



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Simulação da etapa de enxágue de um processo CIP usando modelos acoplados

GABRIELA CAIXETA ALCARRIA

Uberlândia

2021

GABRIELA CAIXETA ALCARRIA

Simulação da etapa de enxágue de um processo CIP usando modelos acoplados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro habilitação Engenharia Química

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Rubens Gedraite

Uberlândia

2021

GABRIELA CAIXETA ALCARRIA

Simulação da etapa de enxágue de um processo CIP usando modelos acoplados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro habilitação Engenharia Química

Área de concentração: Engenharia Química

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite
Orientador
Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Sergio Mauro da Silva Neiro
Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian
Instituto Federal de São Paulo / Campus Guarulhos

Uberlândia, 18 de junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar sempre e colocar no meu caminho pessoas boas e sempre dispostas a ajudar.

À minha família, por sempre acreditar em mim e garantir todos os meios para que eu pudesse trilhar os caminhos que escolhi. Em especial, à minha mãe e meu pai, minha base, por todo apoio, confiança e por sempre estarem ao meu lado torcendo e vibrando com cada conquista. Ao meu irmão João Vitor, por estar nessa caminhada ao meu lado e sempre me fazer rir.

Aos meus amigos e colegas que fizeram da experiência universitária, sem dúvida, a melhor fase da minha vida. Foram cinco anos de muito crescimento tanto profissional como pessoal. Um agradecimento em especial às minhas amigas Clara e Marina pela amizade e companheirismo ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Rubens Gedraite, pelos ensinamentos em aulas presenciais e virtuais, pelo acolhimento e por ter sido um exemplo de profissional, sempre muito solícito e disposto a ajudar.

Por fim, agradeço a todos os professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Química, e da Universidade Federal de Uberlândia como um todo; cultivei aqui as melhores lembranças.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Círculo de Sinner	9
Figura 2.2. Componentes típicos de um sistema CIP.....	111
Figura 2.3. Concentração e temperatura para remoção completa de depósitos de cálcio.....	14
Figura 2.4. Diagrama de malha de controle fechada.....	15
Figura 2.5. Relação entre as variáveis de entrada e saída de um sistema.....	16
Figura 2.2. Resposta do modelo FOPDT a um degrau.....	17
Figura 3.1. Diagrama de blocos para otimização do modelo do processo	19
Figura 3.2. Diagrama de simulação do subsistema 1	20
Figura 4.1. Condutividade simulada e experimental para 5 L/min	21
Figura 4.2. Condutividade simulada e experimental para 6 L/min	22
Figura 4.3. Condutividade simulada e experimental para 7 L/min	23
Figura 4.4. Condutividade simulada e experimental para 8 L/min	24
Figura 4.5. Condutividade simulada e experimental para 9 L/min	25
Figura 4.6. Condutividade simulada e experimental para 10 L/min	26
Figura 4.7. Condutividade simulada e experimental para 11 L/min	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Modelos identificados e ajustados considerando duas dinâmicas para o processo..18

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Vantagens e Desvantagens do sistema CIP automatizado	12
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

CIP – Clean-in-place

CLP – Controlador lógico programável

FOPDT – First Order Plus Dead Time

$e(t)$ – Erro atuante (sinal de entrada do controlador)

IoT – Internet of Things

K_C – Termo proporcional de ajuste do controlador

K_P – Ganho do processo

$m(t)$ – Variável manipulada (sinal de saída do controlador)

T_I – Termo integral de ajuste do controlador

T_D – Termo derivativo de ajuste do controlador

τ_P – Constante de tempo do processo

θ_P – Tempo morto do processo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Higienização Industrial.....	8
2.2. Fatores que influenciam a higienização	9
2.3. Clean-in-Place (CIP)	10
2.4. Componentes básicos de um sistema CIP típico	11
2.5. Funcionamento de um sistema CIP	12
2.6. Controle de Processos	14
2.7. Modelagem dinâmica de um sistema para fins de controle de processo	16
3. MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO CIP ESTUDADO	18
4. RESULTADOS OBTIDOS	21
5. CONCLUSÃO	28
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	29

RESUMO

A higienização de equipamentos em processos industriais é essencial para garantir o bom funcionamento das instalações, a qualidade do produto final e também a eficiência do processo. O processo de limpeza CIP (*Clean-in-Place*) é caracterizado por realizar a higienização sem que seja necessário desmontar equipamentos, tubulações e, na maioria das vezes, funciona de forma automática para que seja realizada com maior qualidade e confiabilidade. Essa automatização está diretamente relacionada com a indústria 4.0, que é um modelo de indústria que engloba tecnologias para automação e troca de dados entre equipamentos físicos e virtuais. Foi simulada a etapa de enxágue de um processo CIP usando modelos acoplados de modo a se caracterizar o comportamento da cinética de remoção dos resíduos de detergente alcalino que são altamente danosos à saúde do consumidor. Os modelos foram identificados com base na curva de reação do processo, usando resultados experimentais obtidos na literatura, que representam a etapa de enxágue de um processo de limpeza CIP realizada em um protótipo. A simulação foi realizada no aplicativo MatlabTM/SimulinkTM e apresentaram resultados considerados satisfatórios, sugerindo que podem ser usados como indicadores chave de performance executado via computação na nuvem.

Palavras Chave: higienização, CIP, indústria 4.0, cinética, simulação, resíduos, limpeza.

INTRODUÇÃO

A operação de limpeza dos equipamentos de processo é importante para o bom funcionamento de instalações industriais de um modo geral, sendo que em alguns setores assume papel crucial. Este é o caso da indústria de alimentos, da indústria de bebidas e da indústria farmacêutica.

A limpeza dos equipamentos de processo, utilizando o procedimento tipicamente adotado pelos modernos sistema de limpeza CIP (do inglês, *Clean-In-Place*), já é uma realidade nos segmentos anteriormente citados. A questão que se coloca a partir de agora é a automação do processo CIP, que a cada dia é mais presente.

Pode-se afirmar que os modernos sistemas de limpeza CIP utilizados em instalações industriais de grande porte já fazem uso de sistemas de controle automáticos microprocessados, os quais permitem conferir ao processo flexibilidade de ajuste dos valores dos parâmetros de controle. A tendência que se verifica no momento está relacionada à utilização dos conceitos de Internet das Coisas (*IoT*, em inglês). Neste cenário, estudar o emprego de modelos matemáticos simplificados que possam ser executados via computação na nuvem (em inglês, *cloud computing*) é a tendência futura do desenvolvimento tecnológico nesta área do conhecimento com vistas à gestão do processo.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático obtido pelo acoplamento de modelos individuais identificados a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura e que representa a cinética do processo de remoção de resíduos de detergente alcalino durante a etapa de enxágue em um processo de limpeza CIP, simulado no aplicativo Matlab™/Simulink™, que servirá de base para um futuro indicador chave de performance executado via computação na nuvem.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1. Higienização Industrial

A higienização consiste nos processos de limpeza e desinfecção de superfícies ou equipamentos de forma a assegurar que os resíduos da produção sejam removidos por meio da quebra do ciclo de vida de agentes infecciosos. Dessa forma, reduz-se os riscos de contaminação e infecções dos produtos.

A higienização nas empresas de processamento, principalmente do ramo alimentício e farmacêutico, é uma preocupação desde o início da era industrial. Essas indústrias são, geralmente, compostas por uma série de equipamentos e tubulações que não podem ser desmontadas para que seja realizada as limpezas e esterilização. Por esse motivo, foram desenvolvidas técnicas como o Processo de Limpeza no Local (*Clean-in-Place* - CIP), o qual permite que os contaminantes orgânicos e inorgânicos sejam removidos dos equipamentos no local onde estão instalados.

As condições sanitárias de um produto estão diretamente relacionadas com as condições do sistema no qual foi produzido. Superfícies de equipamentos que entram em contato com os produtos ao longo do processamento podem provocar aumento da incidência de microrganismos e contaminação do mesmo (**ANDRADE; MACEDO, 1966**). A presença de resíduos nas superfícies de um processo, contribui também para a redução da eficiência dos equipamentos, visto que aumenta a rugosidade superficial e, conseqüentemente, os níveis de queda de pressão dos mesmos (**BANSAL; CHEN, 2005; FRYER et al., 2006**).

Além disso, foi verificado que a higienização dos equipamentos de forma adequada pode reduzir custos de processo, já que afeta diretamente as paradas programadas de manutenção e inspeção, reparo nos equipamentos, perda de produção, de energia e consumo excessivo de água (**JUN; PURI, 2005**).

Van Asselt; De Jong (2005) defendem que mais de 80% dos custos operacionais de empresas que processam derivados lácteos estão relacionadas a processos de higienização de equipamentos. Segundo **Beuf et al. (2003)**, a indústria leiteira holandesa, por exemplo, gasta mais de US\$ 40 milhões com problemas consequentes da formação de resíduos.

Diante desses motivos, verifica-se que a otimização do processo de higienização é imprescindível para redução de custos de processos industriais. Para que isso aconteça é importante conhecer a origem e as características dos resíduos e, a partir disso, tomar as decisões das maneiras mais adequadas de remoção.

6.2. Fatores que influenciam a higienização

Sinner propôs um modelo denominado Círculo de Sinner, apresentado na **Figura 2.1**, que define os principais fatores que influenciam na limpeza de um sistema. São eles o tempo, os agentes químicos, mecânicos e térmicos (**FORNI, 2007**).

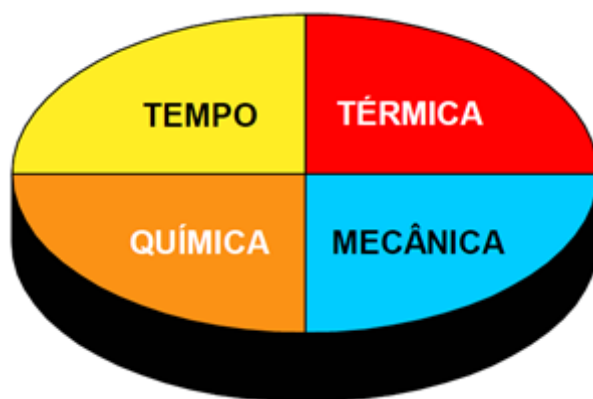


Figura 2.1. Círculo de Sinner
Fonte: **FORNI (2007)**

Agentes químicos: produtos químicos presentes nos desinfetantes utilizados na higienização. Os desinfetantes devem possuir alto poder de eliminação de elementos patógenos. Eles, geralmente, atuam por meio da oxidação, coagulação de proteínas, ação do pH e reações químicas.

Agentes mecânicos: obtida por meio do escoamento do fluído na superfície da sujeidade ou a partir de um jato fluído em contato com a superfície. Se tratando do escoamento, o fluído está sob a ação de tensões de cisalhamento que atuam nas superfícies sólidas e resultam em uma força de atrito na direção do escoamento que tem como tendência remover as partículas de sujeidade.

Agentes térmicos: de acordo com a cinética química, quanto maior a temperatura, maior o grau de agitação das moléculas. Essa temperatura contribui para que a energia de ativação seja atingida, possibilitando a ocorrência das reações ou fazendo com que as mesmas ocorram de forma mais rápida.

Tempo: quanto mais tempo as sujidades estão expostas aos produtos químicos, maior o número de ligações rompidas e, assim, mais eficiente é a limpeza.

O Círculo de Sinner parte do princípio que, para uma higienização efetiva, é ideal que haja a participação dos quatro fatores mencionados acima em proporções diferentes de acordo com a origem e as características das sujidades.

6.3. Clean-in-Place (CIP)

O sistema de limpeza *Clean-in-Place* (CIP) é um método de limpeza automatizado desenvolvido para a remoção de resíduos de equipamentos e tubulações de sem que seja necessário desmontar ou abrir esses itens. Essa limpeza é realizada por meio da circulação de fluídos nas superfícies, o que resulta no arraste das sujidades. O principal objetivo dessa técnica é realizar a limpeza de forma rápida, consistente e de alta qualidade (MOERMAN et al., 2014).

De acordo com Moerman et al. (2014), existem diversos parâmetros que influenciam a limpeza CIP de um sistema, a saber:

a. Concentração do detergente

A concentração do detergente deve variar de acordo com o tipo de resíduo e a parte com mais difícil alcance de limpeza. Segundo Timperley e Smeulders (1988), a concentração ideal de detergente para a limpeza de um trocador de calor presente em uma linha de processamento de leite é 2,5%. A utilização de uma concentração maior que essa, não só aumenta o custo com insumos como requer maior tempo para limpeza do sistema.

b. Temperatura

Timperley e Smeulders (1988) também demonstraram que o logaritmo natural do tempo de limpeza é inversamente proporcional a temperatura da solução, ou seja, para temperaturas maiores, a limpeza ocorre de forma mais rápida. É necessário ressaltar que essa temperatura deve ser monitorada de acordo com o resíduo a ser removido e as substâncias utilizadas, visto que algumas enzimas desnaturam em temperaturas elevadas e certos compostos gelatinizam.

c. Velocidade do fluido

A velocidade do fluido, impacta diretamente na remoção de incrustações. Para a limpeza de um trocador de calor do tipo placas que processa leite, por exemplo, observou-

se que uma velocidade de 0,2 a 0,5 m/s reduz é responsável por uma redução no tempo de limpeza em 70%. Velocidades muito altas podem danificar o equipamento devido ao forte impacto do fluido nas paredes das tubulações (TIMPERLEY e SMEULDERS, 1988).

d. Tempo de limpeza

Com relação ao tempo de limpeza do sistema, geralmente, quanto maior o tempo, melhor a limpeza, porém, a partir de um certo período de tempo a qualidade da limpeza varia muito pouco, não sendo viável permanecer em limpeza por longos períodos devido a parada na produção e o alto consumo de insumos.

6.4. Componentes básicos de um sistema CIP típico

Um sistema CIP deve ser composto dos seguintes equipamentos: tanques de armazenamento para as soluções utilizadas na higienização, bombas para transporte dos fluidos, trocador de calor. A quantidade de cada um desses equipamentos irá depender do volume e da área superficial dos tanques e tubulações os quais deseja-se higienizar (FORNI, 2007). Na **Figura 2.2** é apresentada a representação de um sistema de limpeza CIP típico.



Figura 2.2. Componentes típicos de um sistema CIP
Fonte: FORNI (2007)

Os equipamentos apresentados na figura ilustram um sistema CIP básico, onde é empregado o controle manual. Segundo Forni (2007), para que esse processo se torne automatizado, deve-se utilizar alguns instrumentos de medição e controle, tais como: sensores de vazão, de nível e de temperatura, condutivímetros, temporizadores, controladores automáticos, blocos de funções lógicas e válvulas remotamente operadas com a finalidade de controle regulatório e de bloqueio/desbloqueio das linhas.

Os condutivímetros são responsáveis pelo controle do funcionamento do processo CIP propriamente dito. Esses equipamentos, por meio de um sinal elétrico, se comunicam com outros, tais como os controladores automáticos, os quais atuam sobre as válvulas – que por sua vez – regulam, impedem ou liberam a passagem das soluções de limpeza química. São essenciais, visto que auxiliam no controle do descarte tanto da água de enxágue de cada etapa quanto das soluções de limpeza. Adicionalmente, proporcionam a dosagem automática de químicos, evitando erros operacionais de dosagem e reduzindo os riscos de contato humano com esses materiais.

As válvulas solenoides, por sua vez, permitem realizar a interrupção ou a liberação das soluções de limpeza e da água de enxágue por meio de comando remoto a partir de sinais elétricos. Já as válvulas de controle permitem a regulação automática dos fluxos e a dosagem de soluções de limpeza de forma gradual.

6.5. Funcionamento de um sistema CIP

Os sistemas CIP podem funcionar de forma manual, na qual a equipe de operação é responsável pelo controle dos parâmetros importantes para o funcionamento seguro do processo, a saber: tempo, temperaturas, pressões e concentrações. Outra possibilidade, como já anteriormente citado, é o funcionamento de forma automática, processo no qual um Controlador Lógico Programável (CLP) é utilizado para realizar os passos da limpeza de forma automática (GORMEZANO, 2007).

Os processos automatizados têm ganhado cada vez mais espaço nos ambientes industriais. Softwares regulam os parâmetros do processo de forma que, caso haja um desvio no que foi programado no CLP, o processo é interrompido ou são tomadas ações para minimizar ou eliminar esses desvios (HONER, 1992). Segundo Marriot (1994) a automação do processo possui certas vantagens e desvantagens, as quais são apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Vantagens e desvantagens do sistema CIP automatizado

Vantagens	Desvantagens
Confiabilidade do cumprimento das etapas propostas	Alto custo de implementação
Confiabilidade da duração das etapas	Alto custo de manutenção
Registro para possíveis auditorias ou fiscalizações	Baixa flexibilidade no sistema
Redução de mão de obra requerida para operação	
Melhoria na higiene do processo	
Otimização dos tempos de limpeza	

Fonte: Adaptado de MARRIOT (1994)

Um processo de higienização adequado estabelece um procedimento padrão composto pelas seguintes etapas (**SCHMIDT, 1997; ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991**):

a. Pré-lavagem

Nessa etapa utiliza-se apenas água a uma temperatura entre 40 e 60°C, já que temperaturas acima dessa faixa podem gerar desnaturação de proteína. O objetivo dessa etapa é remover as sujidades não aderidas nas superfícies diminuindo a quantidade de resíduos presentes. Segundo **Andrade e Macedo (1996)**, aproximadamente 90% das impurezas são removidas nessa etapa. Esse número pode variar de acordo com a solubilidade e a condição da sujidade presente no sistema.

b. Circulação de detergente alcalino

O intuito dessa etapa é remover a sujidade que estava mais aderida nas paredes das tubulações e equipamentos. Para isso, é aplicada uma solução detergente que irá remover os compostos orgânicos do sistema. Segundo **Moerman et al. (2014)**, a água é aquecida até uma temperatura entre 55 e 90 °C e então soda caustica ou algum outro detergente é adicionado. Normalmente, a solução de soda fica em uma faixa de concentração entre 1 e 3%. Visto que é uma etapa longa, podendo durar até 60 min, é importante a recirculação da solução detergente para fins de viabilidade econômica.

c. Enxague Primário

Etapa na qual é utilizada água quente ou em temperatura ambiente para remover resíduos de sujidades ou do detergente. É realizada até que não sejam identificados componentes químicos na saída do processo, durando em torno de 3 a 10 min.

d. Circulação de detergente ácido

Etapa opcional utilizada para solubilizar sujidades restantes, remover depósitos minerais e neutralizar possíveis resíduos de detergentes alcalinos que possam ter ficado no processo (**MOERMAN et al., 2014**). A solução mais utilizada é a de ácido nítrico, visto que ela apresenta menor corrosividade que as outras soluções. Segundo **White e Rabe (1970)**, a concentração ideal da solução de ácido nítrico para a remoção de depósitos de cálcio em superfície metálica é de 0,01N a uma temperatura de,

aproximadamente, 54 °C. Na **Figura 2.3** é possível observar a combinação de parâmetros de temperatura e concentração para remoção de depósitos de cálcio em superfícies metálicas. Concentrações abaixo de 0,01N requerem temperaturas mais elevadas, enquanto acima desse valor é possível trabalhar com temperaturas mais amenas. Portanto, é comum o uso de soluções de ácido nítrico com concentração entre 1 e 1,5% e temperaturas entre 60°C e 80°C, garantindo a eficácia da remoção da sujidade e evitando efeitos colaterais como a corrosão.

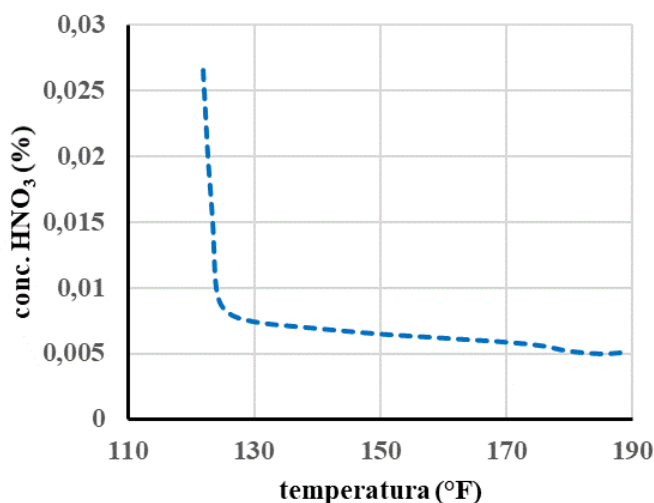


Figura 2.3. Concentração e temperatura para remoção completa de depósitos de cálcio
Fonte: adaptado de **White; Rabe (1970)**

e. Sanitização e enxágue final

Nessa etapa é utilizada alguma espécie de desinfetante recirculando durante 5 a 60 min a depender da temperatura do sistema e da redução requerida de microrganismos no sistema.

Em seguida, no enxágue final, usa-se água para remover quaisquer resíduos que tenham ficado no sistema. A duração dessa etapa pode variar de acordo com o monitoramento de parâmetros como pH do líquido de saída e condutividade para garantir que o sistema esteja realmente limpo.

6.6. Controle de Processos

O controle do processo consiste em manter as variáveis de saída de um processo, seja ela temperatura, pressão, vazão, entre outras, no valor desejado. Esse controle se faz fundamental tanto para garantir a qualidade e a precisão do processo quanto para assegurar que as condições seguras de operação sejam obedecidas.

De acordo com **Seborg; Edgar; Mellichamp (2011)**, o controle automático de processos é tradicionalmente feito em malha fechada. A variável do processo que se deseja controlar é continuamente medida e comparada com um valor de *set-point*; caso haja diferença entre esses dois valores, é realizada a aplicação de ação corretiva sobre a variável manipulada pelo sistema. Na **Figura 2.4**, é apresentado um diagrama de blocos que representa uma típica malha de controle automática por realimentação.

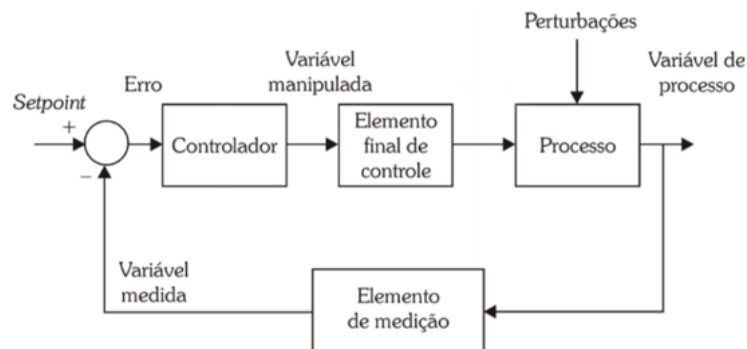


Figura 2.4. Diagrama de malha de controle fechada
Fonte: A autora

Para que seja possível realizar o controle automático, são necessários alguns itens na malha, a saber:

Sensor: fonte de informação do sistema, já que mede o valor das variáveis controladas por meio da detecção de determinados estímulos. Deve ser sensível o suficiente para captar variações relevantes para o processo.

Transmissor: dispositivo que mede uma variável de processo através de um elemento primário (sensor) e que tem como saída algum sinal mensurável padronizado.

Controlador: tomador de decisão, recebe a informação do transmissor, compara com o *set-point* e determina a ação a ser tomada.

Elemento final de controle: dispositivo físico que irá realizar o que foi determinado pelo controlador.

O controlador PID é o mais utilizado na indústria de processos, sendo que ele pode ser implementado tanto como o algoritmo na forma analógica quanto na forma digital. O modelo matemático de um controlador PID é dado pela **Equação 01**.

$$m(t) = K_c \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (01)$$

Cada um dos parâmetros citados reage de forma diferente ao erro. O controlador pode ter um ou uma combinação desses parâmetros. A resposta proporcional elimina as oscilações do sinal de saída o que faz com que o sistema reaja mais rapidamente, mas, pode ocasionar na criação de erros permanentes. A resposta integral produz um sinal que é proporcional a duração do erro, ou seja, o erro acumulado. Em função disso, pode ocorrer um *overshoot*, que é quando o valor ultrapassa o *set-point*. Por último, a ação derivativa fornece uma correção antecipada do erro, diminuindo o tempo de resposta e aumentando a estabilidade do sistema, porém, apresenta uma alta sensibilidade a ruídos, podendo ampliá-los (GUTIRREZ, 2007).

6.7. Modelagem dinâmica de um sistema para fins de controle de processo

Para sintonizar o controlador, se faz necessário entender como as variáveis do processo se comportam com o tempo. De acordo com Hedengren (2020), isso pode ocorrer de duas maneiras: resultados experimentais e relações fenomenológicas do processo. Essas relações têm origem no balanço do sistema e pode-se desenvolver o modelo a partir de equações diferenciais. Essas equações diferenciais são convertidas para o domínio de Laplace e representadas como funções de transferência. De acordo com Electrical4u (2021), uma função de transferência consiste na relação entre as variáveis de entrada (input) e saída (output) de um sistema, como mostrado no diagrama de blocos apresentado na Figura 2.5, assumindo todas as condições iniciais do sistema como zero, ou seja, o ponto inicial sendo o estado estacionário.



Figura 2.5. Relação entre variáveis de entrada e saída de um sistema

Fonte: Electrical4u (2021)

Portanto, a função de transferência $G(s)$ é a razão entre o sinal de saída $Y(s)$ e o sinal de entrada $X(s)$ do sistema, como apresentado na **Equação 02**.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (02)$$

Segundo **Cvejn (2009)**, as plantas industriais são, normalmente, bem representadas por uma função de transferência de primeira ordem mais tempo morto (*FOPDT*), como mostrado na **Equação 03**.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau_p \cdot s + 1} e^{-\theta_p \cdot s} \quad (03)$$

Na Figura 2.6 pode-se observar o significado gráfico dos parâmetros θ_p e τ_p ao aplicar-se um estímulo do tipo degrau unitário em um sistema de primeira ordem, que pode ser exemplificado como uma mudança no valor do *set-point*. Na figura, observa-se que a curva fica até um tempo θ_p sem variação e aos poucos alcança seu estado estacionário. Já τ_p pode ser definido como o tempo necessário para o sistema atingir 63,2% do seu valor final (**SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP; 2011**).

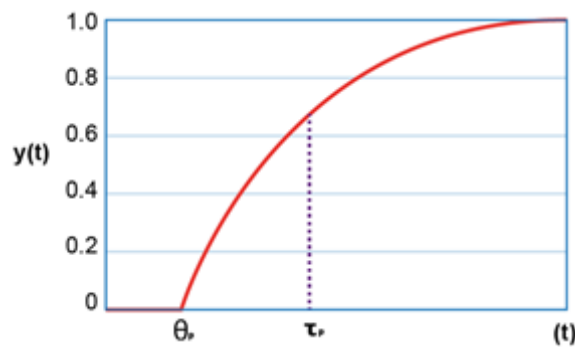


Figura 2.6. Resposta do modelo FOPDT a um degrau
Fonte: **A autora**

MODELO MATEMATICO DO PROCESSO CIP ESTUDADO

O modelo desenvolvido calcula os valores de condutividade elétrica da corrente efluente do sistema para os valores de vazão variando entre 5 L/min e 11 L/min, considerando que estes valores de vazão representam de maneira adequada e equivalente aqueles tipicamente empregados em instalações industriais no que diz respeito ao adimensional de número de Reynolds (MELERO Jr. (2011); BICALHO et al.(2014)).

Tabela 3.1. Modelos identificados e ajustados considerando duas dinâmicas para o processo

Vazão [L/min]	Modelo	R ²
5	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-4,12)}{1,7s + 1} e^{-6s} + \frac{(-0,24)}{90s + 1} e^{-14,1s}$	0,9946
6	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-3,5)}{1,5s + 1} e^{-5,45s} + \frac{(-0,13)}{80s + 1} e^{-13s}$	0,9957
7	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-3)}{1,3s + 1} e^{-4,65s} + \frac{(-0,11)}{70s + 1} e^{-10s}$	0,9934
8	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-2,6)}{1,1s + 1} e^{-4s} + \frac{(-0,075)}{58s + 1} e^{-10s}$	0,9882
9	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-2,33)}{0,9s + 1} e^{-3,9s} + \frac{(-0,09)}{35s + 1} e^{-12s}$	0,9850
10	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-2,08)}{0,8s + 1} e^{-3,8s} + \frac{(-0,088)}{24,5s + 1} e^{-8s}$	0,9879
11	$\frac{C(s)}{F(s)} = \frac{(-1,91)}{0,74s + 1} e^{-3,5s} + \frac{(-0,07)}{24,4s + 1} e^{-11s}$	0,9914

Fonte: Brasileiro (2020)

Os parâmetros de cada submodelo foram ajustados com base nas curvas de reação do processo, sendo a validação dos mesmos realizada com a parte dos resultados experimentais não usada para identificar os parâmetros dos submodelos (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2011).

O diagrama de simulação que permite a otimização do processo estudado é apresentado na **Figura 3.1**, na forma de um diagrama de blocos mostrando a inter-relação entre as variáveis do processo. Este modelo otimizado não foi objeto de estudo neste TCC.

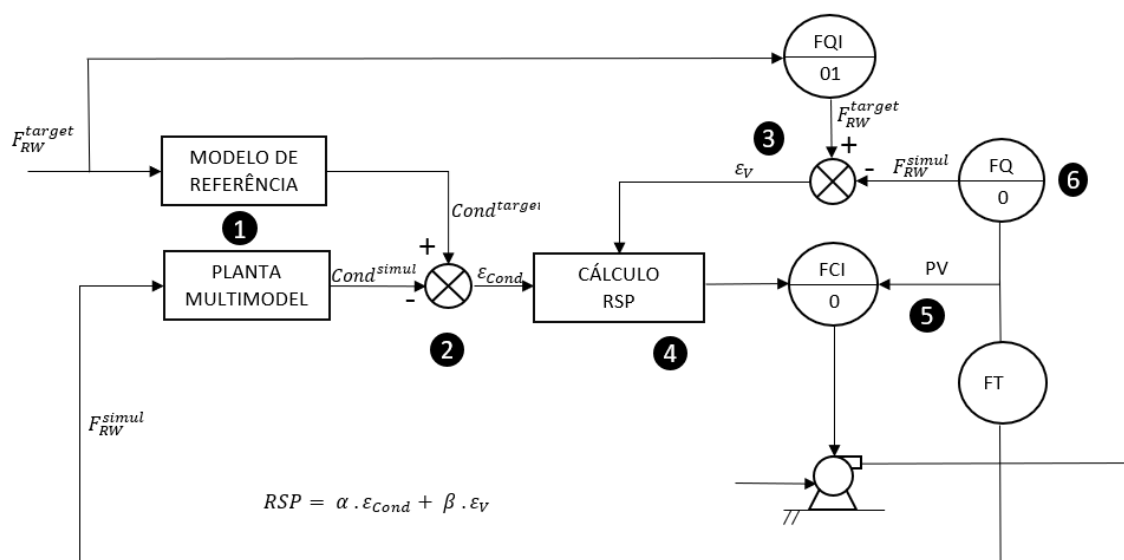


Figura 3.1. Diagrama de blocos para otimização do modelo do processo
 Fonte: A autora

No **subsistema “1”**, são apresentados o modelo de referência e a planta multimodelo, responsáveis por gerar os sinais de $Cond^{target}$ (desejado) e $Cond^{simul}$ (simulado) respectivamente. Estes sinais são enviados para o **subsistema “2”**, responsável por calcular o sinal de erro de condutividade (ϵ_{Cond}). Simultaneamente, o **subsistema “3”** calcula o erro devido ao volume de água de lavagem gasto no processo (ϵ_V). Os sinais gerados pelos **subsistemas “2” e “3”** são empregados para calcular o valor do set-point remoto a ser usado pelo controlador de vazão. Isto é feito no **subsistema “4”**. O **subsistema “5”** modela matematicamente o comportamento da malha de controle de vazão de água de enxágue e o **subsistema “6”** modela matematicamente o comportamento do totalizador e integrador de vazão.

Na **Figura 3.2** é apresentado o diagrama de simulação do **subsistema “1”** implementado em Matlab/Simulink™, considerando o trabalho desenvolvido por **BRASILEIRO (2020)**.

O valor da vazão de água de enxágue é o sinal de entrada do modelo, sendo encaminhado simultaneamente aos dois submodelos, a saber: *i)*- **submodelo “CINÉTICA RÁPIDA”** e *ii)*- **submodelo “CINÉTICA LENTA”**. Nestes dois submodelos são calculados os valores da condutividade elétrica correspondente à etapa de decaimento rápido e de decaimento lento, respectivamente. Somando-se as contribuições de cada um com o valor inicial da condutividade medida

experimentalmente durante os testes, obtém-se o valor global simulado da condutividade elétrica.

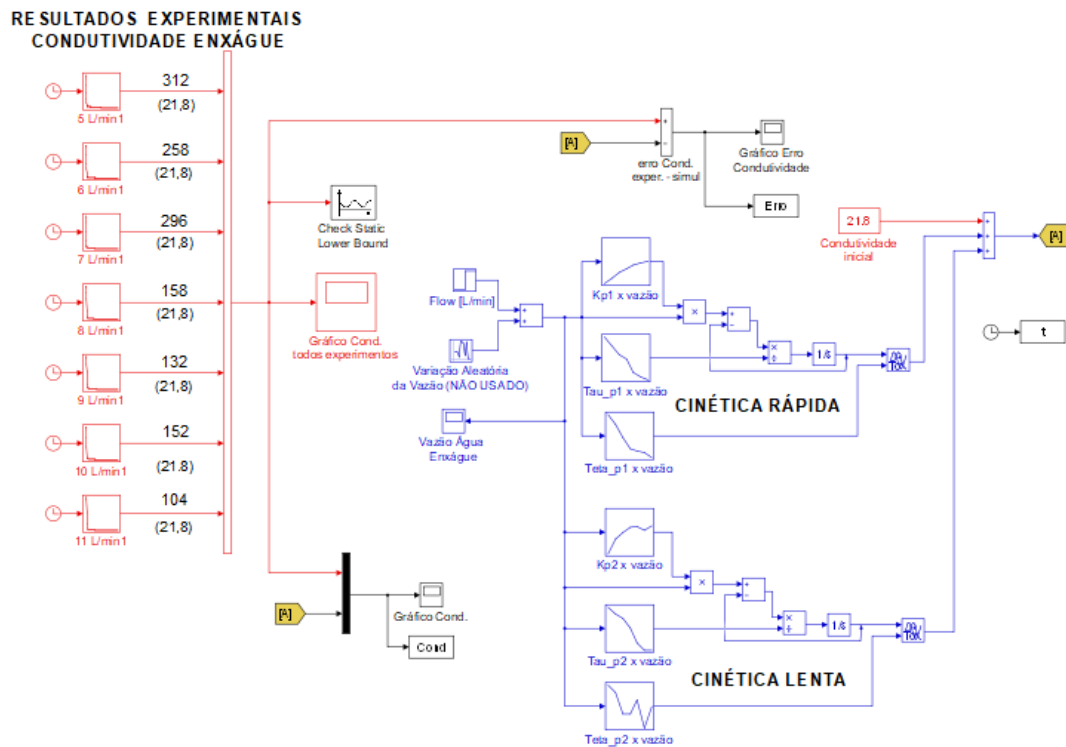


Figura 3.2. Diagrama de simulação do subsistema “1”
Fonte: A autora

RESULTADOS OBTIDOS

Considerando o modelo matemático apresentado no diagrama de simulação da **Figura 3.2**, foram simulados os comportamentos da condutividade elétrica do efluente descartado para os valores de vazão apresentados

Na **Figura 4.1** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **5 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

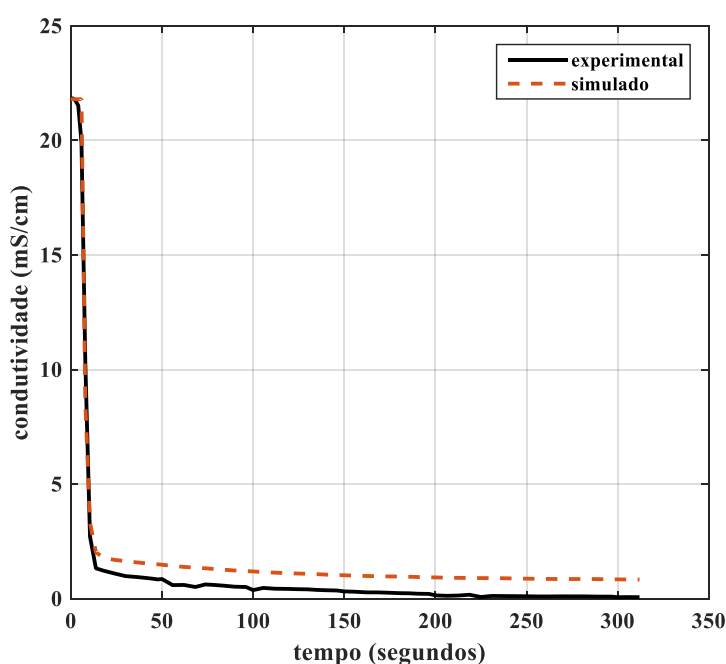


Figura 4.1. Condutividade simulada e experimental para 5 L/min
Fonte: **A autora**

O comportamento do decaimento inicial simulado e o determinado experimentalmente foram praticamente iguais, o que permite afirmar que o modelo matemático proposto foi adequado e coerente. O comportamento da condutividade do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura, porém deslocado para menos. Esta diferença entre o valor simulado e o valor experimentalmente encontrado, da ordem de 0,5 mS/cm, é considerada aceitável e está em acordo com a precisão do medidor de condutividade. Esta diferença pode ser explicada com base nos valores dos parâmetros identificados para o modelo que representa a cinética lenta, os quais podem ter sido estimados com maior grau

de incerteza devido ao fato do valor da vazão ser pequeno em comparação com os outros valores de vazão avaliados. Uma possível explicação para o comportamento observado pode ser o fato de que o instante em que ocorre a transição da cinética rápida para a cinética lenta foi avaliado de maneira incorreta, iniciando antes do tempo mais adequado para tal. O instante em que ocorre a transição está associado ao parâmetro tempo morto identificado para o modelo de cinética lenta.

Na **Figura 4.2** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **6 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

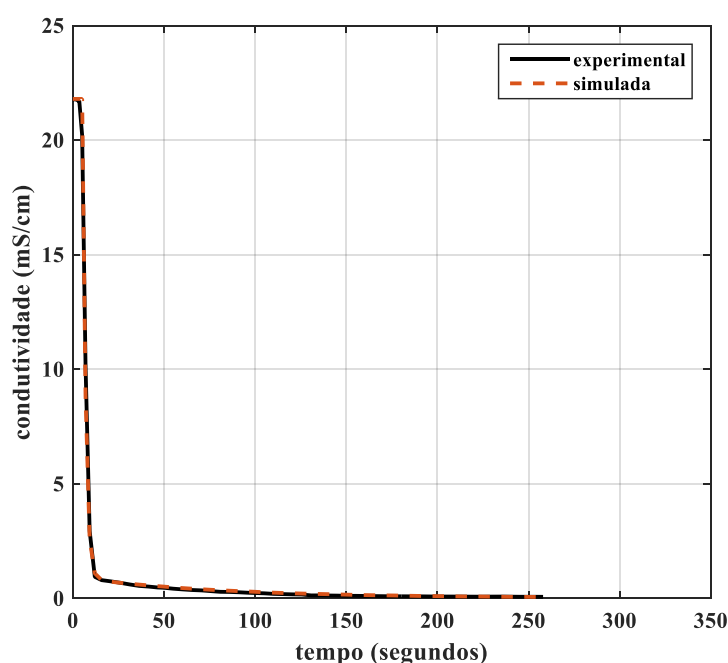


Figura 4.2. Condutividade simulada e experimental para 6 L/min
Fonte: **A autora**

O comportamento da etapa de cinética rápida e da etapa de cinética lenta foi modelado de maneira satisfatória, podendo-se afirmar que praticamente não existe diferença entre os valores experimentais e simulados. Como o valor da vazão é maior do que o anteriormente avaliado, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, como pode ser visualizado na figura anterior.

Na **Figura 4.3** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **7 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

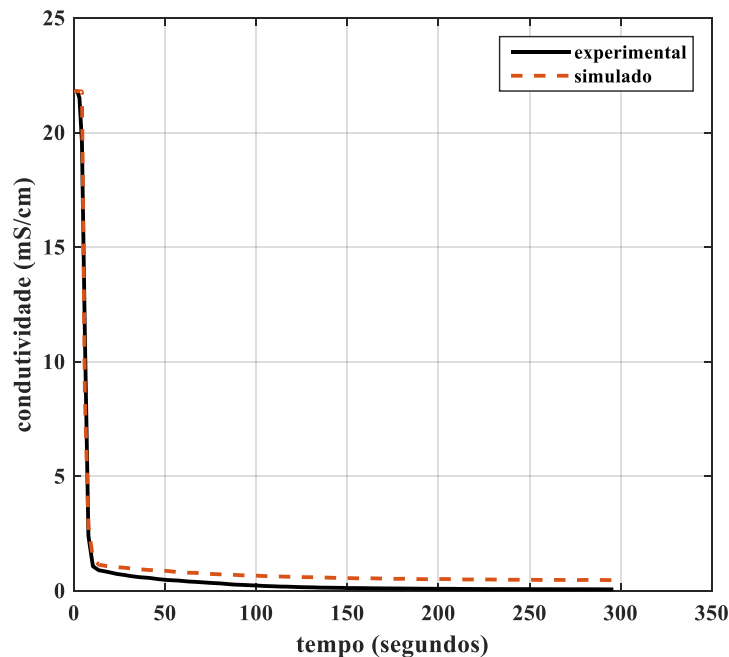


Figura 4.3. Condutividade simulada e experimental para 7 L/min
Fonte: A autora

O comportamento da condutividade do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura, porém deslocado para menos. Esta diferença entre o valor simulado e o valor experimentalmente encontrado, da ordem de 0,4 mS/cm, é considerada aceitável e está em acordo com a precisão do medidor de condutividade. Uma possível explicação para o comportamento observado pode ser o fato de que o valor do parâmetro ganho do processo para a cinética lenta foi avaliado de maneira incorreta, apresentando um valor um pouco menor do que o requerido. Como o valor da vazão é maior do que aqueles anteriormente avaliados, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, considerando 350 segundos como o tempo máximo possível para a etapa de enxágue. Contudo, ele foi maior do que o tempo de duração da etapa para a vazão de 6 L/min, o que revela certa incoerência. Este comportamento pode ser atribuído à tanto a incertezas nos valores de vazão medidos e controlados quanto aos valores obtidos na medição de condutividade.

Na **Figura 4.4** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **8 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

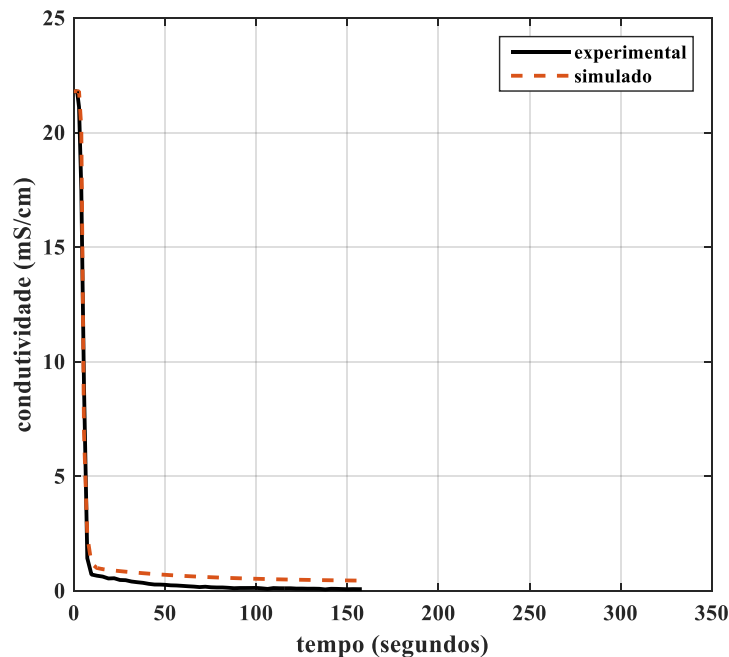


Figura 4.4. Condutividade simulada e experimental para 8 L/min
Fonte: A autora

O comportamento do decaimento do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura, porém deslocado para menos. Esta diferença entre o valor simulado e o valor experimentalmente encontrado, da ordem de 0,37 mS/cm, é considerada aceitável e está em acordo com a precisão do medidor de condutividade. Uma possível explicação para o comportamento observado pode ser o fato de que o valor do parâmetro ganho do processo para a cinética lenta foi avaliado de maneira incorreta, apresentando um valor um pouco menor do que o requerido. Como o valor da vazão é maior do que aqueles anteriormente avaliados, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, considerando 350 segundos como o tempo máximo possível para a etapa de enxágue e está coerente com a tendência de diminuição mostrada pelos tempos de enxágue anteriormente apresentados.

Na **Figura 4.5** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **9 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

O comportamento do decaimento do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura, porém deslocado para menos. Esta diferença entre o valor simulado e o valor experimentalmente encontrado, da ordem de 0,40 mS/cm, é considerada aceitável e está em acordo com a

precisão do medidor de condutividade. Uma possível explicação para o comportamento observado pode ser o fato de que o instante em que ocorre a transição da cinética rápida para a cinética lenta foi avaliado de maneira incorreta, iniciando antes do tempo mais adequado para tal. O instante em que ocorre a transição está associado ao parâmetro tempo morto identificado para o modelo de cinética lenta e este pode ter sido sobrestimado. Como o valor da vazão é maior do que aqueles anteriormente avaliados, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, considerando 350 segundos como o tempo máximo possível para a etapa de enxágue e está coerente com a tendência de diminuição mostrada pelos tempos de enxágue anteriormente apresentados.

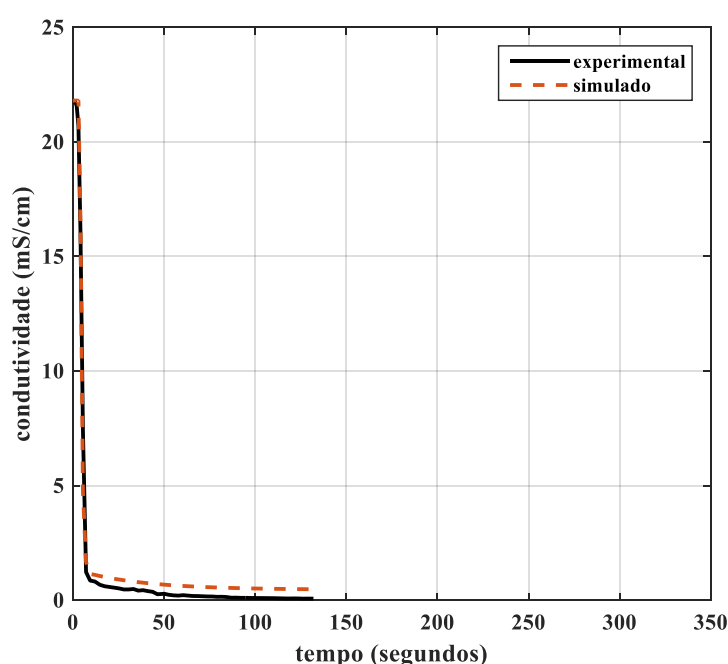


Figura 4.5. Condutividade simulada e experimental para 9 L/min
Fonte: A autora

Na **Figura 4.6** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **10 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

O comportamento do decaimento do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura. Como o valor da vazão é maior do que aqueles anteriormente avaliados, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, considerando 350 segundos como o tempo máximo possível para a etapa de enxágue e está coerente com a tendência de diminuição mostrada pelos tempos de enxágue anteriormente apresentados.

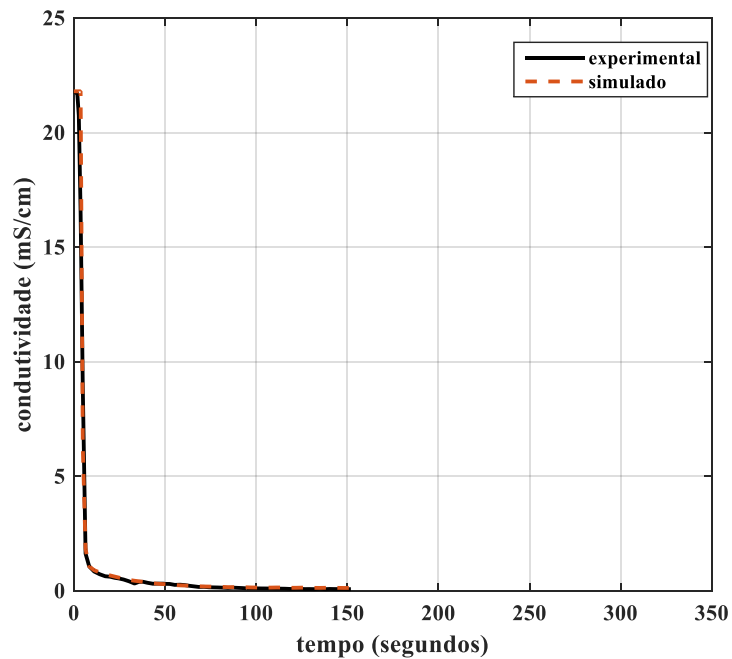


Figura 4.6. Condutividade simulada e experimental para 10 L/min
 Fonte: A autora

Na **Figura 4.7** são apresentados os valores da condutividade elétrica para a vazão de água de enxágue igual a **11 L/min**, considerando o valor obtido experimentalmente por **Silva (2018)** e o valor simulado.

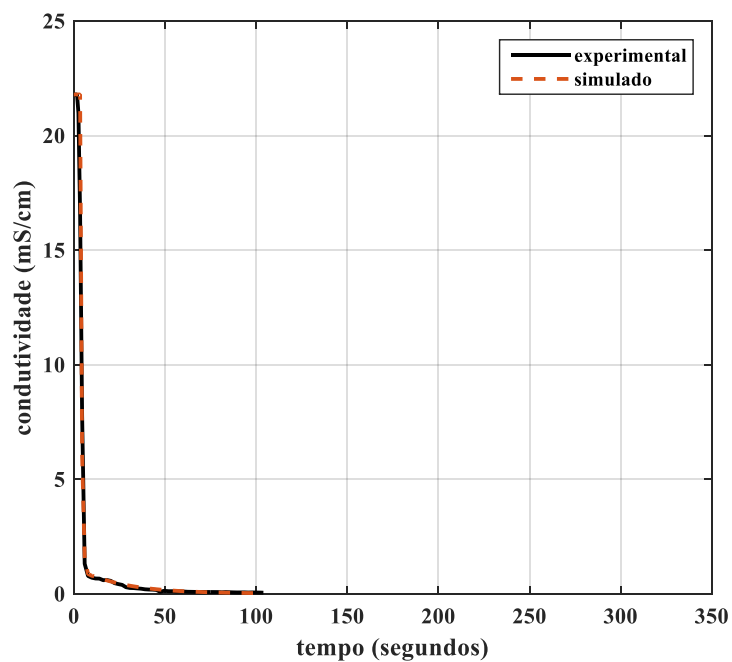


Figura 4.7. Condutividade simulada e experimental para 11 L/min
 Fonte: A autora

O comportamento do decaimento do trecho final apresentou decaimento coerente com o observado nos resultados experimentais publicados na literatura. Como o valor da vazão é maior do que aqueles anteriormente avaliados, o valor final da condutividade é alcançado em menor tempo de enxágue, considerando 350 segundos como o tempo máximo possível para a etapa de enxágue e está coerente com a tendência de diminuição mostrada pelos tempos de enxágue anteriormente apresentados.

CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o modelo se apresentou satisfatório para todas as vazões testadas. Para as vazões de 6, 10 e 11 L/min, praticamente não houve diferença entre os resultados experimentais e simulados. Já as vazões de 5, 7, 8 e 9 L/min apresentaram diferenças entre os dois valores, ainda que pequenas, as quais estão de acordo com a precisão do medidor de condutividade. Além disso, o erro pode estar atribuído a avaliações incorretas dos parâmetros para a cinética lenta e, também, na identificação da transição da etapa rápida para a lenta.

Apesar disso, os modelos matemáticos desenvolvidos descreveram de forma satisfatória a cinética do processo de remoção de resíduos de detergente alcalino durante a etapa de enxágue em um processo de limpeza CIP. Para próximos passos, recomenda-se que o modelo obtido seja executado via computação na nuvem (*cloud computing*) para controle e automatização de processos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, N.J.; MACEDO, J.A.B. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.

BANSAL, B.; CHEN, X.D. **A critical review of milk fouling in heat exchangers**. Comprehensive reviews in food science and food safety, v. 5, n. 2, p. 27-33, abril 2006.

BEUF, M.; RIZZO, G.; LEULIET, J.C.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; YIANTSIOS, S.; KARABELAS, A. and BENEZECH, T. **Fouling and Cleaning of Modified Stainless Steel Plate Heat Exchangers Processing Milk Products**. Engineering Conferences International, 2003.

CVEJN, J. **Sub-optimal PID controller settings for FOPDT systems with long dead time**. *J. Process Control*, vol. 19, no. 9, pp. 1486–1495, 2009.

Electrical4U. **Transfer Function of Control System**. 2019. [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/transfer-function/>.

FORNI, R. **Projeto Mecânico de um Sistema de Higienização CIP (Cleaning in Place)**. São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia mecânica, 2007. Trabalho de Formatura.

GORMEZANO, L. **Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular**. Dissertação de mestrado, CEUN-IMT.2007.

GUTIRREZ, J. **Proportional-integral-derivative explained**. *EETimes*, 2007. [Online]. Available: <https://www.eetimes.com/proportional-integral-derivative-explained/>. [Accessed: 24-Aug-2020].

HEDENGREN, J.D. **Dynamics and Control**. 2020. [Online]. Available: <http://apmonitor.com/che436/>. [Accessed: 22-Aug-2020].

HONER, C. **Sanitation: front and center**. Dairy Field, p. 16-23, mar. 1992.

LEITÃO, M.F.F. **Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos**. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 43, p. 1-35, set. 1975.

MARRIOT, N.G. **Principles of Food Sanitation**. Springer Science + Business Media Inc, 416 p. New York-U.S.A., 1994.

SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. **Process Dynamics and Control**. Singapore: Wiley, 2011.

TIMPERLEY, D.A.; SMEULDERS C.N. **Cleaning of dairy HTST plate heat exchangers: comparison of single- and two-stage procedures**. International Journal of Dairy Technology, 1987.

VAN ASSELT, A.J.; DE JONG, P. **In-line control of fouling**. Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities. Kloster Irsee, Germany, 2005.

WHITE, J.C.; RABE, G.O. **Evaluating the use of Nitric Acid as a Detergent in Dairy Cleaned-in-Place Systems**. *J. Milk Food Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 25–28, 1970.