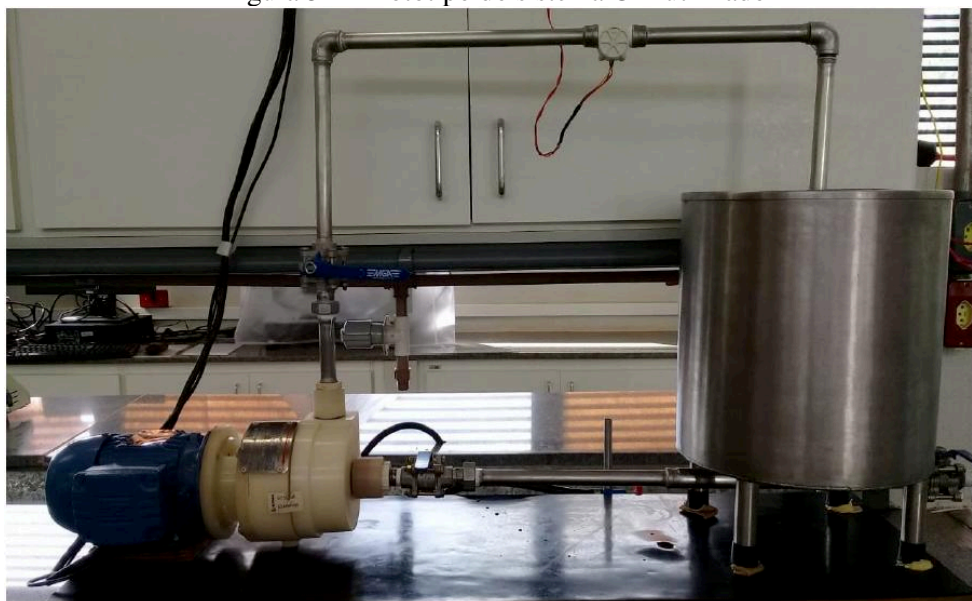
As vazões consideradas foram: 5L/min, 6L/min, 7L/min, 8L/min, 9L/min, 10L/min e 11L/min. Nesses experimentos uma solução de NaOH previamente transferida ao tanque de alimentação foi circulada pelas tubulações do protótipo, sendo descartada para o dreno ao deixar a seção de testes. O tanque de alimentação esvaziado foi, na sequência, carregado com água de enxágue, a qual foi feita circular pelas mesmas tubulações anteriormente citadas, também com descarte para o dreno. Durante a etapa de enxágue com água foi realizada a coleta eletrônica dos valores das variáveis de processo de interesse, a saber: vazão e condutividade elétrica da solução efluente.

Com base nos resultados experimentais obtidos foi possível realizar a identificação dos modelos semiempíricos que representassem o comportamento dinâmico do sistema. Inicialmente essa determinação foi realizada por meio das equações de modelagem apresentadas anteriormente neste trabalho e posteriormente ajustes manuais foram realizados de forma que os modelos fornecessem representações mais precisas do comportamento do processo.

Na Figura 3-1, é apresentada a foto da bancada experimental utilizada para a realização dos testes visando a coleta eletrônica dos valores de vazão e de condutividade, a partir da qual os modelos foram identificados. A tubulação utilizada no protótipo foi construída em aço inoxidável AISI 304, com grau de polimento nº4. Ela é formada pelos

seguintes equipamentos: (i)- tanque para armazenamento; (ii)- resistência elétrica para realizar aquecimento da solução no interior do tanque; (iii)- válvulas de bloqueio e (iv)- bomba centrífuga empregada para efetuar a circulação da solução detergente e da água de enxágue. A instrumentação utilizada na bancada experimental foi: (i)- sensor de vazão; (ii)- inversor de frequência para manipular a rotação do rotor da bomba; (iii)- sensor de temperatura, (iv)- condutivímetro e (v)- sistema eletrônico de monitoração e controle.

Figura 3-1- Protótipo do sistema CIP utilizado



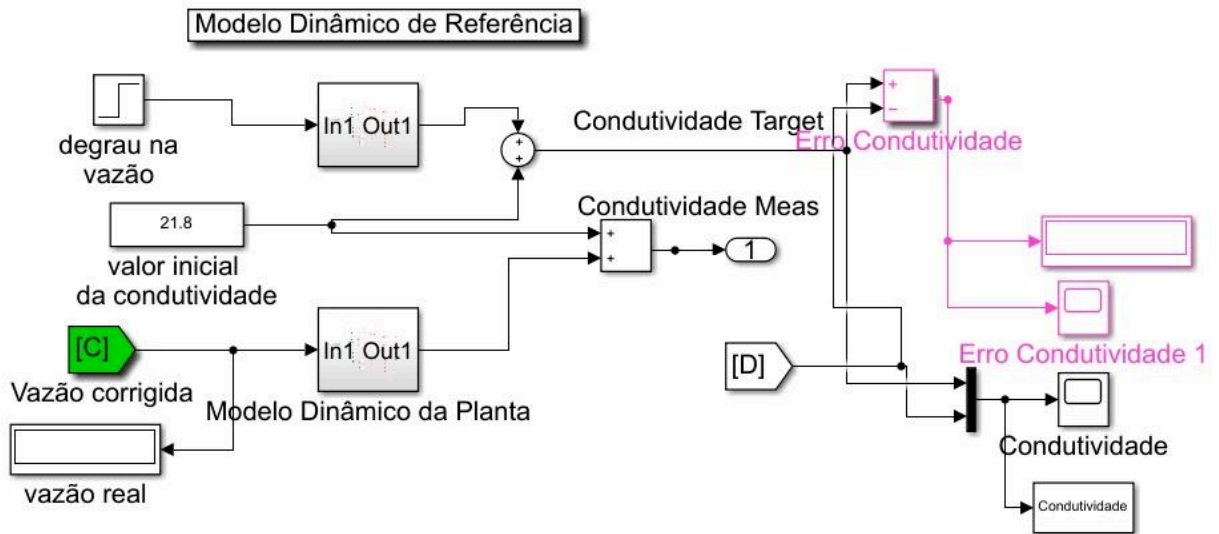
Fonte: SILVA (2018)

Assim, com os modelos determinados foi possível realizar as adaptações necessárias no diagrama de simulação utilizado por Carneiro (2017). Essas adaptações estão explicitadas no presente trabalho, utilizando a título de exemplo como modelo de referência aquele desenvolvido para a vazão de água de enxágue igual a 9L/min.

Inicialmente é fundamental a alteração dos modelos que representam o comportamento do processo. Na Figura 2-14 é explicitado como esses modelos estão representados no diagrama utilizado por Carneiro (2017).

Como a variável pH não é mais utilizada e em seu lugar controla-se condutividade, foi necessário readequar o diagrama de simulação apresentado na Figura 2-14, substituindo alguns blocos de função utilizados por outros desenvolvidos com base nesta dissertação de mestrado. Na Figura 3-2 é apresentado o diagrama de simulação revisado para realizar o tratamento da variável condutividade elétrica da solução efluente do protótipo.

Figura 3-2- Diagrama de simulação revisado para trabalhar com a condutividade

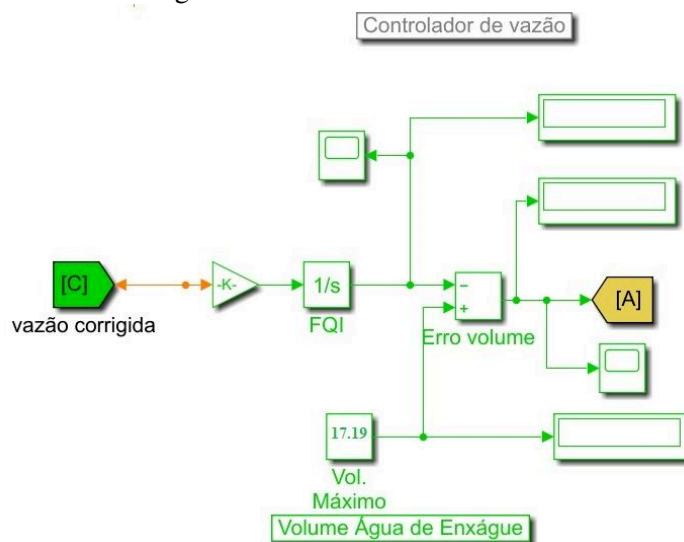


Fonte: Acervo Pessoal (2021)

O bloco intitulado “Modelo Dinâmico da Planta” desempenha o mesmo papel que aquele realizado no diagrama de simulação da Figura 2-14 e incorpora todos os parâmetros dos modelos empíricos de forma a representar o funcionamento da planta em tempo real.

O erro de condutividade é calculado de forma semelhante ao erro de pH, apenas com a mudança dos modelos, como pode ser observado na Figura 3-2. O erro de volume também é calculado de forma semelhante, como apresentado na Figura 3-3. Foi utilizado como volume de água de enxague de referência para as análises de erro, o volume máximo empregado nos testes que foi igual a 17,19 L, para o caso exemplificado de vazão 9L/min.

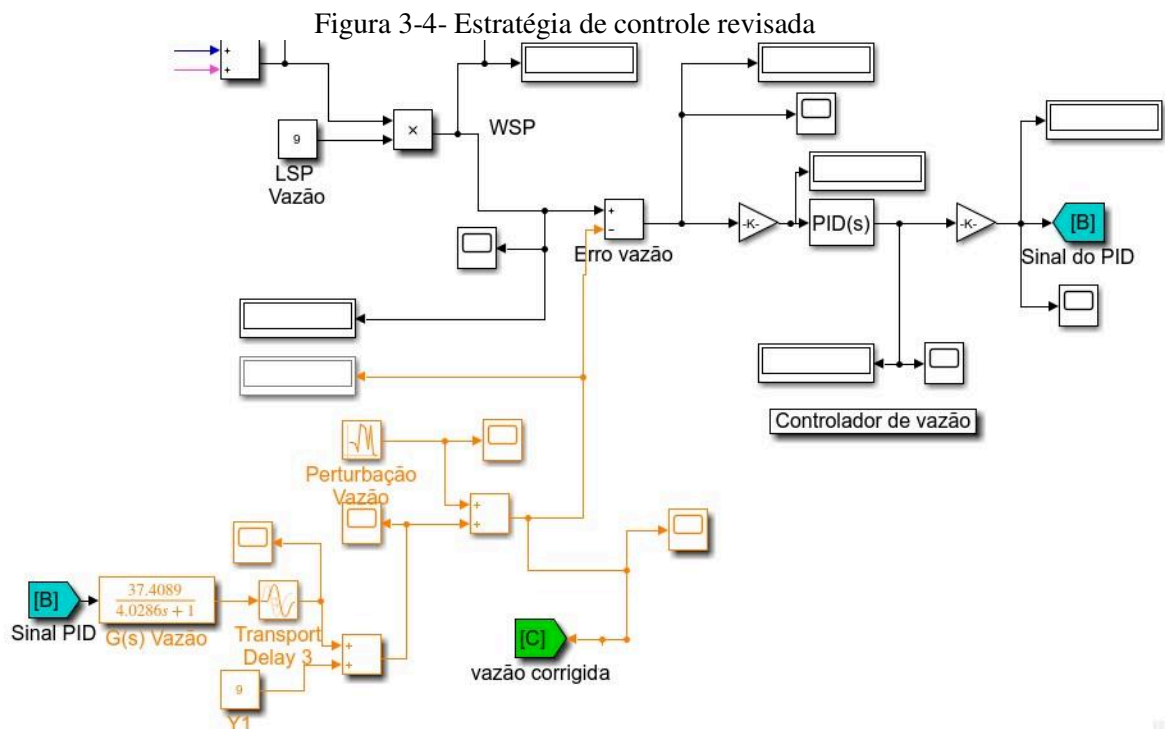
Figura 3-3- Cálculo Erro Volume



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Os cálculos de normalização dos erros foram realizados da mesma maneira que a explicitada por Carneiro (2017). A única mudança realizada nessa etapa do programa foi no valor utilizado como máximo no cálculo da normalização, que também considera o tempo total da corrida para a vazão específica de 9 L/min.

A estratégia de controle adotada neste trabalho foi a mesma já apresentada na Figura 2-16. A principal alteração nesta é a substituição da função de transferência do inversor da bomba pela função de transferência determinada por Silva (2018), que contemplou como sinal de entrada a potência fornecida ao motor da bomba, expressa em porcentagem da máxima potência de acionamento do motor, e como variável de saída a vazão de água de enxágue. Silva (2018) realizou experimentos considerando o emprego de alterações bruscas do tipo degrau e pulso no valor da vazão, mas apenas os resultados com alteração degrau foram utilizados neste trabalho. A estratégia de controle revisada está apresentada na Figura 3-4.



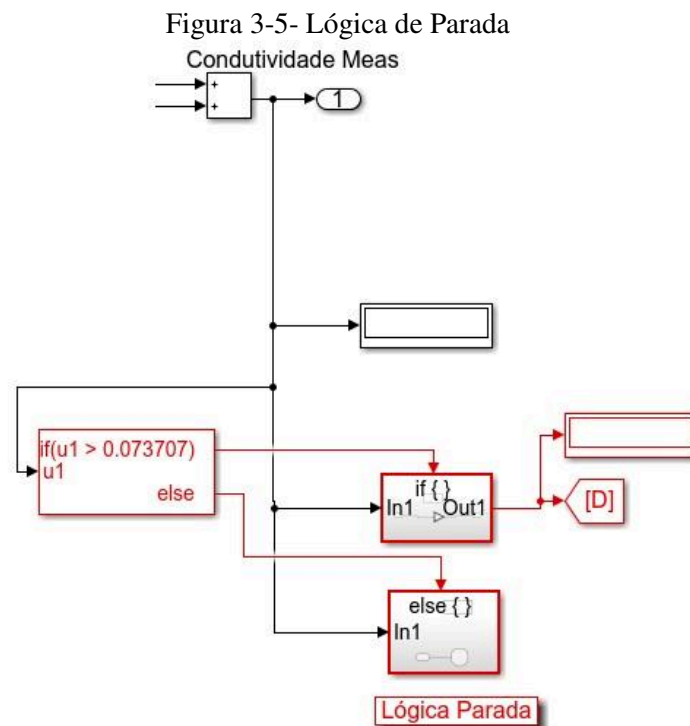
Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Devido às substituições das funções de transferência, os parâmetros do controlador também precisaram ser modificados. Para tanto optou-se por utilizar a ferramenta “tune” do Simulink/MATLAB™, que permite realizar a sintonia do controlador de forma automática.

A maior alteração no programa em relação ao utilizado por Carneiro (2017), além da troca da variável pH pela variável condutividade, foi a adição de um critério de parada

automático. Com o objetivo de realizar uma comparação entre os gastos de água com a utilização de diferentes vazões foi determinado um critério em comum para considerar que a etapa foi finalizada, sendo esse critério baseado em um valor pré-determinado de condutividade. Esse valor foi calculado a partir do valor médio e do valor do desvio padrão dos resultados experimentais de condutividade considerando o trecho final do gráfico que relaciona a condutividade com o tempo, para todas as vazões estudadas. A lógica de parada do programa é apresentada na Figura 3-5.

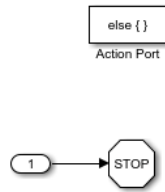
Na Figura 3-5 o sinal “1”, condutividade medida, é direcionado ao bloco de lógica. Este bloco possui a seguinte lógica: se o valor da condutividade for maior que o valor obtido experimentalmente igual a 0,07307, esse valor de condutividade será direcionado ao primeiro subsistema de ação, o *if*. Caso o valor da condutividade for menor ou igual àquele valor determinado, será direcionado ao segundo subsistema, *else*.



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

O primeiro subsistema direciona o valor da condutividade para o bloco de função de roteamento de sinal identificado como “D”, que como observado na Figura 3-2, é encaminhado para o cálculo do erro da condutividade e possibilita a continuação da simulação. Já quando o valor for menor ou igual ao critério de parada e for direcionado ao segundo subsistema, o programa é interrompido, pois esse subsistema contém um bloco de *stop*, como demonstrado na Figura 3-6.

Figura 3-6- Bloco stop



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

O programa completo para a vazão de 9L/min se encontra no Apêndice A, sendo que os programas para outras vazões são semelhantes ao apresentado, com adaptações quanto aos valores das constantes referentes ao valor de condutividade inicial e ao valor máximo de volume de água gasto, já que são calculadas com base em valores de vazões diferentes.

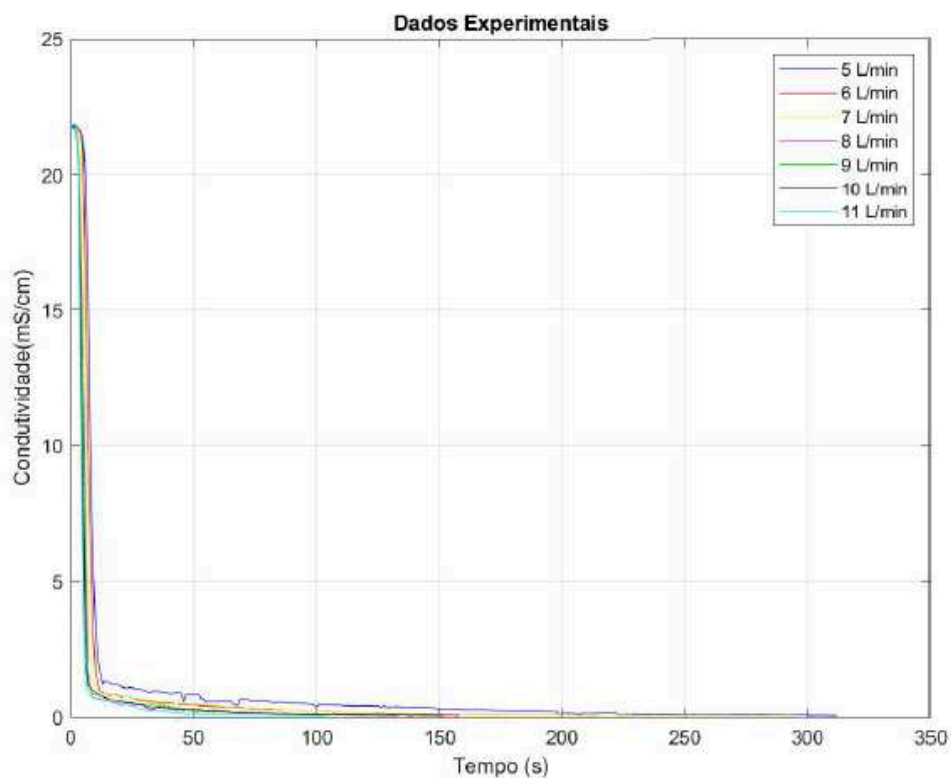
Com a execução do programa foi possível a análise da etapa de enxágue e o acompanhamento dessa, por meio do gráfico de condutividade que é gerado pelo programa, além da determinação do tempo, do volume de água gasto, e da economia de água gerada pela estratégia de controle para cada vazão estudada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados alcançados ao se utilizar as metodologias anteriormente descritas.

Como já citado anteriormente, os experimentos para obtenção dos modelos matemáticos identificados referentes ao comportamento temporal da condutividade foram realizados por Silva (2018), sendo que os resultados experimentais estão apresentados na Figura 4-1 para todas as vazões estudadas.

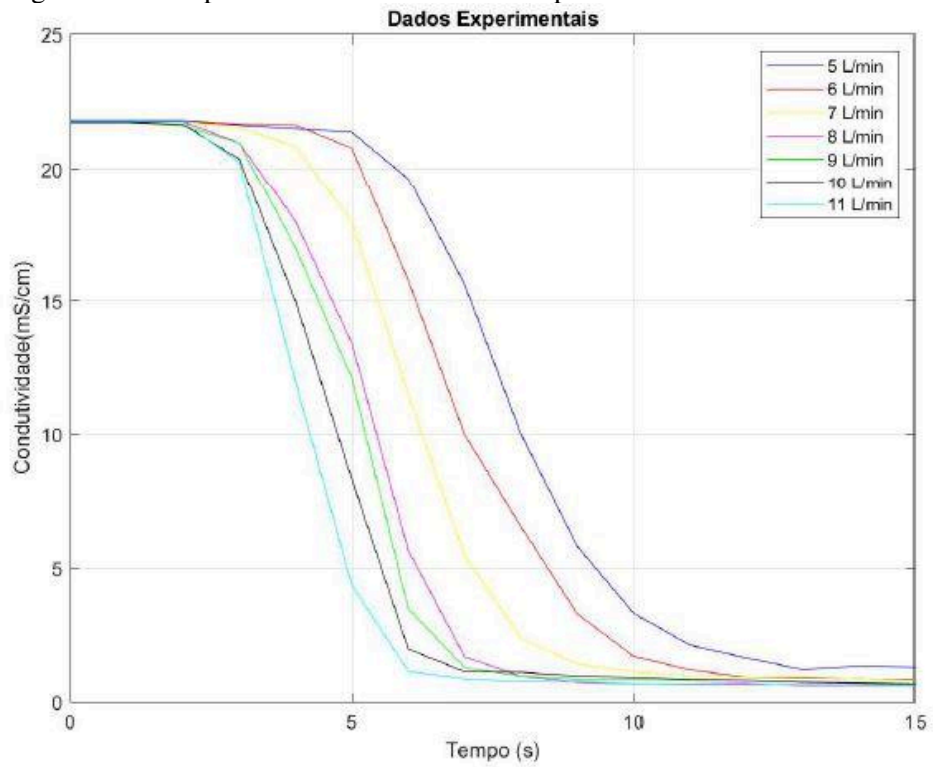
Figura 4-1- Comportamento da condutividade para diferentes vazões



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

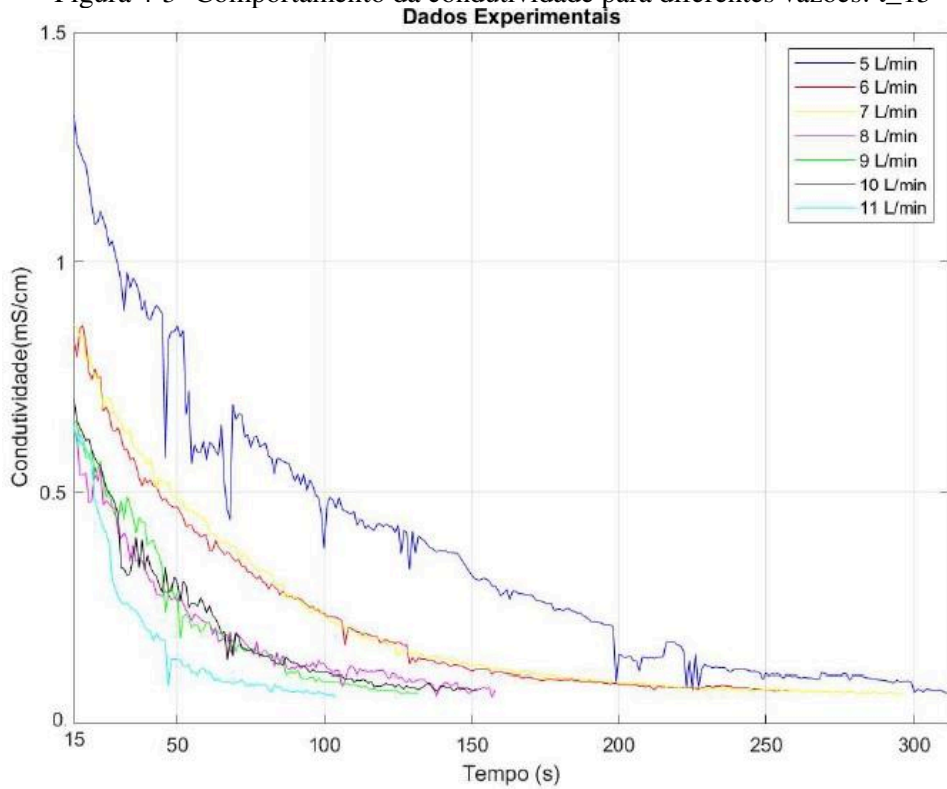
Para uma melhor visualização das curvas, optou-se por apresentá-las dividindo o gráfico em dois momentos: quando as curvas tem um decaimento mais rápido (Figura 4-2) e quando esse decaimento é mais lento (Figura 4-3).

Figura 4-2- Comportamento da condutividade para diferentes vazões: $0 \leq t \leq 15$



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Figura 4-3- Comportamento da condutividade para diferentes vazões: $t \geq 15$



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Com base na Figura 4-1, Figura 4-2 e Figura 4-3 pode-se perceber que ao se utilizar valores maiores de vazão na etapa de enxágue, o tempo necessário para que o estado estacionário final seja atingido é menor.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS DO PROCESSO

Os valores coletados experimentalmente foram utilizados para a identificação dos modelos que representam as curvas indicadas na Figura 4-1. Para tanto, optou-se inicialmente por aproximar a curva para uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto, realizando pequenos ajustes manuais em busca dos valores mais adequados dos parâmetros dos modelos.

Para a identificação dos modelos matemáticos que representam o comportamento temporal da condutividade elétrica da solução efluente, foram empregados os métodos de Miller, de Smith e de Sundaresan e Krishnaswamy (S&K), visando buscar a melhor adequação possível com uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto. O método da tangente foi descartado devido à grande imprecisão associada ao mesmo.

Para a vazão de 5 L/min, os valores encontrados para K_p (ganho do processo), τ_p (constante de tempo) e θ_p (tempo morto) estão indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 5 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_p \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-4,353	-4,353	-4,353
τ_p [s]	6,467	2,21	1,885
θ_p [s]	2	6,258	6,414

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

De forma a se realizar uma comparação entre os parâmetros encontrados para o modelo empírico identificado, a função “*stepinfo*”, disponível no aplicativo MATLAB™, foi utilizada de forma a fornecer informações que possibilitassem a comparação numérica entre os comportamentos dos modelos para os parâmetros ajustados com o emprego dos diferentes métodos. Para o caso da vazão de 5 L/min esses resultados estão apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2- Resultados da função "stepinfo" para a vazão de 5 L/min

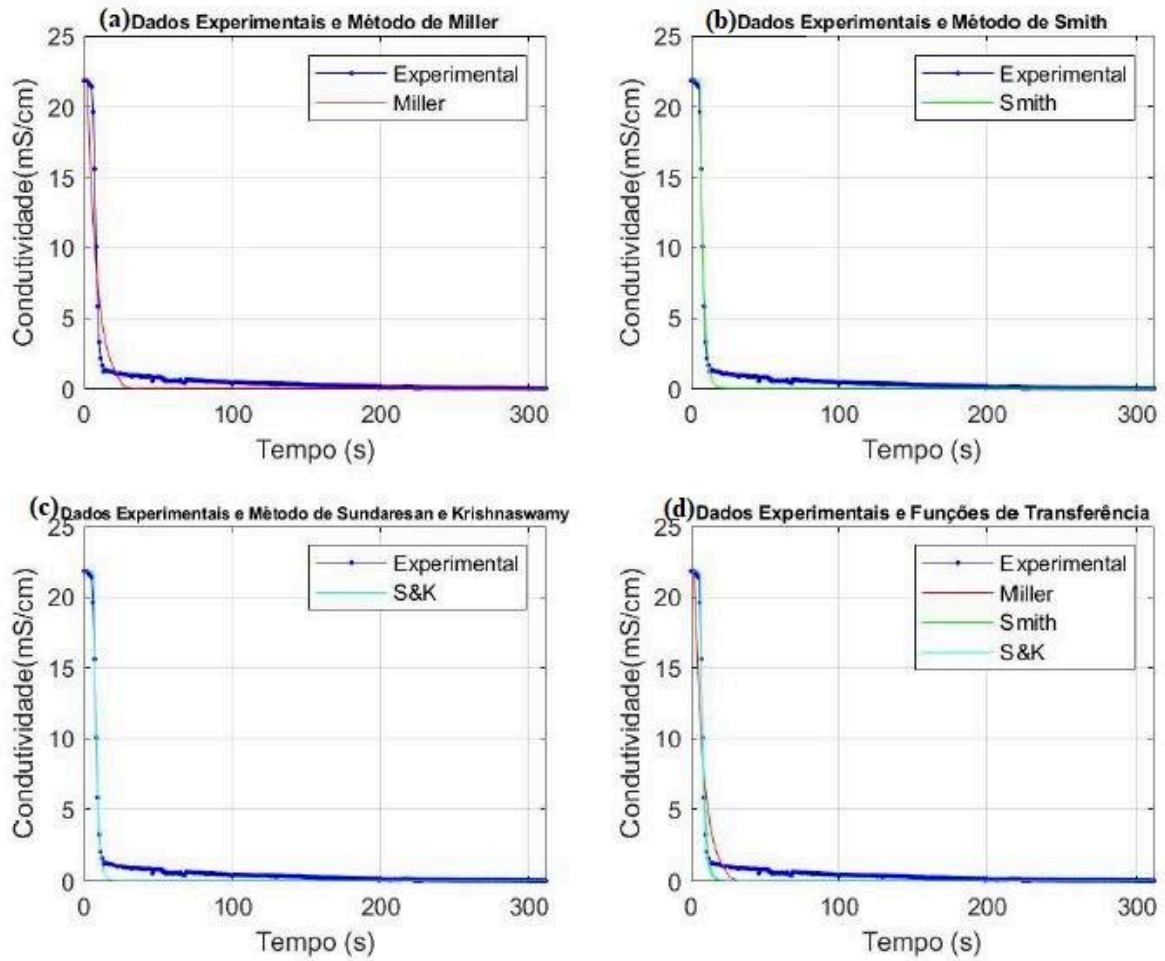
Caraterística	Experim.	Método		
		Miller	Smith	S&K
Rise Time [s]	4,918	10,998	5,423	5,498
Settling Time [s]	96,498	17,946	15,156	14,943
Settling Min [$mS \cdot cm^{-1}$]	0,069	-0,03	0,069	0,071
Settling Max [$mS \cdot cm^{-1}$]	2,143	1,43	0,525	0,804
Overshoot [%]	31497	31497	31497	30473
Undershoot [%]	0	43,1	0	0
Peak [$mS \cdot cm^{-1}$]	21,833	21,833	21,833	21,833
Peak Time [s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Na Tabela 4-2, *Rise Time* é o tempo necessário para o sinal de saída variar de 10% a 90%, *Settling Time* é o tempo para que a diferença entre y e y_{final} seja menor que 2% de y_{final} , *Settling Min* se refere ao mínimo valor de y uma vez que a resposta começa a assentar e *Settling Max* o maior valor de y quando a resposta começa a assentar. *Overshoot* é diferença entre o valor máximo de pico atingido e o valor final em percentual do valor final e *Undershoot* a diferença entre o valor mínimo e o final em percentual do valor final. Finalmente *Peak* é o valor máximo de y e *Peak Time* o tempo em que esse valor máximo acontece. Neste caso, a importância destes resultados é permitir a comparação numérica, possibilitando perceber a diferença entre os dados experimentais e os modelos obtidos.

Para permitir uma análise visual foram construídos gráficos de forma a se poder comparar os resultados obtidos com o emprego das funções de transferência identificadas com os resultados experimentais. Para a vazão de 5 L/min tem-se na Figura 4-4 os gráficos da resposta do sistema com base nas funções de transferência determinadas pelos métodos, sendo a Figura 4-4(a) com a utilização do método de Miller, na Figura 4-4(b) utilizando método de Smith e na Figura 4-4(c) utilizando o método de Sundaresan e Krishnaswamy. Adicionalmente, foi incluído na Figura 4-4(d) um gráfico com as respostas do sistema para as três funções de transferência identificadas de forma a possibilitar uma melhor comparação.

Figura 4-4-Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 5 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

É possível perceber que o comportamento da resposta simulada do processo para os valores dos parâmetros testados é coerente com a resposta experimental. Contudo, os modelos identificados apresentam significativo desvio no trecho inicial do decaimento.

De forma semelhante ao realizado para a vazão de 5L/min foram realizados os cálculos e análises para os outros valores de vazões usados nos experimentos. No caso da vazão de 6 L/min, tem-se os resultados apresentados na Tabela 4-3.

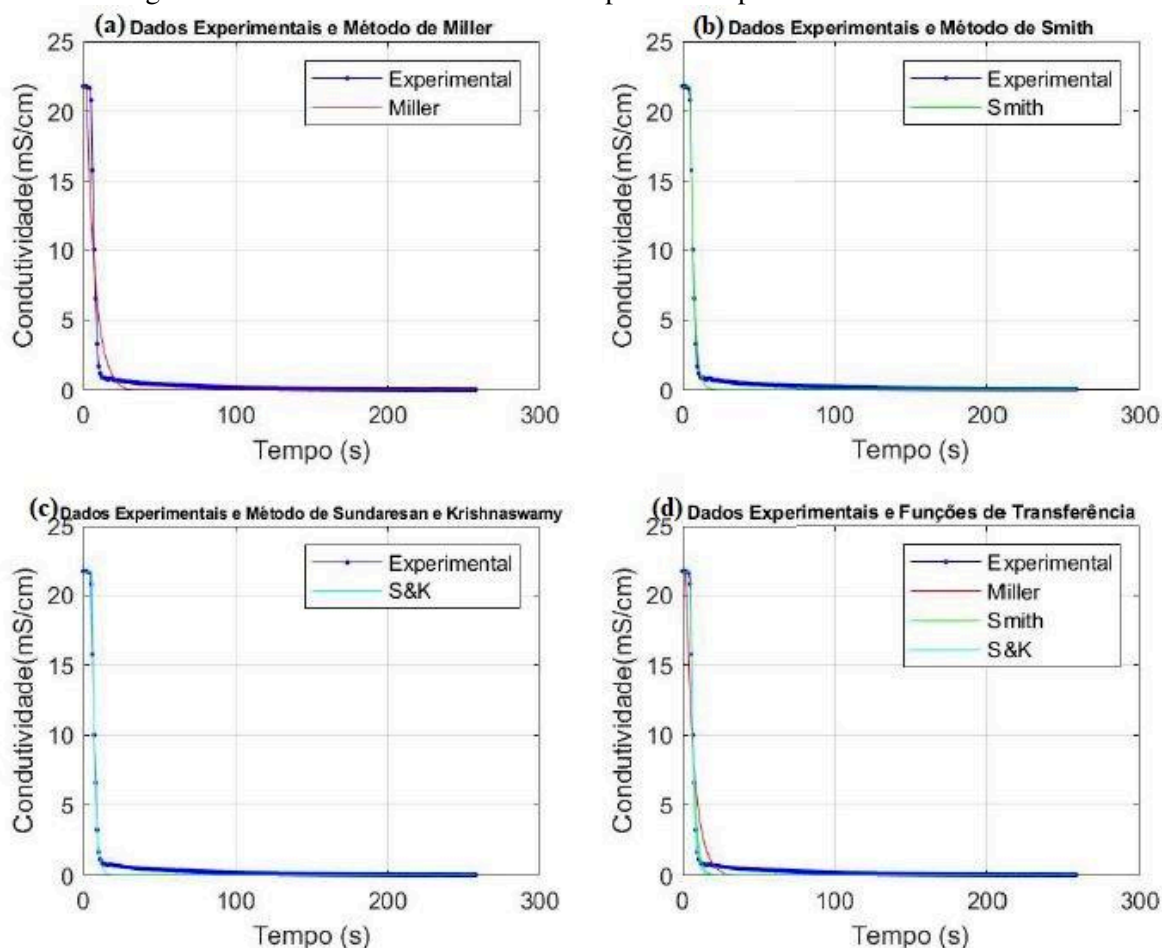
Tabela 4-3- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 6 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-3,618	-3,618	-3,618
τ_P [s]	5,568	2,31	1,851
θ_P [s]	2	5,258	5,457

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Na Figura 4-5 é apresentada a comparação dos resultados obtidos com o emprego dos modelos identificados com os resultados experimentais e na Tabela 4-4 os resultados obtidos com a aplicação da função “stepinfo” para a vazão de 6 L/min.

Figura 4-5-Conductividade Simulada e Experimental para a vazão de 6 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Tabela 4-4- Resultados da função “stepinfo” para a vazão de 6 L/min

Caraterística		Experim.	Método		
			Miller	Smith	S&K
Rise Time	[s]	4,435	9,655	6,307	4,846
Settling Time	[s]	43,437	16,525	14,866	13,049
Settling Min	$[mS \cdot cm^{-1}]$	0,071	0,072	0,072	0,072
Settling Max	$[mS \cdot cm^{-1}]$	1,725	1,94	1,646	0,568
Overshoot	[%]	29937	29937	29937	29937
Undershoot	[%]	0	0	0	0
Peak	$[mS \cdot cm^{-1}]$	21,78	21,78	21,78	21,78
Peak Time	[s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Para a vazão de 7 L/min os valores dos parâmetros do modelo identificado estão apresentados na Tabela 4-5 e os resultados obtidos com a função “*stepinfo*” na Tabela 4-6.

Tabela 4-5 - Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 7 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-3,105	-3,105	-3,105
τ_P [s]	4,573	1,812	1,434
θ_P [s]	2	4,761	4,95

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

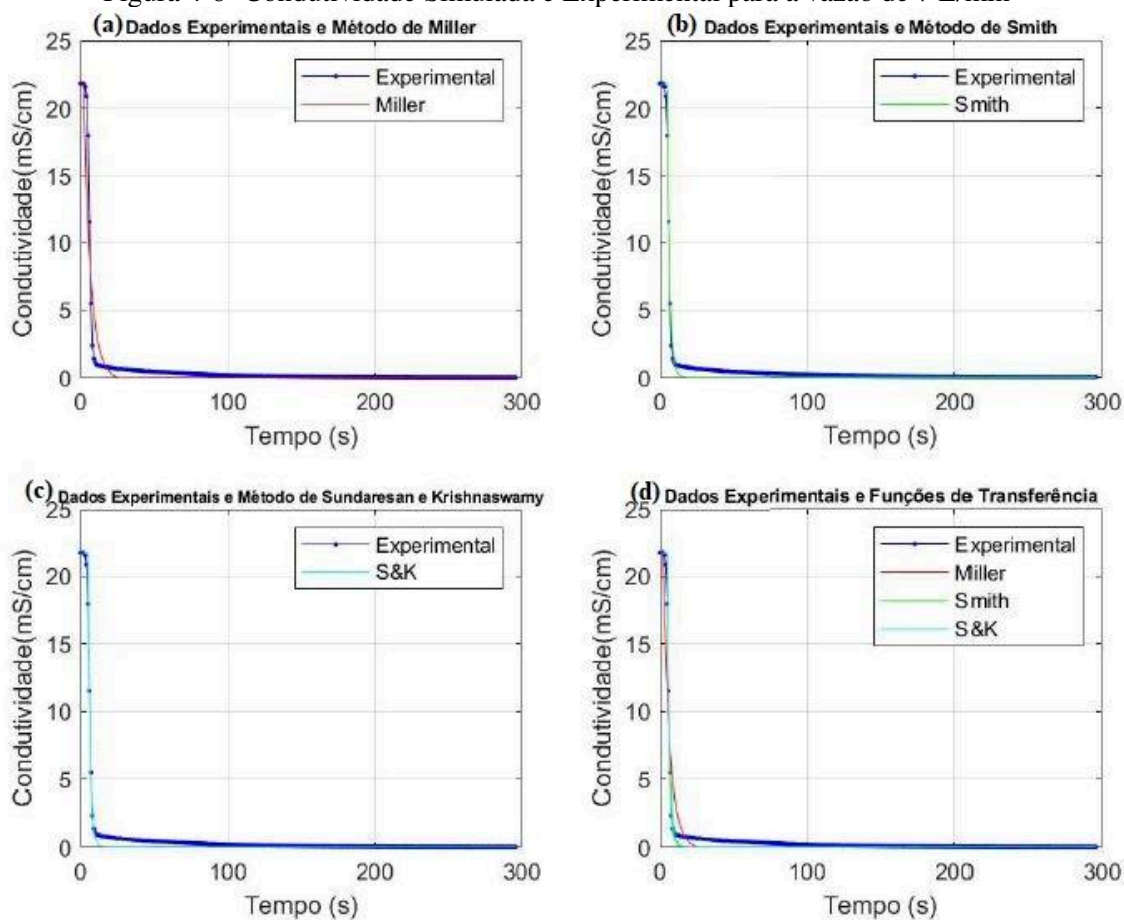
Tabela 4-6 - Resultados da função “*stepinfo*” para a vazão de 7 L/min

Caraterística	Experim.	Método		
		Miller	Smith	S&K
Rise Time [s]	3,741	8,474	4,078	4,341
Settling Time [s]	47,744	14,166	12,168	11,455
Settling Min [$mS \cdot cm^{-1}$]	0,064	-0,189	0,066	0,068
Settling Max [$mS \cdot cm^{-1}$]	1,435	0,385	0,524	0,902
Overshoot [%]	32620	32731	32700	28847
Undershoot [%]	0	284,228	0	0
Peak [$mS \cdot cm^{-1}$]	21,8	21,8	21,8	21,8
Peak Time [s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

A comparação dos resultados obtidos com o emprego dos modelos identificados com os resultados experimentais para a vazão de 7 L/min é apresentada na Figura 4-6(a)- Método de Miller, na Figura 4-6(b)- Método de Smith e na Figura 4-6(c)- Método de Sundaresan e Krishnaswamy. Na Figura 4-6(d) é apresentada a comparação entre eles.

Figura 4-6- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 7 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

No caso da vazão de 8L/min, os valores dos parâmetros do modelo identificado estão apresentados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 8 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-2,716	-2,716	-2,716
τ_P [s]	3,692	1,761	1,191
θ_P [s]	2	3,931	4,307

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

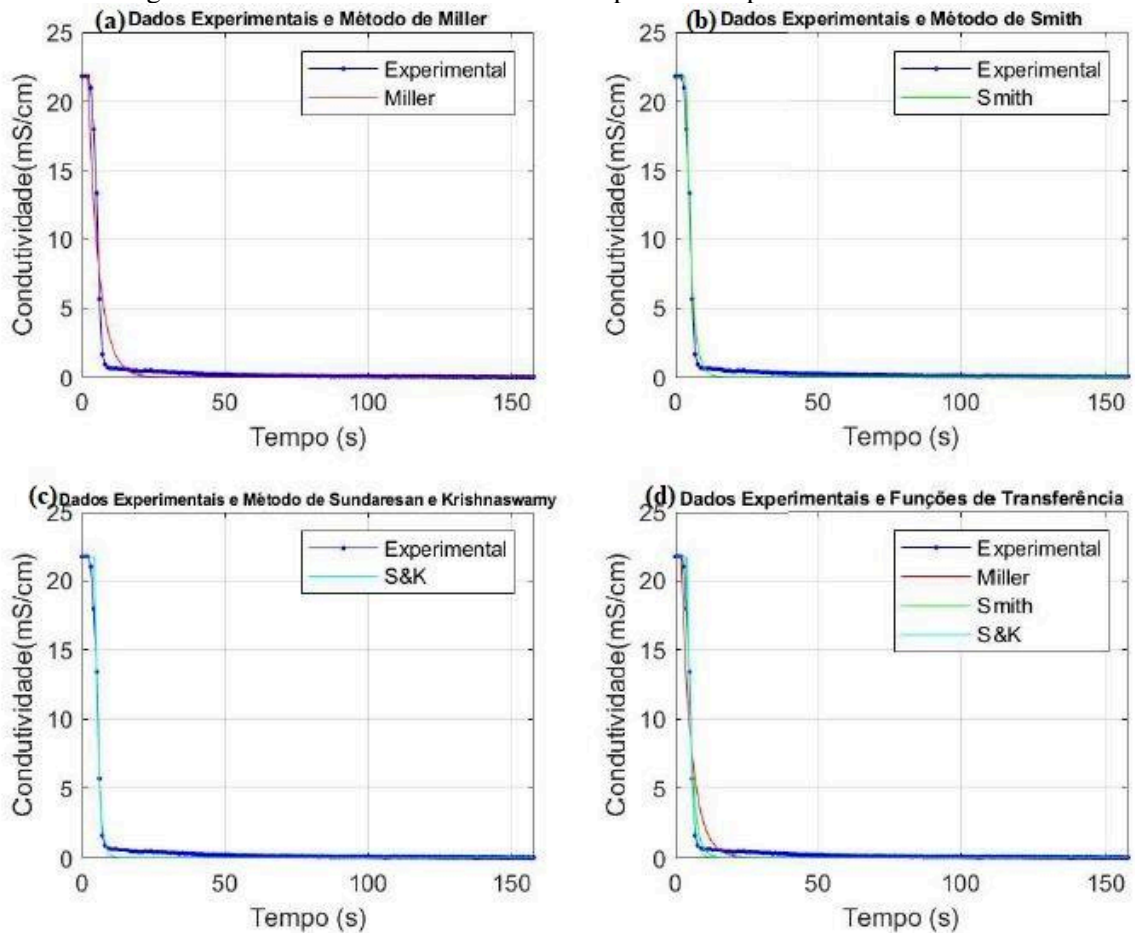
Os resultados obtidos com o emprego da função “stepinfo” estão apresentados na Tabela 4-8 e os gráficos correspondentes na Figura 4-7.

Tabela 4-8 - Resultados da função “stepinfo” para a vazão de 8 L/min

Caraterística		Experim.	Método		
			Miller	Smith	S&K
Rise Time	[s]	3,407	7,473	4,815	3,686
Settling Time	[s]	24,58	15,277	11,283	9,746
Settling Min	[mS · cm ⁻¹]	0,06	0,074	0,074	0,074
Settling Max	[mS · cm ⁻¹]	1,708	1,256	1,622	0,987
Overshoot	[%]	29267	29267	29267	29267
Undershoot	[%]	0	0	0	0
Peak	[mS · cm ⁻¹]	21,8	21,8	21,8	21,8
Peak Time	[s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

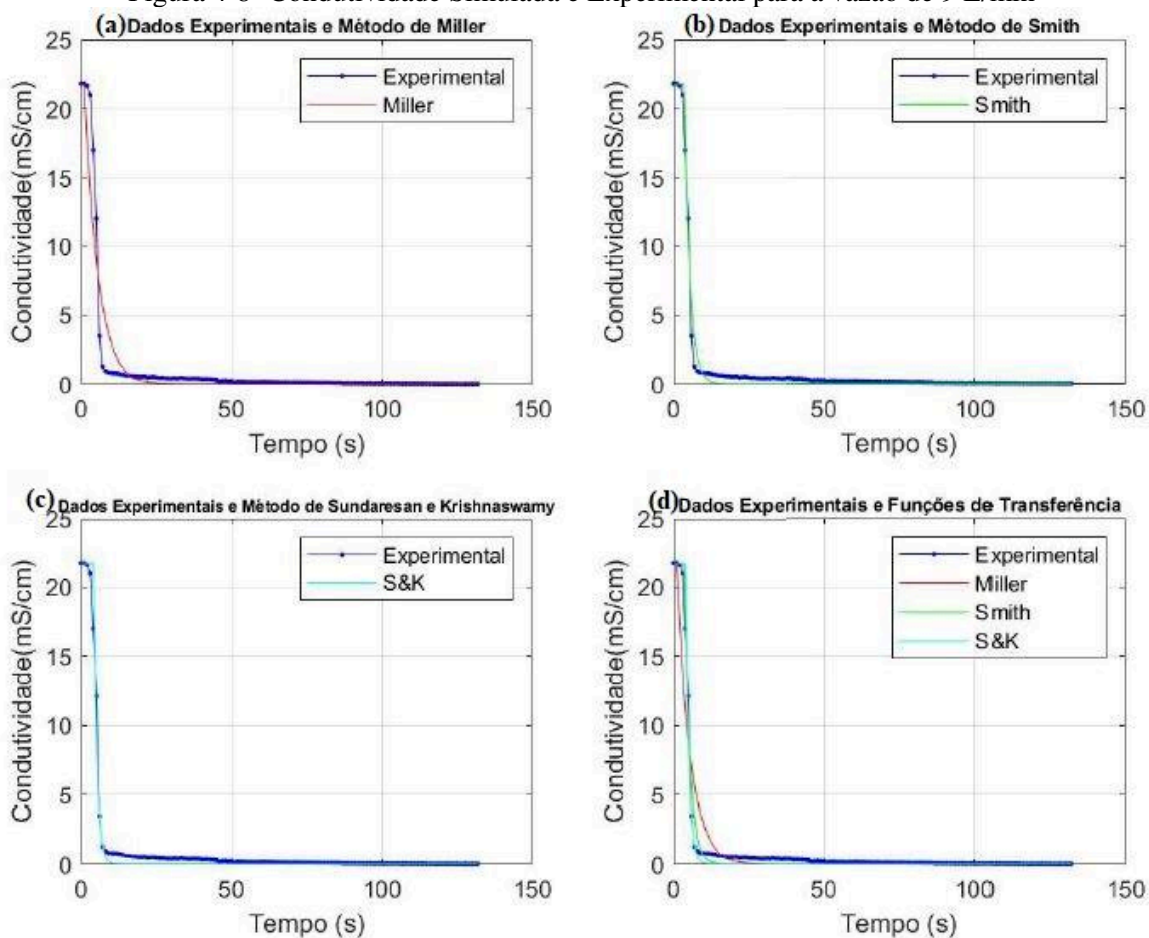
Figura 4-7- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 8 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Na Figura 4-8 é apresentada a comparação dos resultados obtidos com o emprego dos modelos identificados com os resultados experimentais e na Tabela 4-9 são apresentados os valores dos parâmetros dos modelos identificados para a vazão de 9 L/min.

Figura 4-8- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 9 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Tabela 4-9- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 9 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-2,415	-2,415	-2,415
τ_P [s]	4,471	1,785	1,03
θ_P [s]	1	3,686	4,121

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Já os resultados obtidos com o emprego da função “stepinfo” estão apresentados na Tabela 4-10.

Tabela 4-10 - Resultados da função “stepinfo” para a vazão de 9 L/min

Caraterística	Experim.	Método		
		Miller	Smith	S&K
Rise Time [s]	3,234	8,767	4,834	2,572
Settling Time [s]	27,1	17,21	11,12	8,775
Settling Min [$mS \cdot cm^{-1}$]	0,065	0,065	0,065	0,065
Settling Max [$mS \cdot cm^{-1}$]	1,308	2,114	1,57	1,243
Overshoot [%]	33233	33234	33234	33234
Undershoot [%]	0	0	0	0
Peak [$mS \cdot cm^{-1}$]	21,8	21,8	21,8	21,8
Peak Time [s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

No caso da vazão de 10 L/min, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-11 e na Tabela 4-12, enquanto os gráficos correspondentes na Figura 4-9.

Tabela 4-11 - Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 10 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-2,169	-2,169	-2,169
τ_P [s]	4,046	1,737	1,125
θ_P [s]	1	3,309	3,627

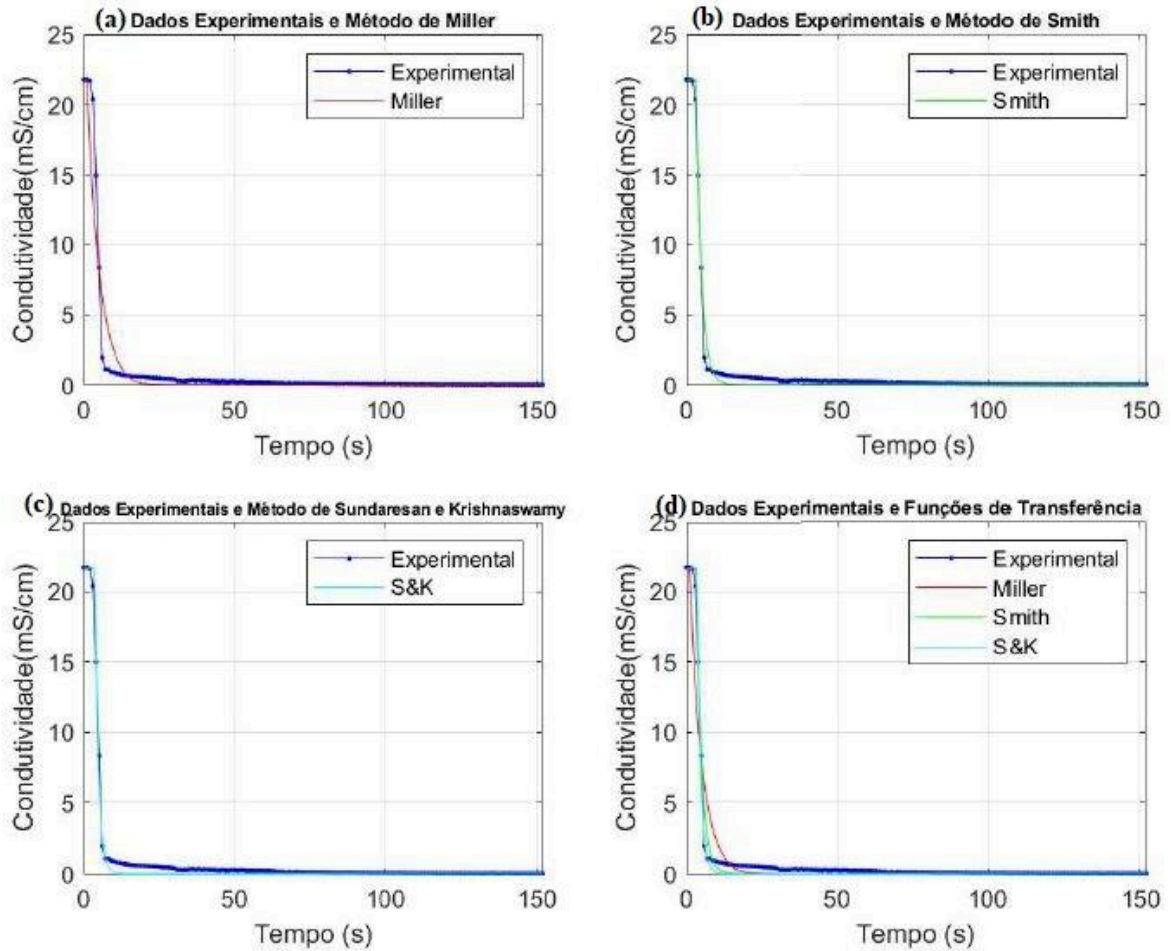
Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Tabela 4-12 - Resultados da função “stepinfo” para a vazão de 10 L/min

Caraterística	Experim.	Método		
		Miller	Smith	S&K
Rise Time [s]	2,815	6,467	4,6	3,26
Settling Time [s]	26,062	13,406	10,668	8,698
Settling Min [$mS \cdot cm^{-1}$]	0,072	0,077	0,077	0,077
Settling Max [$mS \cdot cm^{-1}$]	2	1,949	1,47	0,826
Overshoot [%]	29137	28290	28290	28290
Undershoot [%]	0	0	0	0
Peak [$mS \cdot cm^{-1}$]	21,767	21,767	21,767	21,767
Peak Time [s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Figura 4-9- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 10 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

E, finalmente, para a vazão de 11 L/min os valores dos parâmetros dos modelos identificados estão apresentados na Tabela 4-13, enquanto os resultados para comparação com o emprego da função “*stepinfo*” são apresentados na Tabela 4-14.

Tabela 4-13- Parâmetros do modelo identificado para a vazão de 11 L/min

Parâmetros	Método		
	Miller	Smith	S&K
$K_P \left[\frac{mS \cdot cm^{-1}}{L \cdot min^{-1}} \right]$	-1,976	-1,976	-1,976
τ_P [s]	2,518	1,436	1,087
θ_P [s]	2	3,082	3,255

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

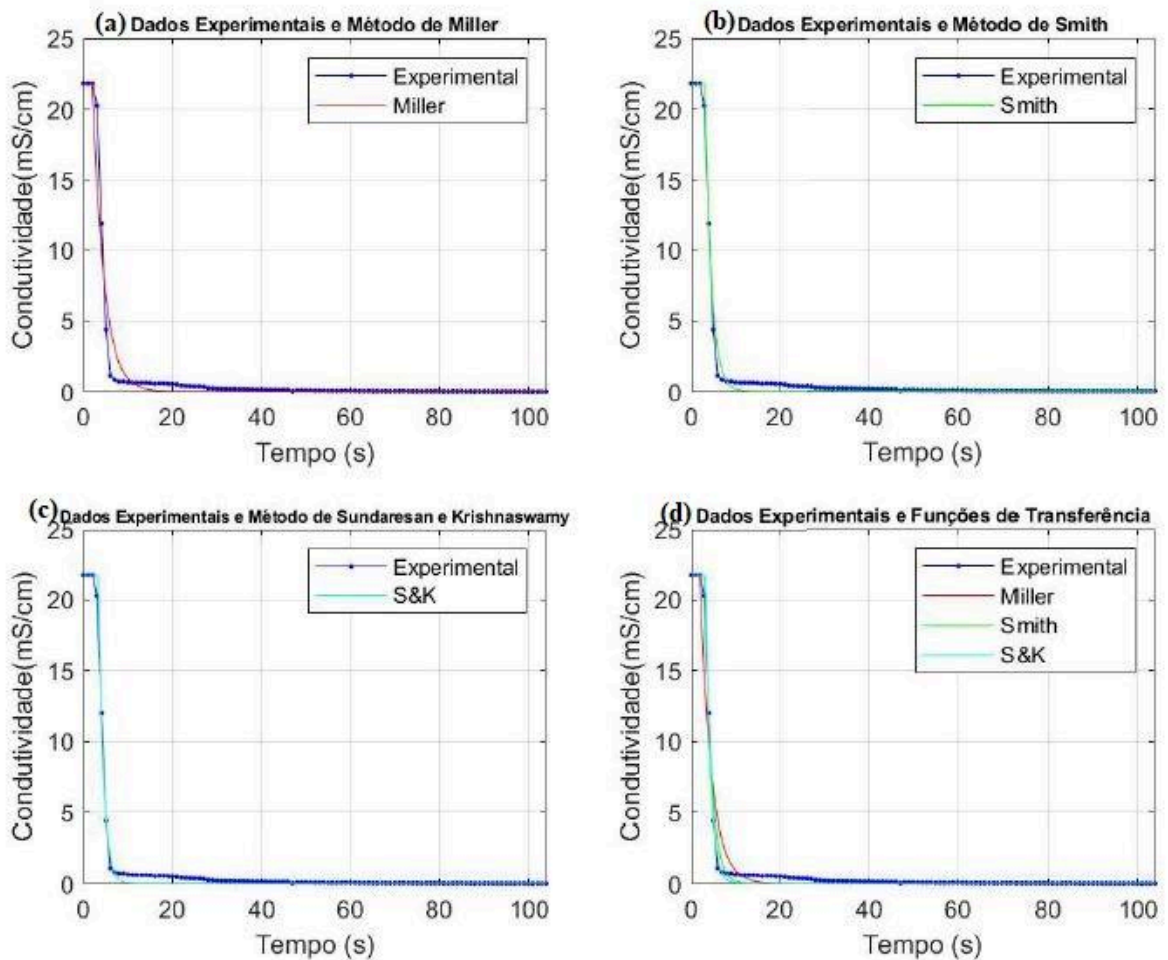
Tabela 4-14- Resultados da função “stepinfo” para a vazão de 11 L/min

Caraterística		Experim.	Método		
			Miller	Smith	S&K
Rise Time	[s]	2,593	5,611	3,602	2,974
Settling Time	[s]	21,86	11,831	8,987	7,911
Settling Min	$[mS \cdot cm^{-1}]$	0,059	0,059	0,059	0,059
Settling Max	$[mS \cdot cm^{-1}]$	1,17	1,023	1,637	0,653
Overshoot	[%]	36943	36942	36942	36942
Undershoot	[%]	0	0	0	0
Peak	$[mS \cdot cm^{-1}]$	21,8	21,8	21,8	21,8
Peak Time	[s]	0	0	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Os gráficos da comparação entre o comportamento simulado e o comportamento experimental são apresentados na Figura 4-10(a) para o Método de Miller, Figura 4-10(b) para o de Smith, Figura 4-10(c) para o de *Sundaresan e Krishnaswamy* e Figura 4-10(d).

Figura 4-10- Condutividade Simulada e Experimental para a vazão de 11L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Para todas as vazões consideradas, é possível perceber que o modelo identificado com base em função de transferência de primeira ordem com tempo morto apresenta uma boa aderência ao comportamento experimental, em que pese o fato de haver maior desvio no trecho inicial do decaimento mais acentuado. Este fato sugere que o mecanismo de remoção dos resíduos possa ser representado de maneira mais adequada por mais do que um modelo matemático. Além disso, o modelo de primeira ordem com tempo morto alcança o valor de parada mais rápido que a curva experimental, o que caso utilizado acarretaria em uma parada prematura da etapa de enxágue.

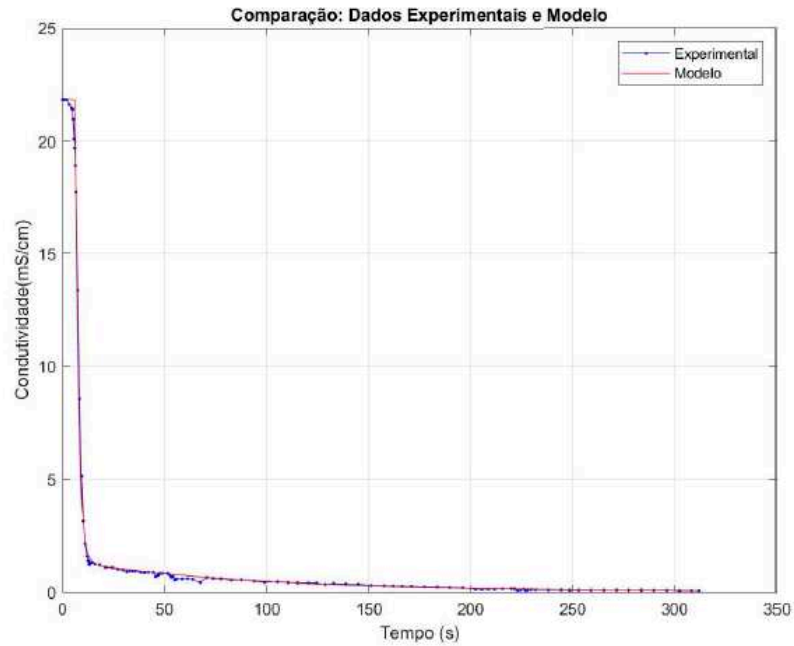
Observando a resposta dinâmica da condutividade para as diferentes vazões é factível considerar que a curva de resposta apresenta duas dinâmicas: uma mais rápida no início do processo e outra mais lenta no final desse. Assim, com essa consideração e com base nos resultados obtidos anteriormente por meio da determinação das funções de transferência de primeira ordem com tempo morto, optou-se por realizar um ajuste manual dos modelos obtidos a fim de se atingir uma melhor adequação com os dados experimentais.

Para a vazão de 5L/min, o modelo que representa o comportamento temporal da condutividade determinado por meio de ajustes manuais está apresentado na Equação (20).

$$G_p = \frac{(-4,12)}{1,7s \cdot +1} \cdot e^{-6 \cdot s} + \frac{(-0,24)}{90 \cdot s + 1} \cdot e^{-14,1 \cdot s} \quad (20)$$

A comparação entre o comportamento do modelo representado pela Equação (20) e os valores experimentais para a vazão de 5 L/min está apresentada na Figura 4-11.

Figura 4-11- Condutividade Simulada (Eq 20) e Experimental para a vazão de 5 L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Utilizando-se a função “*stepinfo*” para realizar uma comparação numérica, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 4-15.

Tabela 4-15- Resultados da função “*stepinfo*”- (Eq. 20) para a vazão de 5 L/min

Caraterística		Experim.	Modelo
Rise Time	[s]	4,918	4,961
Settling Time	[s]	96,498	96,831
Settling Min	[mS · cm ⁻¹]	0,069	0,077
Settling Max	[mS · cm ⁻¹]	2,143	1,791
Overshoot	[%]	31497	28313
Undershoot	[%]	0	0
Peak	[mS · cm ⁻¹]	21,833	21,833
Peak Time	[s]	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Percebe-se que os resultados da função “*stepinfo*” são mais próximos dos resultados experimentais quando utilizado o modelo ajustado. Assim, tanto pela análise preliminar, quanto pelos resultados fornecidos pela função “*stepinfo*” pode-se concluir que a aproximação do modelo com os resultados experimentais é melhor com o modelo identificado com base na Equação (20).

Essa conclusão pode ser validada pelo cálculo dos erros entre o modelo identificado e representado pela Equação (20) e os resultados experimentais. Neste caso o erro acumulado tem um valor em módulo de 8,773 e o erro quadrático acumulado de 5,795, enquanto o modelo obtido pelo método de Miller apresentou um erro acumulado de 170,6 e um erro quadrático de 149,9. Já o modelo obtido pelo método de Smith tem erros com valores de 192,1 e 144,2 e o gerado pelo método de *Sundaresan e Krishnaswamy* erros de 193,3 e 144,7.

As equações dos modelos identificados e ajustados com base na consideração de duas dinâmicas para o processo considerado, para cada vazão analisada, estão apresentadas na Tabela 4-16.

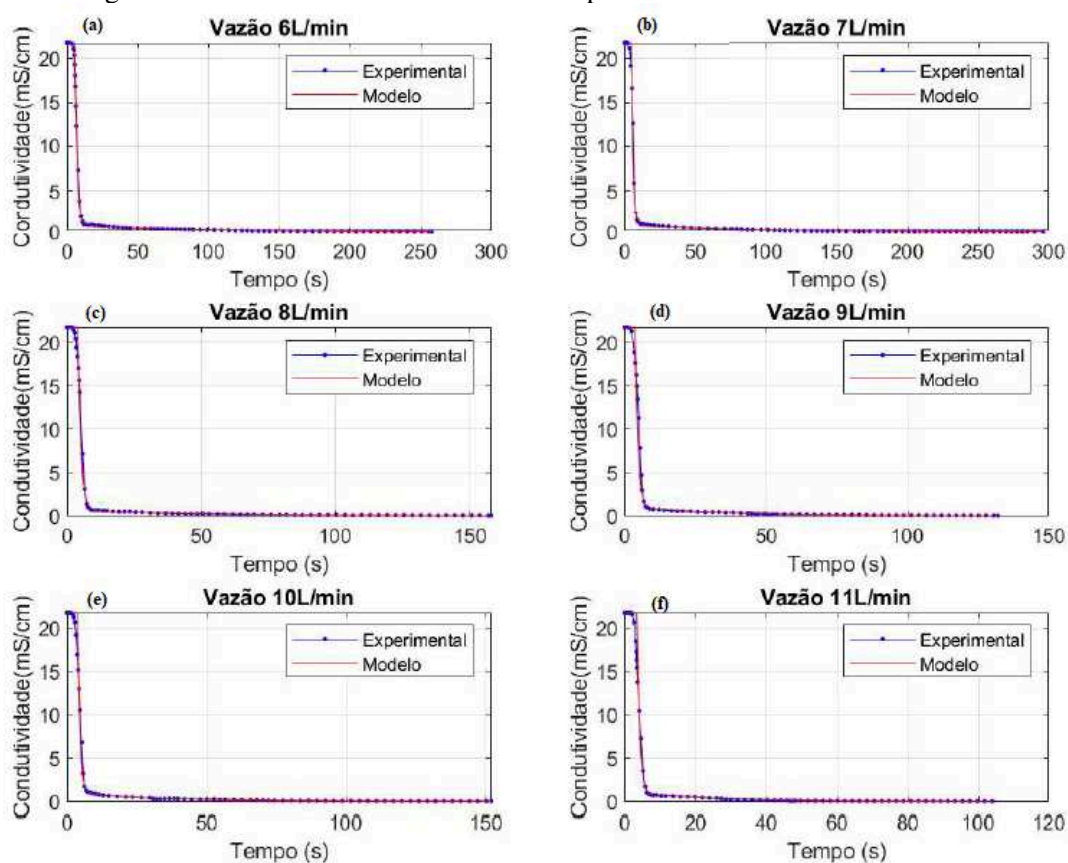
Tabela 4-16- Modelos identificados e ajustados considerando duas dinâmicas para o processo

Vazão [L/min]	Modelo	Equação
5	$G_p = \frac{(-4,12)}{1,7s + 1} e^{-6s} + \frac{(-0,24)}{90s + 1} e^{-14,1s}$	(21)
6	$G_p = \frac{(-3,5)}{1,5s + 1} e^{-5,45s} + \frac{(-0,13)}{80s + 1} e^{-13s}$	(22)
7	$G_p = \frac{(-3)}{1,3s + 1} e^{-4,65s} + \frac{(-0,11)}{70s + 1} e^{-10s}$	(23)
8	$G_p = \frac{(-2,6)}{1,1s + 1} e^{-4s} + \frac{(-0,075)}{58s + 1} e^{-10s}$	(24)
9	$G_p = \frac{(-2,33)}{0,9s + 1} e^{-3,9s} + \frac{(-0,09)}{35s + 1} e^{-12s}$	(25)
10	$G_p = \frac{(-2,08)}{0,8s + 1} e^{-3,8s} + \frac{(-0,088)}{24,5s + 1} e^{-8s}$	(26)
11	$G_p = \frac{(-1,91)}{0,74s + 1} e^{-3,5s} + \frac{(-0,07)}{24,4s + 1} e^{-11s}$	(27)

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

As comparações entre os comportamentos simulado e experimental para os demais valores de vazão com o emprego dos modelos identificados e ajustados considerando duas dinâmicas para o processo são apresentadas na Figura 4-12.

Figura 4-12- Condutividade Simulada e Experimental usando os modelos revisados



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Os valores dos erros em módulo são apresentados na Tabela 4-17, enquanto os valores determinados pela função “*stepinfo*” estão indicados na Tabela 4-18 para vazões entre 6 L/min e 9 L/min e na Tabela 4-19 para as vazões de 10 L/min e 11 L/min.

Tabela 4-17 - Erro acumulado simples (1) e quadrático acumulado (2): Demais vazões

Erros								
Vazão	Modelo Ajustado		Método de Miller		Método de Smith		Método de S&K	
	1	2	1	2	1	2	1	2
6L/min	3,779	10,42	88,72	99,08	113,2	76,33	116,8	77,35
7L/min	9,510	4,970	113,3	101,8	131,9	88,64	113,0	80,78
8L/min	0,272	5,778	47,33	75,32	66,05	46,01	71,04	45,14
9L/min	3,106	2,841	38,68	82,07	62,27	48,08	68,41	47,61
10L/min	1,115	2,342	43,00	62,77	60,83	43,85	65,69	43,81
11L/min	2,469	6,570	36,80	42,18	46,00	32,78	49,15	32,50

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Tabela 4-18- Resultados da função “stepinfo” usando os modelos revisados

Vazão	Característica	Experim.	Modelo
6 L/min	RiseTime	4,435	3,987
	SettlingTime	43,437	53,333
	SettlingMin	0,071	0,036
	SettlingMax	1,725	1,861
	Overshoot	29937	59592
	Undershoot	0	0
	Peak	21,78	21,78
	PeakTime	0	0
7 L/min	RiseTime	3,741	3,549
	SettlingTime	47,744	47,217
	SettlingMin	0,064	0,044
	SettlingMax	1,435	1,557
	Overshoot	32620	45586
	Undershoot	0	0
	Peak	21,8	21,8
	PeakTime	0	0
8 L/min	RiseTime	3,407	2,812
	SettlingTime	24,58	22,728
	SettlingMin	0,06	0,047
	SettlingMax	1,708	1,578
	Overshoot	29267	46503
	Undershoot	0	0
	Peak	21,8	21,8
	PeakTime	0	0
9 L/min	RiseTime	3,234	2,514
	SettlingTime	27,1	31,725
	SettlingMin	0,065	0,046
	SettlingMax	1,308	1,767
	Overshoot	33233	47011
	Undershoot	0	0
	Peak	21,8	21,8
	PeakTime	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Tabela 4-19- Resultados da função "stepinfo" usando os modelos revisados

Vazão	Característica	Experim.	Modelo
10 L/min	RiseTime	2,815	2,246
	SettlingTime	26,062	25,257
	SettlingMin	0,072	0,09
	SettlingMax	2	1,904
	Overshoot	29137	24211
	Undershoot	0	0
	Peak	21,767	21,767
	PeakTime	0	0
11 L/min	RiseTime	2,593	1,979
	SettlingTime	21,86	24,003
	SettlingMin	0,059	0,037
	SettlingMax	1,17	1,763
	Overshoot	36943	58755
	Undershoot	0	0
	Peak	21,8	21,8
	PeakTime	0	0

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Portanto, assim como para a vazão de 5L/min, é possível concluir por meio das análises realizadas que os modelos considerando duas dinâmicas distintas para o processo apresentam uma melhor adequação aos dados experimentais em comparação à utilização de apenas uma função de primeira ordem com tempo morto dentro da faixa de estudo.

Esse comportamento com duas dinâmicas pode ser explicado, pois inicialmente a remoção ocorre predominantemente pelo fenômeno de convecção, mas após certo tempo o fenômeno que domina o processo é a difusão da camada residual ainda aderida à parede, fenômeno esse que tende a ser mais lento.

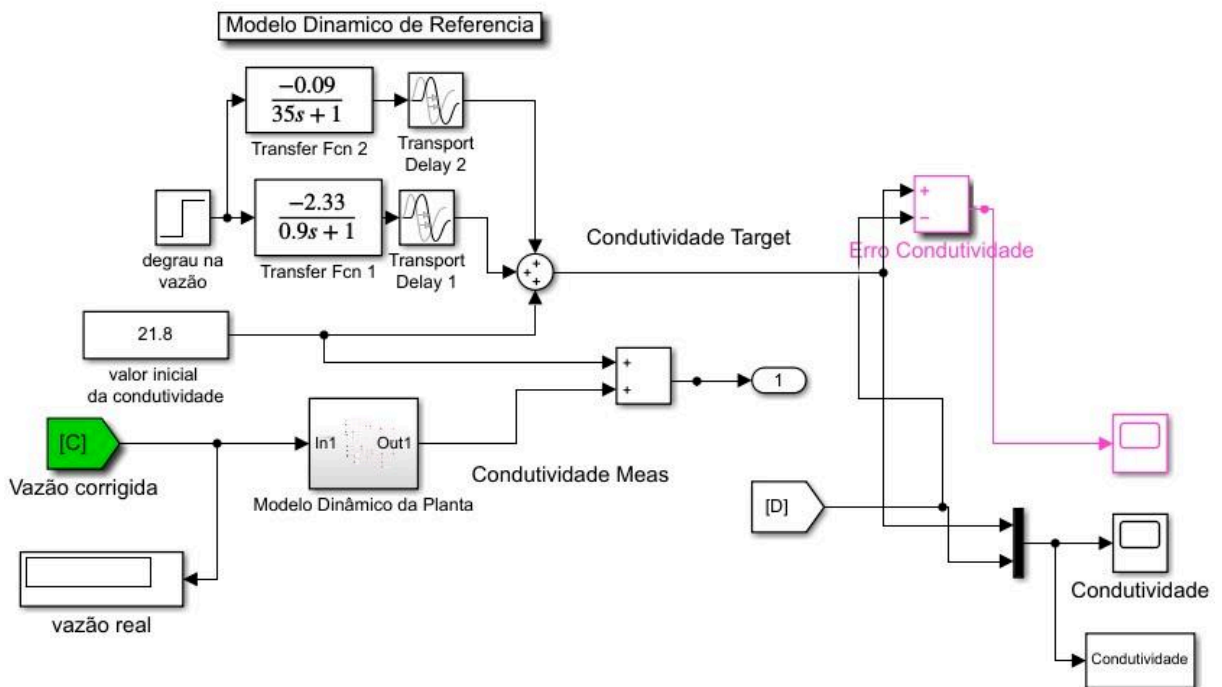
Dado que a condutividade inicial e final dos dados utilizados para a determinação dos modelos não foi a mesma para as diferentes vazões e assim sua variação também difere, não é possível tirar conclusões relevantes quanto aos valores de ganho dos modelos obtidos. Isso porque para o cálculo do ganho, utiliza-se esse valor de variação da saída, nesse caso condutividade.

Entretanto, é possível perceber que as constantes de tempo dos modelos diminuem com o aumento da vazão. Esse comportamento é o esperado, já que como observado, de

forma geral, maiores valores de vazão diminuem o tempo necessário para a finalização da etapa de enxágue.

Com os modelos determinados é possível realizar as adaptações necessárias na estratégia de controle estudada e simular o processo em malha fechada. Ao se substituir os modelos utilizados por Carneiro (2017) pelos modelos determinados neste trabalho tem-se o diagrama de simulação conforme demonstrado na Figura 2-14, sendo que esse diagrama está demonstrando a estratégia modificada de forma geral, mas com a determinação dos modelos dinâmicos de condutividade torna-se possível a inserção desses no diagrama para cada vazão. Por exemplo, para a vazão 9L/min o diagrama com o respectivo modelo do processo está ilustrado na Figura 4-13.

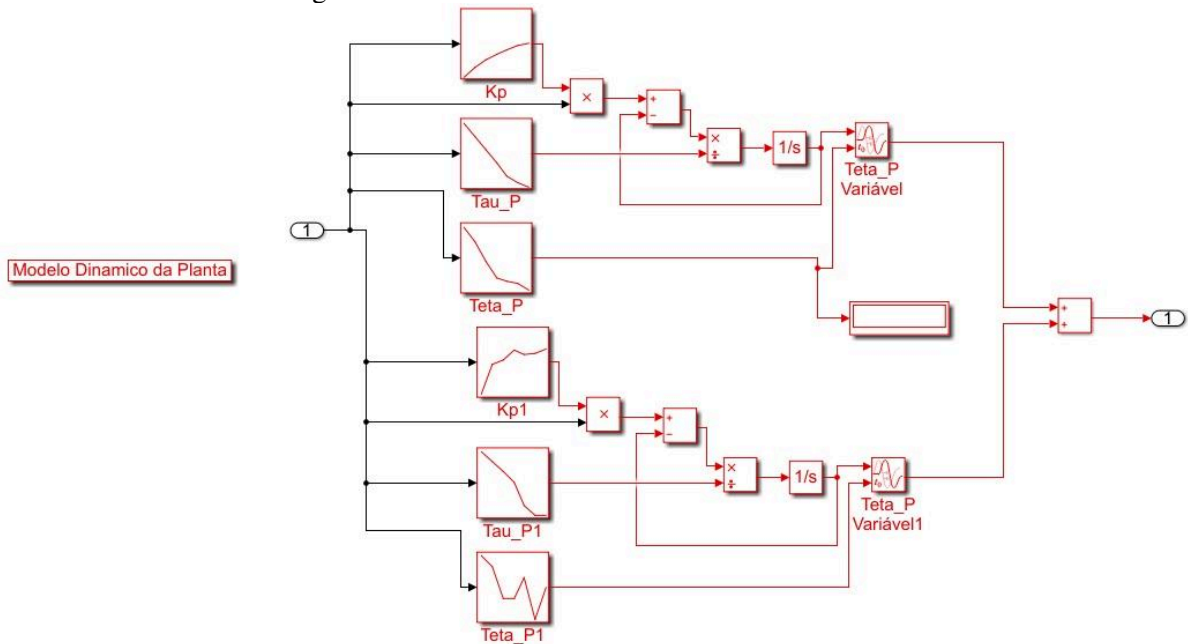
Figura 4-13- Diagrama de simulação: Vazão 9L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Optou-se por apresentar o bloco “Modelo Dinâmico da Planta” como um bloco único para facilitar o entendimento do diagrama, além do fato que as novas funções de transferência são mais complexas acarretando maior poluição visual por ocasião da análise do modelo. Assim o bloco intitulado “Modelo Dinâmico da Planta” está apresentado na Figura 4-14.

Figura 4-14- Bloco “Modelo Dinâmico da Planta”



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Com as alterações realizadas é possível proceder para simulação do processo em malha fechada.

4.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO EM MALHA FECHADA

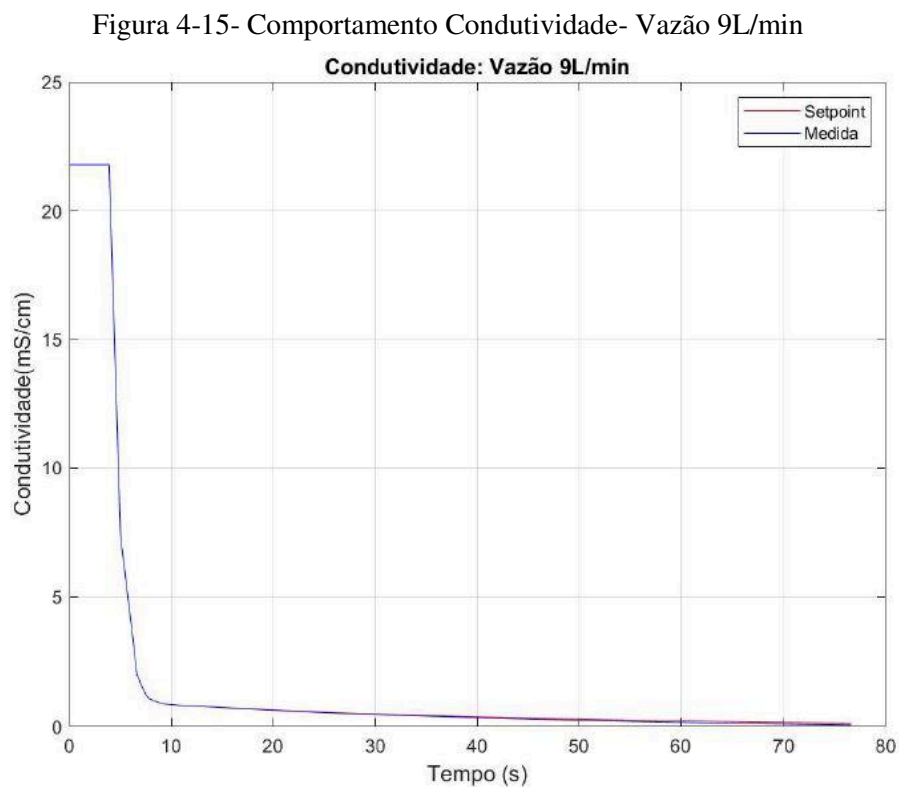
Optou-se por realizar a simulação do processo em malha fechada apenas para vazões de 6L/min a 10L/min. Isso ocorreu para que os modelos das vazões de extremo (5L/min e 11L/min) permitissem que o controlador aumentasse ou diminuísse a vazão conforme o necessário, durante todas as simulações, e ainda existissem dados experimentais para dar suporte a essa variação.

O critério de parada para as simulações foi calculado considerando a média dos valores finais de condutividade obtida com base em todos os experimentos realizados e tem como valor 0,073707 mS/cm.

A sintonia do controlador foi realizada por meio da função “tune” do Simulink/MATLAB™ e os valores utilizados foram: $P=K_c= 1,725$; $I= 0.036$ (como $I=1/\tau_i$, $\tau_i= 27,778$) e $D= \tau_D=0$.

Como citado no Capítulo 3 deste trabalho a metodologia foi explicada com base na vazão de 9L/min, assim os resultados para a vazão de 9L/min serão explicitados, contudo os resultados para todas as vazões serão apresentados e analisados.

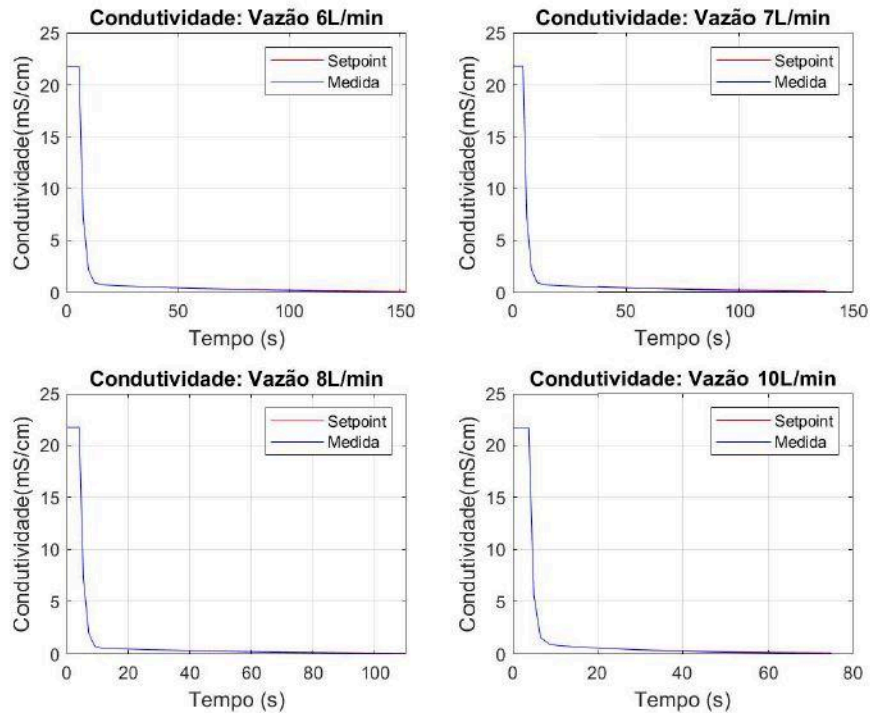
Executando a simulação do experimento para a vazão de 9L/min a partir do diagrama de simulação desenvolvido e apresentado no Apêndice A, foi obtido o comportamento temporal da condutividade com base na malha de controle proposta como apresentado na Figura 4-15.



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

O comportamento da condutividade para as demais vazões está exposto na Figura 4-16.

Figura 4-16- Comportamento Condutividade- Demais Vazões

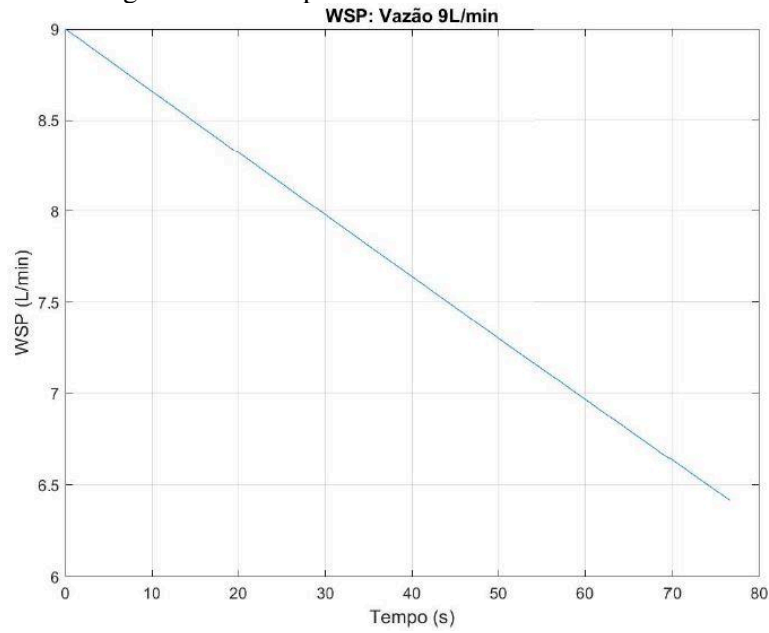


Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Por meio dos gráficos apresentados Figura 4-15 e Figura 4-16 é possível perceber que o controlador de vazão com *setpoint* variável consegue manter a condutividade da solução efluente, na etapa de enxágue, próxima ou no valor definido pelo modelo de referência, até que a etapa de enxágue seja encerrada quando o valor da condutividade alcança o valor definido como condutividade de parada.

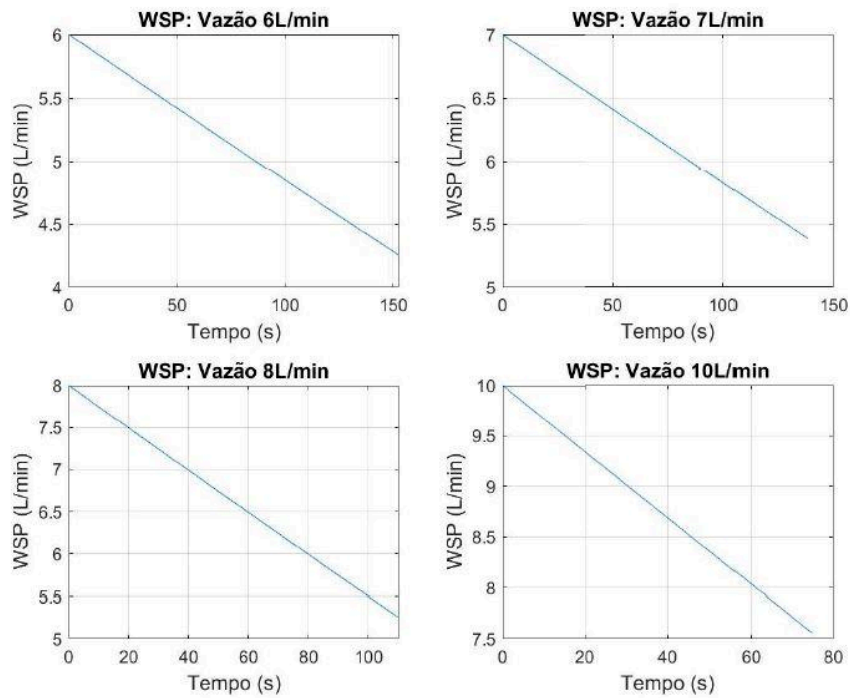
Na Figura 4-17 está apresentado o gráfico do WSP para vazão de 9L/min, enquanto para as demais vazões esses gráficos são apresentados na Figura 4-18. Nota-se que no início da operação o WSP possui o mesmo valor de LSP e diminui com o tempo, com um comportamento linear.

Figura 4-17-Comportamento WSP- Vazão 9L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Figura 4-18- Comportamento WSP para os demais valores de vazão

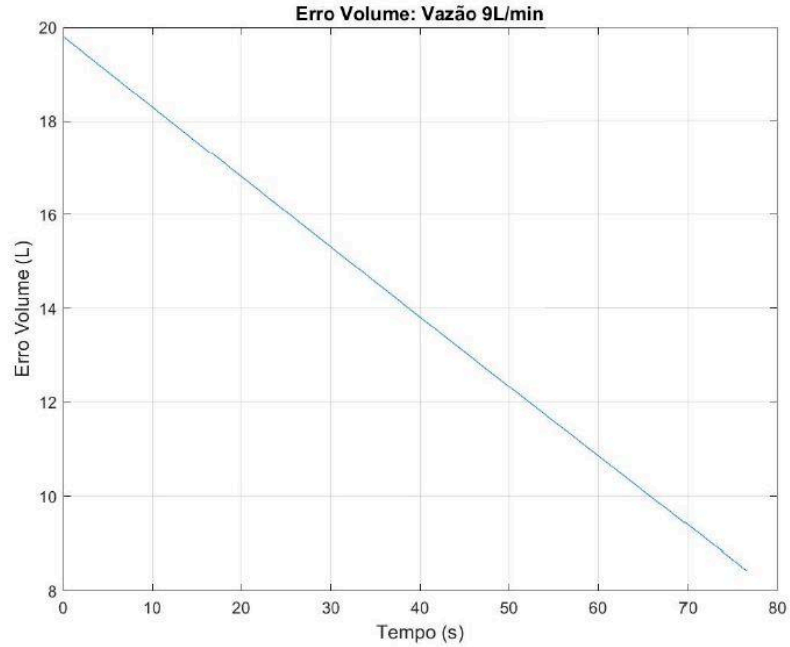


Fonte: Acervo Pessoal (2021)

O comportamento do WSP é explicado, pois o erro que predomina no cálculo do seu valor é o erro de volume, sendo que esse desvio é máximo em $t=0$ e decresce linearmente ao longo do tempo, o que pode ser observado na Figura 4-19 para vazão de 9L/min e Figura 4-20

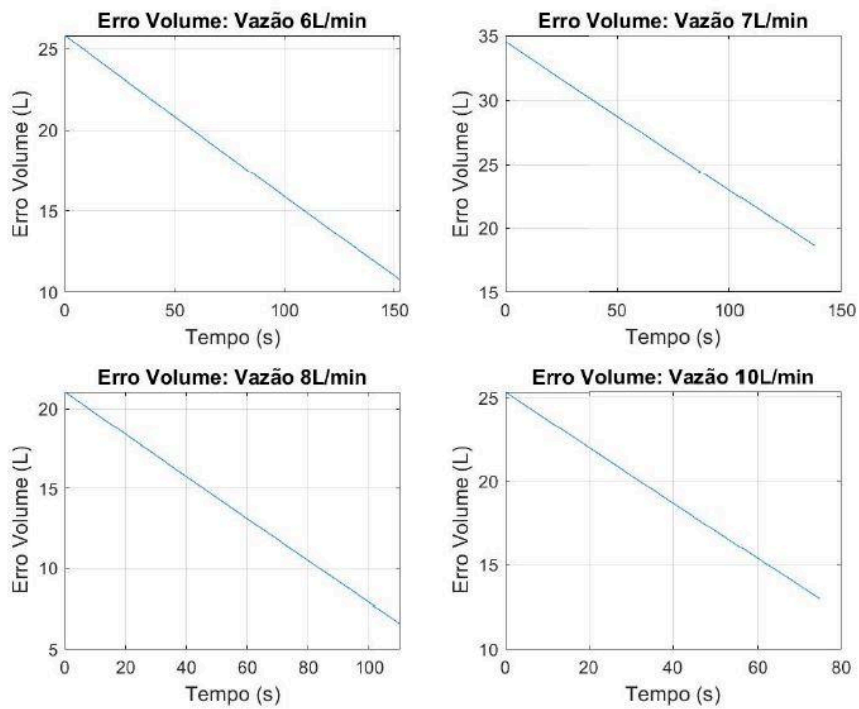
para demais vazões. O erro devido à condutividade elétrica da solução efluente tem amplitude menor quando comparado ao erro devido ao volume.

Figura 4-19-Comportamento Erro Volume- Vazão 9L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

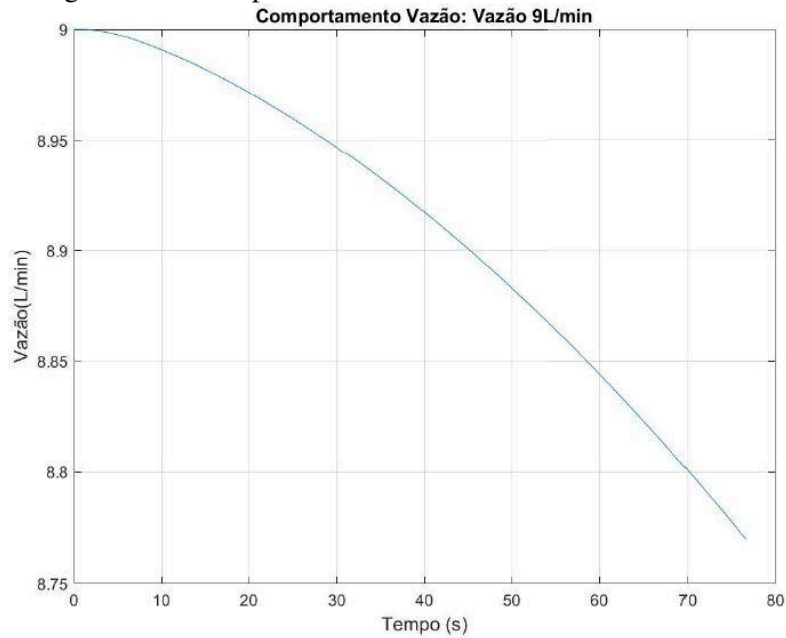
Figura 4-20- Comportamento Erro Volume: Demais Vazões



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

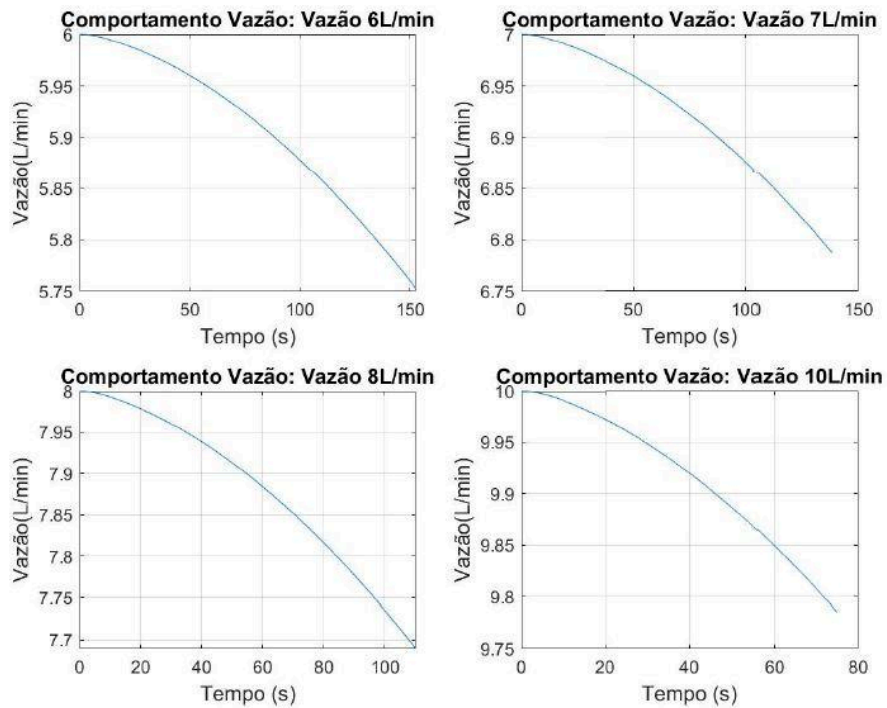
O comportamento da vazão para cada simulação está indicado na Figura 4-21 e Figura 4-22, evidenciando a diminuição da vazão utilizada com o tempo, o que causa a economia do volume observada.

Figura 4-21- Comportamento Vazão- Vazão inicial de 9L/min



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Figura 4-22-Comportamento Vazão



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Os resultados para tempo de enxágue, volume de água gasto e economia de água, estão indicados na Tabela 4-20.

Tabela 4-20- Comparação Resultados: Modelo Referência e Planta

Vazão (L/min)	Tempo de enxágue (s)		Volume de água (L)		Economia de Água (%)
	Modelo de Referência	Modelo Planta	Modelo de Referência	Modelo Planta	
6	212,3	151,3	21,23	14,85	30,05
7	230,5	132,8	26,89	15,28	43,18
8	131,6	110,6	17,55	14,48	17,48
9	114,6	74,83	17,19	11,10	35,43
10	138,0	74,88	23,00	12,16	47,13

Fonte: Acervo Pessoal (2021)

Na Tabela 4-20, os valores do Modelo de Referência são os valores obtidos por meio dos modelos determinados através dos experimentos, enquanto os valores do Modelo da Planta são os resultados atingidos por meio da utilização da estratégia de controle.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4-20, é possível perceber que aplicando a estratégia de controle sugerida, que emprega o critério de parada previamente definido, obteve-se economia de água com todas as vazões estudadas. Além da economia de água, é possível constatar uma economia de tempo para as situações consideradas, o que também é um fator positivo, já que um menor período de tempo gasto em um processo CIP se traduz em um menor tempo com a planta parada.

A vazão de 7L/min apresentou uma economia de volume de água gasto de 43,18%, mas essa possui um maior consumo de água que outras vazões, assim como as vazões de 6L/min e 8L/min que proporcionaram economias de 30,05% e 17,48%, mas possuem um consumo de água e de tempo maior que outras vazões.

Finalmente, as vazões iniciais de 9L/min e 10L/min foram a que apresentaram um menor tempo de operação e menor volume consumido, tendo respectivamente uma economia de água de 35,43% e 47,13% respectivamente, quando comparadas com o seu modelo de referência. Assim sendo, são as mais viáveis para se realizar a operação proposta.

Considerando que a higienização de equipamentos deve acontecer regularmente, as economias obtidas de água e de tempo representariam valores consideráveis em escala industrial, além da consequente economia de energia.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propiciou o conhecimento do comportamento dinâmico do processo, por meio do acompanhamento da variável condutividade. Através dela foi possível a elaboração de modelos de primeira ordem com tempo morto para a etapa enxágue, bem como o ajuste destes e o desenvolvimento de modelos que melhor se adequavam aos dados experimentais e assim representam melhor o processo.

Foi possível implementar a estratégia de controle proposta, que apresentou resultados satisfatórios quanto ao comportamento das variáveis de interesse, bem como resultou em economia de volume de água gastos e de tempo.

Este trabalho também possibilitou a estimativa das economias decorrentes da estratégia de controle e assim a avaliação da eficiência dessa estratégia, bem como através dessas estimativas determinar a vazão que oferece a melhor opção de operação, ou seja, a que apresenta um menor consumo de água e economia de tempo.

Por fim, foi possível compreender o processo de limpeza CIP e sua importância, assim como suas etapas individuais, variáveis que podem afetar sua eficiência e os efeitos deste para as indústrias que o utilizam.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho apenas a etapa de enxágue foi estudada, possibilitando assim que outras etapas do processo CIP tenham essa metodologia aplicada. Além disso, pode-se estudar a influência de parâmetros como concentração de detergente e temperatura na economia de volume de água utilizado, considerando essa estratégia de controle.

Para as simulações realizadas, foi utilizado um controle PID com a sintonia realizada por uma ferramenta automática do MATLAB™, logo é possível analisar a utilização de outros métodos de sintonia, bem como de outros tipos de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.
- ARCURI, E.F. Biofilmes bacterianos na indústria de alimentos. **Leite e Derivados**, São Paulo, v.53, p.40-45. 2000.
- BANSAL, B; CHEN, X. A critical review of milk fouling in heat exchangers. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.5,p. 27–33. 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00080.x>
- BEQUETTE, B. W. **Process control: modeling, design and simulation**. New Jersey: Prentice Hall, 2012.
- BOTT, T. R. **Fouling of Heat Exchangers**. Amsterdam: Elsevier, 1995.
- BREMER, P.J.; FILLERY, S. ; MCQUILLAN, A.J. Laboratory scale clean-in-place (CIP) studies on the effectiveness of different caustic and acid wash steps on the removal of dairy biofilms. **International Journal of Food Microbiology**, v.106, pp. 254-262. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.07.004>
- BURTON, H. **Ultra High Temperature Processing of Milk and Milk Products**. 1^a. ed. Nova Iorque: SPRINGER SCIENCE+ BUSINESS MEDIA, LLC, 1994. 354 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2157-0_1
- CARLOTTI FILHO, M. A. C. **Estudo da Cinética de Remoção de Resíduos de Cálcio e de Detergente Alcalino para Otimizar as Estapas de Pré-Lavagem e de Enxágue em um Trocador de Calor de Placas**. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, p. 72. 2008.
- CARNEIRO, L. **Ajuste Dinâmico dos Parâmetros do Controlador de Vazão de Água de Enxágue Aplicado à Remoção da Solução Detergente em Sistema CIP**. 2017. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- CARRERA, S. C. **Validação do Processo CIP como Ferramenta para Melhorar a Qualidade e a Produtividade: Estudo de Caso em Microcervejaria**. UFSC. Florianópolis, p. 112. 2015.
- CHANDRAKASH, S. A. **New Risk Analysis of Clean-in-Place (CIP) Milk Processing**. The University of Adelaide. Adelaide, p. 101. 2012.
- CHANGANI, S. D.; BELMAR-BEINY, M. T.; FRYER, P. J. Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.14. p.392- 406. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(96\)00141-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00141-0)

DIF, M.; BLEL, W.; TASTAYRE, G.; LENDORMI, T.; SIRE, O. Identification of transfer mechanisms involved in soiled CIP solutions regeneration at extreme pH and high temperature. **Journal of Food Engineering**, v.114, p.477-485. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.036>

FICKAK, A.; AL-RAISI, A.; CHEN, X. D. Effect of whey protein concentration on the fouling and cleaning of a heat transfer surface. **Journal of food engineering**, v.104, 323-331. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.004>

FORNI, R. **Projeto Mecânico de um Sistema de Higienização CIP** (Cleaning in Place. USP, Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, p. 114. 2007.

FORSYTHE, S. J.; HAYES, P. R. **Higiene de lós alimentos, microbiologia y HACCP**. 2 ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 2002.

FRIIS, A.; JENSEN, B. B. B. Improving the hygienic design of closed equipment. In: LELIEVELD, H. L. M.; MOSTERT, M. A.; HOLAH, J. Handbook of hygiene control in the food industry. 1ª. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. Cap. 11, p. 720. <https://doi.org/10.1533/9781845690533.2.191>

FRYER, P. J.; ASTERIADOU, K. A prototype cleaning map: a classification of industrial cleaning processes. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, p.255-262. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.03.005>

FRYER, P.J.; CHRISTIAN, G. K.; LIU, W. How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning. **International Journal of Dairy Technology**, v. 59, n.2, p. 76-84, mai. 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2006.00249.x>

FRYER, P. J.; ROBBINS, P. T.; ASTERIADOU, K. Current knowledge in hygienic design: can we minimize fouling and speed cleaning? **Procedia Food Science**,v. 1, p.1753-1760. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.258>

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**. Malden, v. 87, p. 41- 48. 1999. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1999.00790.x>

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

GOODE, K. R.; ASTERIADOU, K.; FRYER, P. J.; PICKSLEY, M.; ROBBINS, P.T. Characterising the cleaning mechanisms of yeast and the implications for Cleaning In Place (CIP). **Food and Bioproducts processing**, v.88, p.365-374. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.08.005>

GORMEZANO, L. **Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular**. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2007.

HANKINSON, D. J. and CARVER, C. E. Fluid dynamic relationships involved in circulation cleaning. *Journal of Dairy Science* v. 51, p. 1761 – 1767. 1968. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(68\)87273-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(68)87273-X)

HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (ed.). **Handbook of Food Engineering**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2007.

HOLAH, J. T. Cleaning and disinfection practices in food process sink. In: LELIEVELD, H. L. M.; HOLAH, J.; NAPPER, D. Hygiene in food processing: Principles and practice. 2^a. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014. Cap. 9. <https://doi.org/10.1533/9780857098634.3.259>

HOOPER, R. J.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. Comparison of whey protein model foulants for studying cleaning of milk fouling deposits. **Food and Bioproducts Processing**, v.84, p.329–337. 2006. <https://doi.org/10.1205/fbp06028>

ICTA. **Manual de higienização**: Indústria alimentar. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/icta/instituto/gerencia-administrativa1/limpeza/manual-de-higienizacao/view>. Acesso em: 09 out. 2020.

ISERMANN, R., MUNCHHOF, M. **Identification of Dynamic Systems**. Springer, 2011. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78879-9>

JUNIOR, V. M. **Instrumentação e Identificação de um processo de sanitização cinética CIP**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2011.

JUN, S; PURI, V. M. Fouling models for heat exchangers in dairy processing: a review. *Journal of food process engineering*, v. 28, n.1, p.1-34, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00473.x>

KANEGSBERG, B. **Handbook for critical cleaning**. Boca Raton: CRC Press Ltd, 2001. <https://doi.org/10.1201/9781420039825>

LEITÃO, M. F. F. **Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos**. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 43, p. 1-35, 1957.

LELIÈVRE, C.; ANTONINI, G.; FAILLE, C.; BÉNÉZECH, T. Cleaning-in-Place: modelling of cleaning kinetics of pipes soiled by Bacillus spores assuming a process combining removal and deposition. **Food and Bioproducts Processing**, v.80, p. 305-311. 2002. <https://doi.org/10.1205/096030802321154826>

LELIEVELD, H.; MOSTERT, T.; HOLAH, J. **Handbook of hygiene control in the food industry**. Cambridge: CRC, 2005. <https://doi.org/10.1533/9781845690533>

LI, G; TANG, L; ZHANG, X; DONG, J. A review of factors affecting the efficiency of clean-in-place procedures in closed processing systems. **Energy**. Ningbo, p. 57-71. abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.123>

LJUNG, L.; **System Identification. Theory for the User.** 2 ed. Linkoping University, Sweden. Prentice Hall, 1999.

LORENZEN, K.; GMBH, T. Improving cleaning-in-place (CIP). In: LELIEVELD, H. L. M.; MOSTERT, M. A.; HOLAH, J. Handbook of hygiene control in the food industry. 1^a. ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2005. Cap. 27. <https://doi.org/10.1533/9781845690533.3.425>

MARLIN, T. E. **Process Control: designing processes and control systems for dynamic performance.** 2ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2014.

MARRIOTT, N. G.; GRAVANI, R. B. **Principles of Food Sanitation.** 5^a. ed. Nova Iorque: Springer, 2006. 413 p. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4329.2006.00004.x>

MELERO JR, V. **Instrumentação e Identificação de um Processo de Sanitização Cinética CIP.** Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, p. 134. 2011.

MOERMAN, F.; RIZOULIÈRES, P.; MAJOOR, F. A. Cleaning in place (CIP) in food processing. In: LELIEVELD, H. L. M.; HOLAH, J. T.; NAPPER, D. Hygiene in food processing: Principles and practice. 2^a. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014. Cap. 10. <https://doi.org/10.1533/9780857098634.3.305>

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

PAK, T. **Cleaning in place: A guide to cleaning technology in the food processing industry.** [S.l.]: Pak, Tetra, 2016. 40 p

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 8^a ed. New York: McGraw-Hill Professi, 2008.

SANTOS, V. E. D. D. **Otimização de ciclos Clean-in-place.** Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, p. 126. 2014.

SILVA, L. D. **Análise da Limpeza CIP e Avaliação da Sanitização Utilizando Vazão Pulsada.** 2018. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SISLIAN, R. **Estudo de Sistema de Limpeza CIP Usando Identificação de Sistemas.** Unicamp. Campinas, p. 160. 2012.

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.

SCHÖLER, M. et al. Local analysis of cleaning mechanisms in CIP processes. **Food and bioproducts processing,** v.90. p.858-866. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.06.005>

SEBORG, D. E., MELLICHAMP, D. A., EDGAR, T. F., DOYLE III, F. J. **Process dynamics and control**. 3ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

SEIBERLING, D. A. **Clean-In-Place for Biopharmaceutical Processes**. Nova Iorque, Estados Unidos da América: Informa Healthcare, v. 173, 2007. <https://doi.org/10.3109/9781420014051>

SMITH, C., CORRIPIO, A. **Princípios e práticas do controle automático de processo**. 3ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

TAMIME, A. **Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations**. 3rd. Oxford: Blackell Publishing, 2008. <https://doi.org/10.1002/9781444302240>

TULADHAR, T. R.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. Investigation of alkaline cleaning-in-place of whey protein deposits using dynamic gauging. **Food and Bioproducts Processing**, 80, p.199-214. 2002. <https://doi.org/10.1205/096030802760309223>

VAN ASSELT, A. J.; VAN HOUWELINGEN, G.; TE GIFFEL, M. C. Monitoring system for improving cleaning efficiency of cleaning-in-place processes in dairy environments. **Food and Bioproducts Processing**, v.80, p.276-280. 2002. <https://doi.org/10.1205/096030802321154772>

WERNE, P. G. A. **Reuse Concept Vital Segments in a Clean in Place Project**. Lund University. Lund, p. 121. 2016.

WIRTANEN, G.; SALO, S. Disinfection in food processing-efficacy testing of disinfectants. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v.2, p.293-306. 2003. <https://doi.org/10.1023/B:RESB.0000040471.15700.03>

APÊNDICE A- PROGRAMA COMPLETO

