

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

RAFAEL PIVA CRUVINEL MIRANDA

Limpeza CIP: proposta de indicador de desempenho de sensor de concentração para baixas  
velocidades de escoamento

Uberlândia, MG  
2022

RAFAEL PIVA CRUVINEL MIRANDA

Limpeza CIP: proposta de indicador de desempenho de sensor de concentração para baixas velocidades de escoamento

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. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia

2022

RAFAEL PIVA CRUVINEL MIRANDA

Limpeza CIP: proposta de indicador de desempenho de sensor de concentração para baixas velocidades de escoamento

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

Área de concentração: Engenharia Química

Uberlândia, 01 de abril de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

---

Eng. Lucas Arthur Rodrigues

Engenheiro de Automação

Andritz

---

Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Instituto Federal de São Paulo / Campus Guarulhos

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, em especial minha vó, Edélzia e meu tio, Fernando, por sempre me suportarem em tudo que precisei durante a graduação.

Ao professor Rubens, por toda a orientação e suporte dados que foram imensamente contributivos para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho é estudado o comportamento do processo de remoção de resíduo de leite aderido à superfície interna de um trecho de tubo considerando o emprego de baixas velocidades de escoamento da solução detergente alcalina formada por hidróxido de sódio a 0,5% m/m. A avaliação da cinética de remoção dos resíduos foi realizada com base em modelo matemático desenvolvido a partir de uma função de transferência. Os valores de velocidade de escoamento foram escolhidos com base em trabalhos publicados na literatura, que reportam o emprego de menores velocidades de escoamento. O comportamento da cinética de remoção do resíduo de leite foi coerente com o publicado na literatura, apesar de apresentarem significativa variação entre os valores amostrados. Os valores de velocidade de escoamento estudados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si no processo de limpeza CIP. Foi proposto e testado um indicador de desempenho de calibração do sensor que se mostrou adequado para futura aplicação em processos realizados na indústria.

**Palavras-chave:** limpeza CIP, detergente alcalino, baixa velocidade, leite, indicador de desempenho de calibração.

## ABSTRACT

In this work, the behavior of the process of removing milk residue adhered to the inner surface of a section of tube is studied, considering the use of low flow velocities of the alkaline detergent solution formed by sodium hydroxide at 0.5% m/m. The evaluation of waste removal kinetics was performed based on a mathematical model developed from a transfer function. The flow velocity values were chosen based on works published in the literature, which report the use of lower flow velocities. The behavior of the kinetics of milk residue removal was consistent with that published in the literature, despite showing significant variation between the sampled values. The flow velocity values studied did not show statistically significant differences between them in the CIP cleaning process. A sensor calibration performance indicator was proposed and tested, which proved to be suitable for future application in industrial processes.

**Key words:** CIP cleaning, alkaline detergent, low speed, milk, sensor calibration performance indicator.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Fluxograma das etapas do sistema CIP .....	17
Figura 2.2 - Representação de um sistema .....	21
Figura 2.3 - Malha típica de controle por realimentação.....	22
Figura 2.4 - Reação de processo superamortecido a degrau.....	27
Figura 2.5 - Método da tangente para determinação dos parâmetros $\theta$ e $\tau$ do modelo .....	28
Figura 3.1 - Facilidade experimental pesquisada .....	29
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do indicador de desempenho.....	31
Figura 4.1 - Curva de calibração considerada .....	32
Figura 4.2 - Concentração de leite na solução de NaOH para 0,2 m/s.....	34
Figura 4.3 - Concentração de leite na solução de NaOH para 0,5 m/s.....	34
Figura 4.4 - Concentração de leite na solução de NaOH normalizada.....	35
Figura 4.5 - Diagrama de simulação do modelo de remoção de resíduos.....	38
Figura 4.6 - Diagrama de simulação do indicador de desempenho (0,2 m/s).....	38
Figura 4.7 - Comportamento temporal da concentração normalizada.....	39
Figura 4.8 - Diagrama de simulação do indicador de desempenho (0,5 m/s).....	39
Figura 4.9 - Comportamento temporal da concentração normalizada (0,5 m/s).....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Concentração versus absorvância por comprimento de onda .....	32
Tabela 4.2 - Comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,2 m/s.....	33
Tabela 4.3 - Comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,5 m/s.....	33
Tabela 4.4 - Variação normalizada da concentração de leite na solução de NaOH .....	35
Tabela 4.5 - Comportamento temporal experimental e simulado da variação da concentração normalizada de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,2 m/s.....	36
Tabela 4.6 - Comportamento temporal experimental e simulado da variação da concentração normalizada de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,5 m/s.....	37



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversas técnicas de preservação vêm sendo usadas para inibir ou eliminar transformações químicas, bioquímicas e biológicas prejudiciais à conservação de alimentos industrializados, em um contexto de significativo crescimento de produção destes produtos. Assim, torna-se essencial a preocupação com a preservação da qualidade destes itens. **(BANSAL; CHEN, 2006)**.

Além da conservação do produto, muita atenção vem sendo dada à higienização das superfícies dos equipamentos utilizados na preparação dos alimentos para que não haja a proliferação de microrganismos, contaminação por produtos estranhos ao processo ou resíduos de processamentos anteriores.

Um dos processos mais comumente utilizados para a finalidade de higienização de equipamentos consiste na limpeza *Clean-In-Place* (CIP), pois permite que o procedimento seja realizado sem a necessidade de desmontagem dos equipamentos. **(BANSAL; CHEN, 2006)**.

A quantidade de água gasta nos processos de limpeza, em especial nos processos *Clean-In-Place* (CIP), vem aumentando muito a cada ano, em decorrência da intensificação da produção de alimentos. Por se tratar de tema definido pelos órgãos de vigilância sanitária, não são poupados esforços para assegurar que o processo de limpeza dos equipamentos seja adequado e aderente ao estabelecido na legislação em vigor. Entretanto, este fato tradicionalmente implica na utilização, por parte da comunidade industrial, de maior quantidade de insumos do que aqueles que seriam necessários e tecnicamente suficientes para atender aos requisitos técnicos estabelecidos nas leis aplicáveis.

O contato dos alimentos com superfícies mal higienizadas pode aumentar a incidência de microrganismos prejudicando sua qualidade e elevando os riscos aos quais os consumidores estão expostos. A presença de resíduos também ocasiona problemas operacionais em equipamentos, como, por exemplo, trocadores de calor, pois acarreta queda dos rendimentos nas trocas térmicas e aumento de perda de carga do sistema. Esses fatores são suficientes para justificar a importância da execução de um correto plano de higienização dos insumos utilizados no processamento de alimentos.

Por serem procedimentos que requerem paradas de produção, os processos de higienização, muitas vezes, são realizados de forma negligenciada pelas empresas. Portanto, é de fundamental importância que sejam estudados e otimizados, através do estabelecimento das cinéticas de remoção de resíduos de cada etapa do processo.

O estabelecimento do tempo adequado ao processo de higienização é fundamental para a eficiência do processo. Deve ser suficientemente longo para que as reações químicas e as interações físicas ocorram a contento; mas não deve ser excessivo, pois reduziria a produtividade da indústria (**GEDRAITE, 2011**).

Um processo de higienização é composto pelas seguintes etapas: pré-lavagem, circulação de solução detergente, enxágue e circulação de solução com ação antimicrobiana (sanificante). As etapas estudadas serão: aplicação de solução do detergente e o enxágue. A primeira consiste na ação do detergente sobre os resíduos para que estes sejam removidos da superfície dos equipamentos. O enxágue se caracteriza pela passagem de água no equipamento com função de remoção do detergente químico utilizado e dos resíduos deslocados pelo mesmo.

Dois parâmetros envolvidos nestes processos merecem ser estudados com mais detalhes, a saber: *(i)*- a vazão de escoamento e *(ii)*- a temperatura. O primeiro está relacionado com a ação cisalhante proporcionada pela solução de detergente e água de enxágue sobre a superfície, enquanto o segundo permite melhor solubilização dos resíduos, facilitando sua remoção.

Em um processo CIP, o tempo de escoamento das soluções, em cada etapa do processo de higienização, é o parâmetro de maior facilidade de manipulação e, por isso, o fator preferido de redução. Porém, se alterado de forma não criteriosa, pode ocasionar a não efetividade do processo (**GORMEZANO, 2007**).

A prática de higienização de equipamentos pela indústria de alimentos baseia-se em experiências empíricas, deixando o setor à mercê de informações provenientes dos fornecedores de detergentes e sanitizantes. Parâmetros semiempíricos são adotados a partir de resultados de higienização considerados satisfatórios. A complexidade dos fenômenos existentes nas reações de remoção requer o aumento de trabalhos científicos que possam contribuir com os procedimentos adotados industrialmente (**BIRD; BARLETT, 2005**).

Neste trabalho é estudado emprego de um indicador de desempenho do sensor de concentração de resíduos de leite para avaliar afastamentos da leitura dele em relação a uma curva de calibração adotada como referência. O desenvolvimento do indicador de desempenho está baseado no emprego de modelos matemáticos simplificados que foram identificados para valores baixos de velocidade de escoamento de solução detergente alcalina de hidróxido de sódio em uma seção de testes incrustada com resíduos de leite.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Desde os primórdios da civilização humana, a conservação dos alimentos foi uma das necessidades do ser humano. Esta atividade era necessária para garantir a qualidade dos alimentos durante o período de inverno ou durante deslocamentos. (GEDRAITE, 2010).

Vários tipos de sistemas de conservação dos alimentos foram desenvolvidos ao longo dos séculos: salgar e defumar carnes e peixes, secar ao sol carnes e frutas etc. Mais recentemente, após os trabalhos de Louis Pasteur, passou-se a utilizar a técnica de ferver os alimentos e mantê-los hermeticamente selados para evitar a entrada de ar e de microrganismos.

Com o advento da era industrial os alimentos passaram a ser processados e várias tecnologias foram criadas para sua elaboração, manuseio, conservação e transporte. O processamento dos alimentos por máquinas levou à necessidade do desenvolvimento de várias técnicas para a limpeza delas após o seu uso, de maneira a não deixar resíduos onde pudessem proliferar microrganismos que iriam contaminar outros alimentos a serem processados posteriormente.

A limpeza e a subsequente esterilização ou desinfecção de qualquer item ou equipamento de uma instalação industrial de processamento de alimentos, produtos farmacêuticos ou de bebidas, deve ser realizada com o máximo cuidado e atenção para assegurar a qualidade do produto acabado. No início, o processo de limpeza, era um processo manual, o qual ainda é utilizado em instalações industriais de pequeno porte. Nestes casos, é vital que haja uma meticulosa atenção nos detalhes, pois, devido a razões de saúde e segurança, somente soluções químicas brandas e frias (detergentes) podem ser utilizadas.

A fabricação de produtos farmacêuticos, alimentícios e bebidas seria grandemente facilitada se os equipamentos e tubulações usados em seu processamento pudessem ser desmontados, postos em uma pia, vigorosamente escovados e então postos em um esterilizador para remover os contaminantes (HARROLD, 2000). Obviamente que as técnicas de limpeza utilizadas em laboratório são impraticáveis na maioria das instalações industriais de grande escala de produção. Os vasos, equipamentos e tubulações devem ser limpos no local onde estão instalados. O processo CIP é um dos processos de limpeza mais comumente utilizados na

indústria para assegurar que as tubulações e os equipamentos estejam livres de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Em linhas gerais o processo CIP consiste na limpeza e sanitização de todos os equipamentos envolvidos na produção, pelo bombeamento e circulação de soluções químicas e água. O sistema é constituído de vasos contendo as soluções de produtos (detergentes e sanitizantes) em concentrações pré-determinadas. As soluções são circuladas no sistema a ser limpo e sanitizado por tempos e sequências pré-determinados (**GEDRAITE, 2011**). Dependendo da aplicação pode ser acrescentado o uso de vapor de água para aquecimento na sequência acima.

Importante destacar que uma alternativa ao emprego de produtos químicos é a utilização de Ozônio. Deve-se, ainda, ressaltar o fato de que um equipamento ou outra superfície pode estar microbiologicamente limpo, sem necessariamente estar limpo física ou quimicamente (**KUNIGK, 1998**).

Vários fatores devem ser levados em consideração ao se planejar um sistema CIP de sanitização no que se refere aos equipamentos, materiais e compostos químicos utilizados. O material de construção usado nos equipamentos e tubulações não deve transmitir qualquer tipo de odor, sabor ou compostos tóxicos ao produto. Deve-se evitar que metais diferentes entrem em contato entre si, pois com a presença de eletrólitos verifica-se a ocorrência do fenômeno denominado corrosão eletrolítica que resultará em diminuição da vida útil do equipamento.

Tipicamente os equipamentos e tubulações que serão higienizados por um Sistema CIP são fabricados em aço inoxidável. O inibidor de corrosão nos aços inoxidáveis é a camada de óxido passivo que protege a superfície. Existem vários tipos de aços inoxidáveis. O mais comumente utilizado é o não magnético da série 300 (tipos 304 e 316). Os aços inoxidáveis tipos 304 e 316 são bastante resistentes à corrosão e são facilmente soldáveis. Uma característica importante para os sistemas CIP é a de que os componentes devem ter projeto sanitário, isto é, não deverá haver lugares com reentrâncias onde possa ocorrer o desenvolvimento de microrganismos.

Nos Estados Unidos, as recomendações do *Food and Drug Administration* (FDA) para a fabricação dos equipamentos a serem utilizados nas indústrias alimentícias estabelecem que

“todos os equipamentos e utensílios, incluindo os fabricados em plástico, deverão ser projetados e fabricados para resistirem às condições de uso normal e ao desenvolvimento de saliências, empenamentos, corrosão localizada, lascas e ranhuras”.

O acabamento das superfícies dos equipamentos e tubulações é um fator importante, pois os depósitos têm maior aderência em superfícies mais rugosas do que em superfícies lisas. Portanto, as superfícies dos equipamentos devem ser lisas, para facilitar a remoção destes depósitos. O acabamento sanitário padrão para os equipamentos usados na indústria alimentícia exige valores de *Ra* inferiores a 1 µm. O *Ra* é a medida do acabamento de uma superfície e representa a média ponderada da altura das irregularidades da superfície.

Um sistema CIP eficiente utiliza produtos de limpeza e sanitização apropriados para cada aplicação. Um mesmo produto não é adequado para todos os usos. Os bons produtos de limpeza devem ser econômicos, não tóxicos, não corrosivos e não aglutinantes. Adicionalmente, devem poder ser usados em concentrações fáceis de medir além de serem estáveis durante o armazenamento e facilmente e completamente solúveis (**MARRIOT, 1994**).

Segundo **MARRIOT (1994)**, para que um sistema de limpeza e sanitização seja eficiente, deverão ser disponibilizados: *(i)* – um suprimento adequado de água de boa qualidade (potável), *(ii)* – o detergente correto para a aplicação, *(iii)* – o sanitizante correto para a aplicação e *(iv)* – um procedimento de limpeza adequado.

A função do detergente é a remoção da sujeira, enquanto a do sanitizante é a redução no número de microrganismos. Embora o uso de detergente, ao remover a sujeira elimine vários microrganismos mecanicamente, o uso de um sanitizante, desde que corretamente aplicado, destruirá quimicamente os microrganismos (**MARRIOT, 1994**).

O processo de limpeza CIP pode ser executado tanto de forma manual como automática. Nos processos executados de forma manual, é o operador do processo quem executa as manobras necessárias nas válvulas equipamentos, bem como o controle dos parâmetros do processo, a saber: tempos, temperaturas e concentrações. Nos processos executados de forma automática, é tipicamente empregado um Controlador Lógico Programável (CLP) para executar as sequências de operações requeridas e, assim, realizar um controle total sobre os parâmetros do processo (**GORMEZANO, 2007; KUNIGK, 1998; GEDRAITE, 2010**).

Os sistemas CIP modernos são controlados através de softwares que regulam automaticamente as concentrações, as temperaturas das soluções e suas taxas de escoamento. Registram o processo através da utilização de gráficos e interrompem-no, sempre que algum desvio ao previamente programado ocorrer (**HONER, 1992**). Contudo, de acordo com **Fryer (2006)**, esses processos são altamente desenvolvidos e automatizados, porém raramente otimizados.

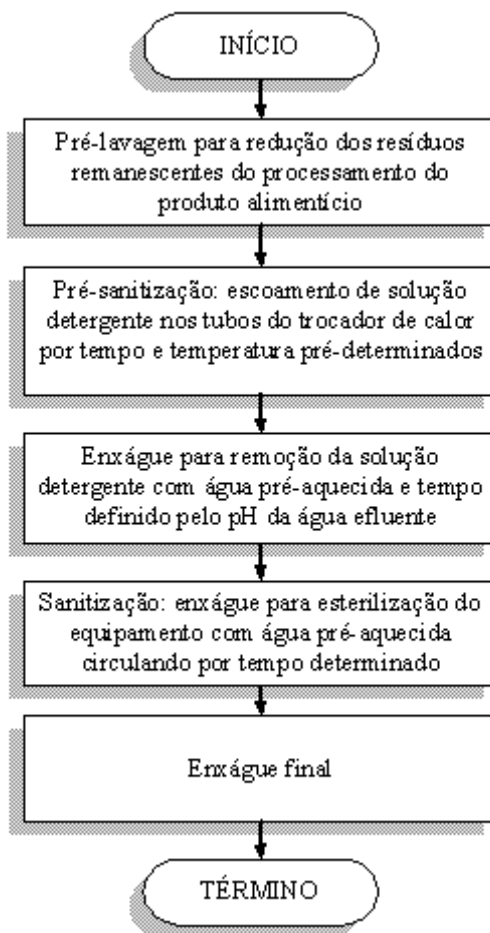
A automação do processo tem vantagens e desvantagens sobre o processo manual. **Marriot (1994)** apresenta as seguintes vantagens do processo automatizado em relação ao processo manual: *(i)* – confiabilidade de que todas as etapas foram realmente cumpridas, *(ii)* – confiabilidade de que os tempos das etapas foram obedecidos, *(iii)* – possibilidade de obter registro da atividade para efeito de fiscalização e ISO 9000, *(iv)* – redução de mão de obra (redução de custos), *(v)* – melhoria na higiene devido ao melhor controle das operações, *(vi)* – conservação das soluções utilizadas na limpeza, *(vii)* – melhoria na utilização dos equipamentos, pois estes podem ser higienizados imediatamente após o uso permitindo nova batelada ser iniciada (**GEDRAITE, 2011**).

Dentre as desvantagens apresentadas pelo processo automatizado, pode-se citar: *(i)* – custo de implantação devido ao fato de que cada sistema tem características próprias que necessitam de projeto e equipamentos “customizados”, *(ii)* – custo de manutenção é mais elevado devido à sofisticação do equipamento, *(iii)* – falta de flexibilidade no sistema caso haja variações nos equipamentos ou produtos a serem processados (**MARRIOT, 1994**).

As etapas que envolvem o sistema CIP de limpeza podem ser representadas conforme o fluxograma ilustrado na **Figura 2.1**. A operação do sistema CIP nada mais é do que a circulação de água e soluções químicas de limpeza pelas superfícies internas dos equipamentos, tubulações e tanques.



**Figura 2.1** - Fluxograma das etapas do sistema CIP



Fonte: adaptado de **Marriot (1994)**

O primeiro passo de uma higienização CIP é preparação das soluções químicas que são armazenadas nos tanques. A preparação dessas soluções é realizada através da diluição de produtos químicos concentrados em um solvente, geralmente água. Essa diluição pode ser realizada manualmente, em sistemas CIP mais simples, ou através de controladores de condutividade e bombas dosadoras. Uma vez realizado a dosagem de produto, o sistema está pronto para entrar em operação (**FORNI, 2007**).

Adicionalmente, é executado o pré-aquecimento da água de pré-enxágue para evitar que ocorra o choque térmico no sistema a ser limpo. O aquecimento é feito até a temperatura típica de 50°C, sendo a água recuperada transportada através do sistema formado pelas tubulações e pelo equipamento de processo por meio de bomba centrífuga. A água de pré-enxágue efluente do equipamento do processo é descartada.

A segunda etapa consiste na limpeza do equipamento do processo com uma solução de hidróxido de sódio proveniente do tanque de hidróxido de sódio quente. Nesta etapa, uma solução de hidróxido de sódio (detergente) previamente preparada é encaminhada ao equipamento de processo para sua limpeza. Esta solução é aquecida até a temperatura adequada de trabalho (85°C) e é feito seu escoamento pelo processo em circuito fechado, retornando ao tanque de hidróxido de sódio quente.

A terceira etapa consiste no enxágue intermediário com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água de enxágue intermediário é pré-aquecida a 50°C com o objetivo de manter aquecido todo o circuito a ser limpo. A etapa de enxágue intermediário visa remover o detergente (solução de hidróxido de sódio) do sistema. A água de enxágue efluente do equipamento de processo é retornada ao tanque de água recuperada, sendo a duração desta etapa definida pela condutividade elétrica da água efluente. A operação é interrompida quando a concentração de resíduos de hidróxido de sódio na água for inferior a um valor mínimo pré-estabelecido.

A quarta etapa consiste na limpeza do equipamento do processo com uma solução ácida proveniente do tanque ácido quente. Nesta etapa, uma solução ácida previamente preparada é encaminhada ao equipamento de processo para sua limpeza. Esta solução é aquecida até a temperatura adequada de trabalho (65°C) e é feito seu escoamento pelo processo em circuito fechado, retornando ao tanque de ácido quente. Por causar um desgaste maior em alguns componentes da linha de produção, essa etapa é pulada de tempos em tempos, caracterizando o sistema como não completo. Quando ela é realizada o sistema de limpeza é dito completo.

A quinta etapa consiste em outro enxágue intermediário com água tratada proveniente da rede de utilidades. Esta água de enxágue intermediário da etapa ácida é normalmente realizada à temperatura ambiente, com o objetivo de não volatilizar o sanitizante. A etapa de enxágue intermediário visa remover a solução ácida do sistema. Semelhantemente com a etapa de enxágue da solução alcalina, a água de enxágue efluente do equipamento de processo é feita com retorno ao tanque de água recuperada, sendo a duração desta etapa definida pela condutividade elétrica da água efluente. A operação é interrompida quando a concentração de resíduos de hidróxido de sódio na água for inferior a um valor mínimo pré-estabelecido.

A presença de substâncias orgânicas e/ou inorgânicas, muitas vezes presentes em resíduos de detergentes, pode causar a perda de efetividade do sanitizante por reagir quimicamente com ele, além de proteger fisicamente os microrganismos da ação do agente químico (**HONER, 1992**). Por isso é de fundamental importância que a superfície seja adequadamente enxaguada antes da utilização do sanitizante.

A sexta etapa consiste na passagem da solução de sanitizante na temperatura ambiente. Esta etapa do processo de higienização tem por objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos e a redução do número de microrganismos deterioradores até níveis considerados seguros (**ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; REED, 1992**).

Por fim há o enxágue com a passagem de água a temperatura ambiente visando retirar resíduos do sanitizante dos equipamentos antes de reiniciar a produção. Por haver desgaste nas partes de borracha de válvulas e bombas, nem sempre é realizada a etapa ácida do CIP, realizando-se apenas a etapa com a solução alcalina. No entanto o CIP é dito completo quando há a realização da etapa ácida.

É importante destacar que mesmo com o sistema CIP implantado na indústria, algumas partes do sistema devem ser higienizadas manualmente como estruturas presentes em tanques tais como agitadores, gaxetas, coletores de amostras, válvulas e em envasadoras como copos e pistões, correntes de movimentação e calefadores (**BARNARD; IVKOVICH; CAULEER, 1992**).

A obtenção de rendimento satisfatório e manutenção das condições ótimas de processo provocaram o direcionamento de vários trabalhos científicos para o estudo e aplicação de técnicas de controle melhorado, que são capazes de modificar as condições operacionais de acordo com as mudanças operacionais impostas ao processo, as quais podem promover modificações na cinética de remoção dos resíduos (**GEDRAITE, 2011**).

Segundo **Seborg; Edgar; Melichamp (2003)**, a maioria dos processos industriais era conduzido de forma manual até meados dos anos 40. Apenas os mais elementares tipos de controladores eram utilizados e, conseqüentemente, muitos operadores de processo eram necessários para garantir um funcionamento seguro e eficaz da instalação industrial.

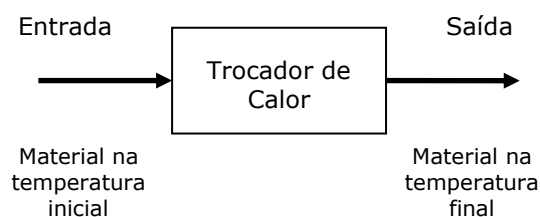
Com o crescimento dos custos de mão-de-obra e dos equipamentos, e com o consequente desenvolvimento de processos de alta capacidade e de grande desempenho nos fins dos anos 40 e início dos anos 50, tornou-se antieconômico o funcionamento de instalações industriais sem o uso de instrumentos de controle automático. Neste estágio, esquemas de controle por realimentação foram implementados, porém com poucas considerações no que diz respeito à dinâmica de processo, pois as técnicas de projeto consistiam somente em aplicações de regras baseadas na experiência.

Nos anos 60, engenheiros químicos iniciaram a aplicação de análise dinâmica e da teoria de controle automático em processos químicos. A maioria destas técnicas era adaptada de trabalhos desenvolvidos nos campos da engenharia elétrica e espacial.

Há bem pouco tempo atrás, o controle de processo era feito apenas por sistemas com realimentação simples, até porque o custo para automação de processos inviabilizava a tentativa de controles mais elaborados. A evolução da engenharia eletrônica, que tornou os componentes utilizados nos controladores e equipamentos menores e com custos mais baixos, e da engenharia de sistemas de informação, contribuiu também para a evolução e sofisticação dos sistemas de controle, inclusive incorporando-os aos demais níveis de automação e sistemas de informações das empresas.

**Garcia (2005)** define processo como “qualquer operação ou sequência de operações realizada sobre um ou mais materiais visando variar sua energia, composição, dimensão ou qualquer outra propriedade física ou química”. Assim, controlar um processo é fazer com que as grandezas físicas envolvidas neste processo interajam entre si de maneira ordenada, respeitando os limites definidos no projeto e dentro de um período determinado.

Quando se analisa o tema modelamento matemático, emprega-se o termo sistema para definir um processo ou um equipamento a ser modelado. Os sistemas são normalmente representados por diagramas de blocos que representam os elementos de controle e o processo. Cada bloco deste diagrama é descrito por uma função de transferência. A função de transferência apresenta a relação de “causa e efeito” entre as variáveis de processo envolvidas na representação matemática de um sistema. Classicamente é utilizado o esquema da **Figura 2.2**, para definir um sistema a ser modelado ou controlado (**AGUIRRE, 2013**).

**Figura 2.2** - Representação de um sistema

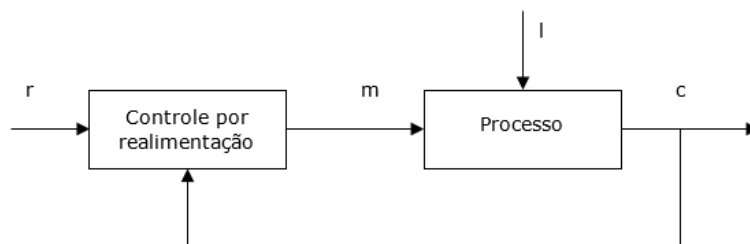
A representação apresentada na figura anterior caracteriza um sistema em malha aberta, ou seja, a entrada é previamente calculada de modo que a saída tenha o resultado esperado, porém não há nenhum tipo de realimentação que garanta que após algum distúrbio, a saída permaneça a mesma.

Os sistemas de malha fechada são mais amplamente utilizados em aplicações industriais, pois possibilitam que a saída do processo seja medida e caso haja alguma diferença entre o valor da variável controlada (valor de saída, usualmente medido) e o valor desejado – tipicamente denominado erro – esta possa ser realimentada na entrada do controlador do processo de modo que seja tomada alguma ação corretiva sobre a variável manipulada, visando reduzir a diferença. Na **Figura 2.3** tem-se um sistema típico de malha fechada de controle por realimentação.

O controlador automático por realimentação é o equipamento responsável por comparar o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (*set point*), determinando o valor do desvio e produzindo um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor aceitável (**OGATA, 2000**).

Os seguintes tipos de modos de controle são comumente aplicados: “*on-off*”, proporcional, integral, proporcional e integral, proporcional e derivativo e proporcional integral e derivativo. O engenheiro normalmente é o responsável por decidir quais os tipos de modos de controle serão utilizados, considerando: *i*)- a aplicação, *ii*)- o grau de precisão que se deseja alcançar e *iii*)- as condições econômicas do projeto. Na significativa maioria dos processos industriais são utilizados os controladores *PI* (proporcional e integral) para malhas de pressão, nível e vazão e controladores *PID* (proporcional, integral e derivativo) para malhas de temperatura (**OGATA, 2000**).

**Figura 2.3 - Malha típica de controle por realimentação**



Onde: r – valor de referência (*set point*)  
 c – variável controlada  
 m – variável manipulada  
 I – variável de perturbação ou de carga

Conceitua-se modelo como sendo qualquer artifício que nos permita reproduzir a realidade física de um determinado sistema. A dimensão e a complexidade do sistema dependem do grau de detalhe com o qual se deseja realizar o estudo, podendo ir desde um trocador de calor até todas as inter-relações existentes numa unidade de processo completa. **(HANGOS; CAMERON, 2001).**

Um dos objetivos principais da simulação do funcionamento de um equipamento ou planta é conhecer melhor o mesmo, identificando gargalos de produção ou modificações cabíveis no sentido de melhorar o processo em termos energéticos, com relação à especificação de produtos finais, ou ainda, no consumo de matérias primas. Assim, por meio de ferramentas adequadas, conhecimento físico do sistema que estiver sendo analisado e principalmente bom senso, é possível criar modelos que reproduzam (simulem) o comportamento real, ao menos dentro de uma determinada faixa, de um equipamento ou mesmo de um processo inteiro.

Com base na conceituação de modelo, pode-se definir dois tipos principais, a saber *i)*- modelo físico e *ii)*- modelo matemático. O modelo físico é um modelo que reproduz o sistema fisicamente, ou seja, é uma reprodução do que já existe, ou irá existir, em escala diferente. Nesta categoria encaixam-se os protótipos e as plantas piloto. O modelo matemático é um modelo que reproduz o sistema abstratamente, ou seja, representa a realidade por meio de equações matemáticas. A ideia de modelo matemático é simples, mas, muitas vezes, a tentativa de representar por meio de equações essa ideia simples conduz a abordagem do problema a um equacionamento complexo, que torna complicado seu desenvolvimento **(SEBORG; EDGAR; MELICHAMP, 2003).**

Antes de discorrer sobre o modelamento matemático de processos, é feita uma breve introdução aos elementos básicos que, associados, representam processos industriais de forma aproximada. A grande maioria dos processos industriais pode ser representada, de forma aproximada, como uma combinação de quatro elementos básicos: *i)*- ganho; *ii)*- atraso de transporte; *iii)*- atraso de transferência e *iv)*- integrador. Na prática, não é comum a presença de integradores puros. Dessa forma pode-se, em princípio, modelar a maioria dos processos industriais através de ganho estático e dos atrasos de transporte e de transferência (**GARCIA, 2005**).

O atraso de transporte é o intervalo de tempo, relacionado com o deslocamento de massa ou energia de um ponto a outro do processo e durante o qual a perturbação ainda não chegou ao ponto observado. Também é conhecido como tempo morto, atraso puro, *dead time* ou *pure time delay*. Esse tipo de atraso ocorre quando há um fenômeno de transporte de material ou energia (por exemplo: distância entre o ponto de medição e o ponto onde a variável efetivamente se manifesta, malhas de reciclo ou atrasos associados com a análise da composição química de certos componentes do processo) ou há um cálculo matemático no dispositivo de controle, que ocasiona um atraso na resposta. Aparece em quase todos os processos e raramente sozinho. É inerente ao sistema (**AGUIRRE, 2013**).

As partes do processo que têm a propriedade de armazenar energia ou material são chamadas de capacitâncias. Elas se comportam como se fossem um “acumulador” entre a entrada e a saída do processo e podem se apresentar em uma das seguintes formas: *i)*- inércias, nos sistemas mecânicos; *ii)*- capacitâncias, nos sistemas elétricos; *iii)*- capacitâncias (tanques), nos sistemas fluídicos; e *iv)*- capacitâncias térmicas, nos sistemas térmicos (**GARCIA, 2005**).

Por outro lado, as partes do processo que resistem à transferência de energia ou material são chamadas de resistências. Estas podem se apresentar em uma das seguintes formas: *i)*- atritos, nos sistemas mecânicos; *ii)*- resistências, nos sistemas elétricos; *iii)*- perdas de carga (distribuídas ou concentradas), nos sistemas fluídicos; e *iv)*- resistências térmicas, nos sistemas térmicos (**GARCIA, 2005**).

O efeito combinado das propriedades de resistência e capacitância resulta no atraso de transferência do processo que, em termos práticos, corresponde a um atraso na resposta de uma saída (variável) do processo com relação a uma entrada. Numericamente, é a constante de tempo

( $\tau$ ) que caracteriza um atraso de transferência de um processo. Esta constante pode ser obtida multiplicando-se (em unidades coerentes) o valor da capacitância pelo valor da resistência **(AGUIRRE, 2013)**.

Os modelos matemáticos dividem-se em dois grandes grupos, a saber: *i*)-modelos a parâmetros concentrados e *ii*)- modelos a parâmetros distribuídos. Os modelos a parâmetros concentrados são aqueles nos quais a distribuição espacial não importa. Por exemplo, um reator de mistura perfeita é um sistema a parâmetros concentrados. Não importa em que posição se mede a concentração dos reagentes, pois essa concentração é a mesma para todo o reator. Os modelos a parâmetros distribuídos são aqueles, nos quais a distribuição espacial é importante. Por exemplo, uma coluna de absorção, na qual a concentração muda ponto a ponto (de uma forma contínua), ou uma coluna de destilação, na qual a concentração muda prato a prato **(SEBORG; EDGAR; MELICHAMP, 2003)**.

As equações utilizadas na elaboração de modelos matemáticos podem ser classificadas em: Equações de Transporte, Equações de Balanços, Equações da Termodinâmica, Equações Cinéticas e Equações Empíricas.

O conhecimento do comportamento dinâmico de um processo é muito útil para selecionar o tipo de controlador e seus ajustes mais adequados. Esse conhecimento normalmente deve ser traduzido na forma de um modelo do processo, que é o primeiro passo na análise de um sistema de controle. Uma vez obtido tal modelo, existem vários métodos disponíveis para a análise do desempenho do sistema.

Há diversos modos de se obter o modelo matemático de um processo. Modelos teóricos baseados na Química e na Física do sistema representam uma alternativa. Detalhes sobre esta forma de se obter modelos, intitulada modelamento fenomenológico, podem ser encontrados na literatura **(GARCIA, 2005)**. No entanto, o desenvolvimento de modelos teóricos rigorosos pode não ser prático para processos complexos, se o modelo requer um grande número de equações diferenciais com um número significativo de parâmetros desconhecidos (por exemplo, propriedades físicas e químicas). Uma abordagem alternativa é obter um modelo empírico diretamente a partir de dados experimentais, os quais são também chamados de modelos "caixa preta". A técnica para obtenção de modelos a partir de dados coletados



experimentalmente é chamada de identificação de sistemas (**SEBORG; EDGAR; MELICHAMP, 2003**).

A identificação de sistemas pode ser dividida em duas formas básicas: identificação paramétrica e identificação não-paramétrica. Trata-se de um assunto bastante extenso, sendo que maiores informações sobre ambas as técnicas podem ser encontradas em trabalhos publicados na literatura (**ÂSTRÖM; HÄGGLUND, 1995**). No entanto, a identificação não-paramétrica será abordada neste trabalho, devido a sua importância na obtenção de modelos aproximados, de baixa ordem, de processos industriais (**GEDRAITE, 2011**).

Na prática, o sinal de entrada de um sistema não é conhecido “a priori”, mas é de caráter aleatório e a entrada instantânea não pode normalmente ser expressa analiticamente. Na análise do comportamento de um sistema, deve-se ter uma base para comparar seu desempenho. Esta base pode ser obtida especificando-se certos sinais de teste de entrada e analisando a resposta do sistema a esses sinais. Os sinais de entrada de teste comumente usados em identificação de sistemas para se obter os dados a respeito do comportamento de processos e assim determinar os modelos empíricos desejados, são as funções impulso, degrau, rampa, senoidal e PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) (**AGUIRRE, 2013**).

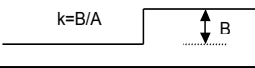
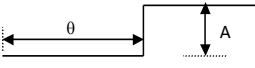
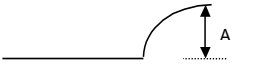
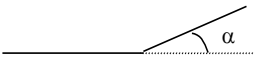
A identificação não-paramétrica emprega basicamente curvas de resposta do processo quando excitados por sinais de entrada do tipo degrau, impulso ou senoidal. A partir dessas curvas, podem-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo. Esses modelos são pouco precisos, mas podem ser suficientes para se ter uma ideia do comportamento do processo e podem ser usados para efetuar a pré-sintonia de controladores PID, ou então para entender o comportamento do processo durante situações transitórias ou ainda para analisar o desempenho de um sistema de controle agindo sobre o processo (**SEBORG; EDGAR; MELICHAMP, 2003**).

A entrada normalmente mais usada para identificar, de forma não-paramétrica, processos industriais é a excitação em degrau. Esses ensaios normalmente permitem gerar, graficamente, modelos empíricos dinâmicos representados por uma função de transferência de baixa ordem (1ª ou 2ª ordem, eventualmente incluindo um tempo morto) com, no máximo, quatro parâmetros a serem determinados experimentalmente (**OGATA, 2000**).

Åström; Hägglund (1995) e Garcia (2005) desenvolveram diversos trabalhos, publicados na literatura, nos quais combinam os quatro elementos tipicamente encontrados em processos industriais, a saber: *i)*- ganho, *ii)*- atraso de transporte, *iii)*- atraso de transferência e *iv)*- elemento integrador. No **Quadro 2.1** são apresentadas – de maneira resumida - as principais características destes elementos.

A curva de resposta de um sistema estável de ordem superior é a soma de um certo número de curvas exponenciais e curvas senoidais amortecidas. Uma característica particular de tais curvas de resposta é que pequenas oscilações são superpostas em oscilações maiores ou sobre curvas exponenciais. Componentes de decaimento rápido têm significância somente na parte inicial da resposta transitória (OGATA, 2000).

Quadro 2.1 - Quadro com os principais elementos de processo

Elemento de Processo	Equação descritiva	Função de Transferência	Resposta ao degrau de Amplitude A
GANHO	$y=k*x$	k	
ATRASO DE TRANSPORTE	$y=0; t < \theta$ $y=x; t \geq \theta$	$\exp(-\theta*s)$	
ATRASO DE TRANSFERÊNCIA	$dy/dt \tau = x - y/\tau$ Para entrada em degraus $y=A*(1-e^{-t/\tau})$	$1/(1+s*\tau)$	
INTEGRADOR	$dy/dt = x/\tau$ Para entrada em degraus $y=(A*/\tau)*t$	$1/s*\tau$	

Fonte: o autor

A aproximação de sistemas superamortecidos de segunda ordem ou de ordens superiores por meio da combinação dos elementos atraso de transferência e tempo morto é usualmente representada pela função de transferência apresentada na **Equação (2.1)** (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

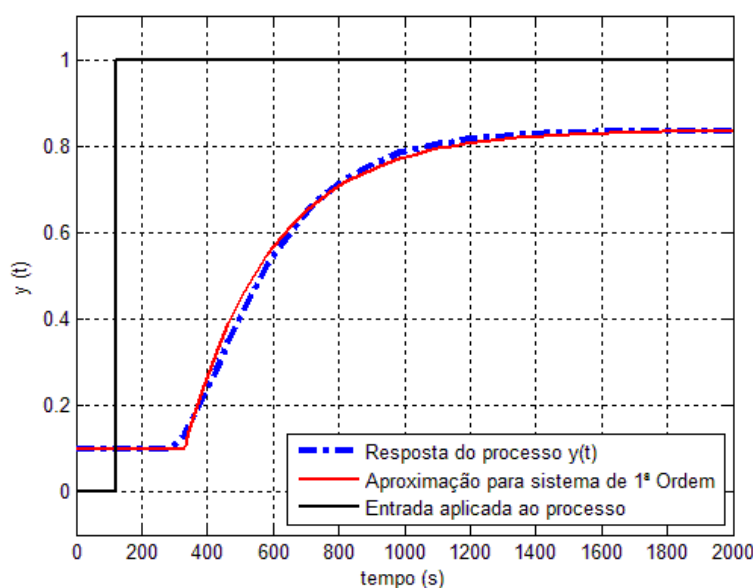
$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad (2.1)$$

O tempo morto é incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que são desprezados no processo de desenvolvimento do modelo aproximado. Na **Figura 2.4** é apresentada a curva de reação típica de processos superamortecidos de segunda ordem ou de ordens superiores, com destaque para o formato em “S” da referida curva de reação do processo.

O valor do ganho  $K$  pode ser obtido dividindo-se a amplitude da variação da saída do processo pela amplitude do degrau aplicado. Considerando-se que o degrau aplicado tenha amplitude igual a  $A$ , pode-se representar o ganho por meio da **Equação (2.2)**.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (2.2)$$

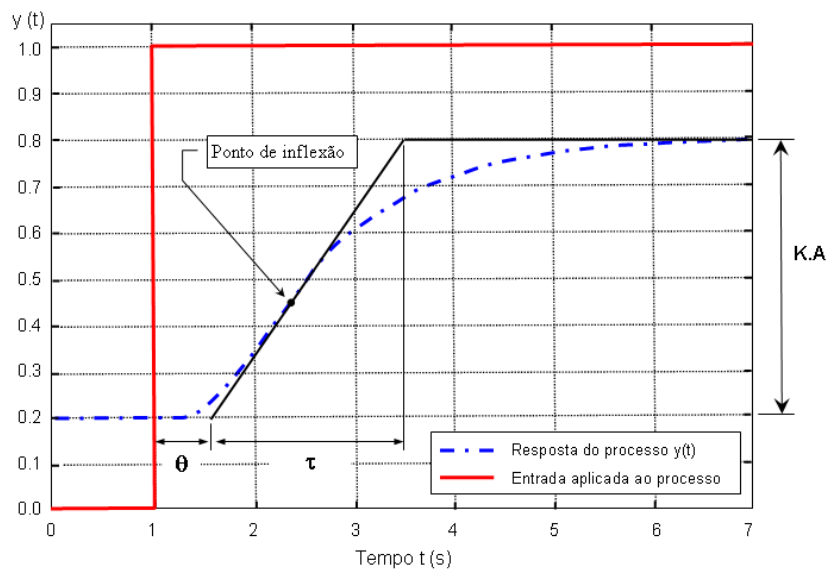
**Figura 2.4** - Reação de processo superamortecido a degrau



Existem diversos métodos de se determinar os parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto, a saber: *i)*- Método da Tangente, *ii)*- Método de Miller, *iii)*- Método de Smith e *iv)*- Método de Sundaresan e Krishnaswamy (**GARCIA, 2005**). Nesta monografia, será utilizado o **Método da Tangente**, originalmente proposto por **ZIEGLER; NICHOLS (1942)**. Neste método, deve-se traçar uma tangente através do ponto de inflexão da curva de resposta do processo. Essa tangente deve ser traçada desde o valor estacionário do processo antes de ocorrer a perturbação até o novo valor estacionário, conforme mostrado na **Figura 2.5**.

O tempo morto  $\theta$  corresponde ao tempo entre o instante de aplicação do degrau até o ponto em que a tangente traçada encontra com o valor original do regime estacionário do processo antes da perturbação em degrau, conforme mostrado na **Figura 2.5**.

**Figura 2.5** - Método da tangente para determinação dos parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo



O instante de tempo em que a tangente cruza com a linha que representa o valor estacionário da resposta após a aplicação do degrau representa a soma dos valores  $\theta$  e de  $\tau$ . A constante de tempo  $\tau$  corresponde ao intervalo de tempo entre os instantes em que a tangente traçada se encontra tanto com o valor original do regime estacionário do processo quanto com o novo valor do regime estacionário dele.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

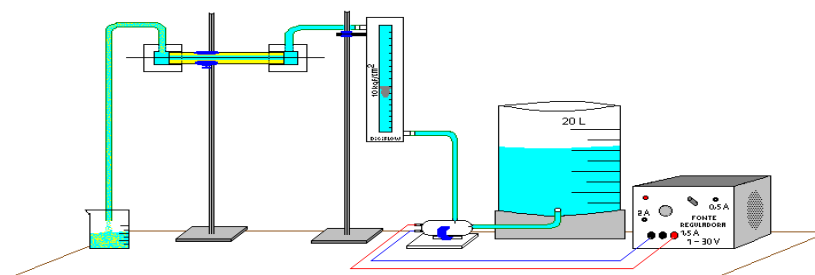
#### 3.1 Materiais Utilizados

Para realização deste trabalho foram utilizados basicamente um computador portátil de processador Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T5750 2.00GHz, o aplicativo tipo planilha eletrônica e o conjunto de resultados experimentais obtidos por **Correa (2013)**. Adicionalmente, por uma questão de disponibilidade e popularidade, optou-se pelo uso da planilha eletrônica Excel™ da Microsoft™.

#### 3.2 Metodologia Empregada

Os valores experimentais de concentração de resíduo de leite presente na solução efluente de detergente alcalino (solução de hidróxido de sódio) foram coletados por **Correa (2013)**, empregando uma facilidade experimental como a mostrada na **Figura 3.1**.

**Figura 3.1** - Facilidade experimental pesquisada



Fonte: adaptado de **Correa (2013)**

Foi considerado que o valor de velocidade de escoamento do fluido fosse igual ou superior àquela usada por **Chen et al (2004)**, ou seja, 0,2 m/s. Uma vez estabelecido o valor da velocidade de escoamento do fluido de limpeza (detergente), a próxima etapa consistiu na preparação da solução de hidróxido de sódio que foi utilizada como detergente. Esta solução de NaOH foi preparada com concentração de 0,5 % em massa (**CORREA, 2013**).

Considerando o fato de que não havia informações prévias sobre qual era o comprimento de onda no qual se verificava a maior absorção da radiação ultravioleta para o produto utilizado nos testes (solução de leite em pó), **Correa (2013)** optou em seu trabalho por proceder ao levantamento experimental deste comprimento de onda. Este procedimento consistiu na determinação da curva de absorbância em função da concentração de resíduos de leite na solução de hidróxido de sódio. Foram preparadas amostras de solução de NaOH contendo resíduos de leite nas seguintes composições: 5 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm e 100 ppm. Tomando-se por base a solução de hidróxido de sódio com 100 ppm de resíduos de leite, foi feita a análise da variação do índice de absorbância em função do comprimento de onda da radiação UV.

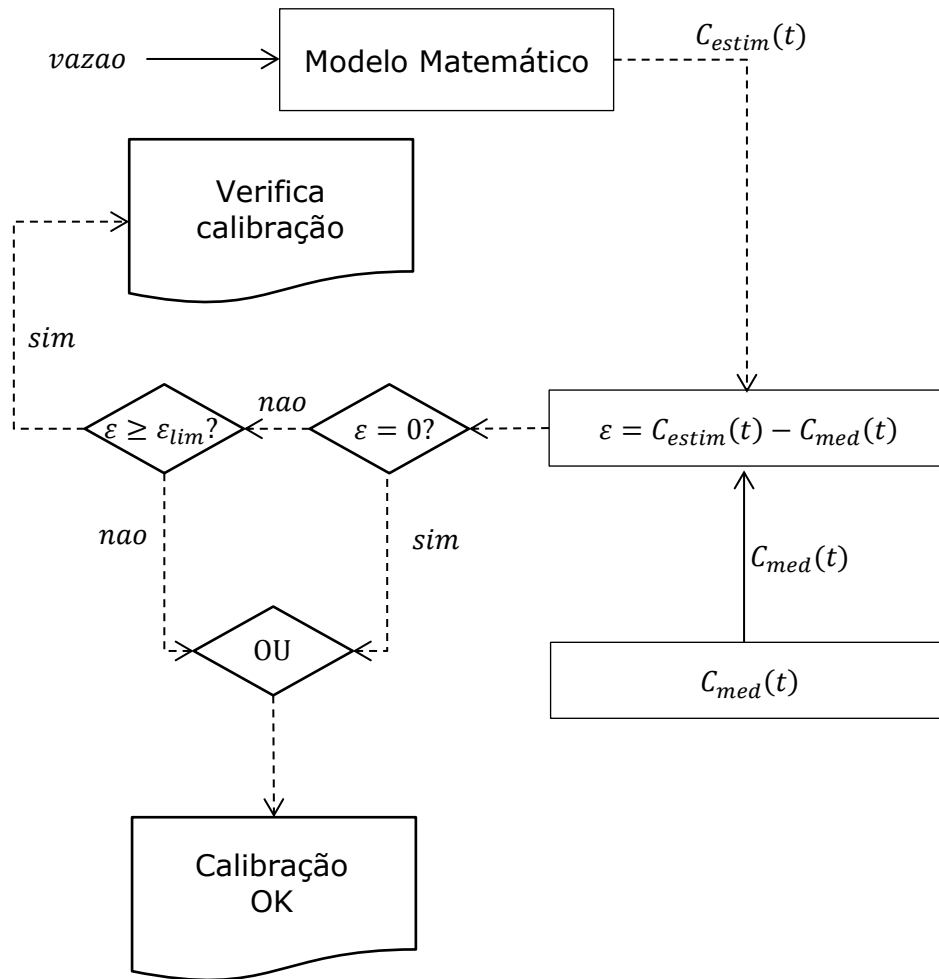
Utilizando-se as amostras anteriormente preparadas, **Correa (2013)** obteve a curva de calibração, a partir da qual foi possível a determinação do comportamento da concentração de resíduos de leite em pó na solução detergente. Uma vez obtida a curva de calibração no espectrofotômetro UV, foi possível realizar os ensaios de limpeza dos resíduos de leite aderidos à parede do tubo da seção de testes.

Os ensaios de limpeza realizados por **Correa (2013)** consistiram em fazer escoar a solução detergente através da seção de testes por um intervalo de tempo igual a 4 minutos, com velocidades de 0,2 m/s e 0,5 m/s. As amostras da solução efluente da seção de testes foram recolhidas de forma manual, com intervalo de tempo entre as coletas de amostras de 30 segundos.

Os modelos matemáticos aproximados das cinéticas de remoção dos resíduos foram identificados com base na metodologia proposta pelo método da tangente, já apresentado.

O indicador de desempenho da calibração do sensor de concentração de resíduos de leite recebe informações em tempo real do sensor, calcula a concentração instantânea do resíduo de leite presente no efluente do sistema e indica eventuais afastamentos de calibração – *in situ* – do sensor. Na **Figura 3.2** é apresentado o diagrama de blocos para representar o funcionamento do indicador de desempenho considerado neste trabalho.

**Figura 3.2** – Diagrama de blocos do indicador de desempenho



Fonte: adaptado de **Gedraite et al (2010)**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Curva de Calibração

Na **Tabela 4.1**, são apresentadas as informações obtidas por **Correa (2013)** acerca dos resultados utilizados para a construção da curva de calibração obtidos por diferentes comprimentos de onda avaliados no espectrofotômetro disponível no NUCBIO/FEQUI.

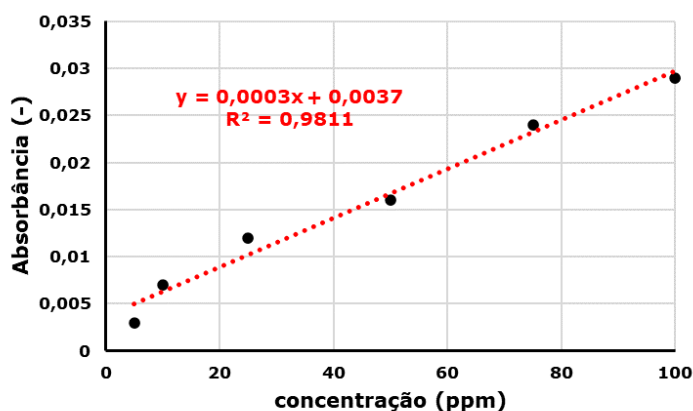
**Tabela 4.1** - Concentração versus absorvância por comprimento de onda

230 nm		280 nm		600 nm	
Conc. (ppm)	Absorb.	Conc. (ppm)	Absorb.	Conc. (ppm)	Absorb.
100	0,05	100	0,029	100	0,007
75	0,046	75	0,024	75	0,005
50	0,019	50	0,016	50	0,004
25	0,015	25	0,012	25	0,002
10	0,011	10	0,007	10	0,001
5	0,02	5	0,003	5	0

Fonte: Correa (2013)

Uma vez que os resultados ficaram melhor ajustados com o comprimento de onda de 280 nm ( $R^2 = 0,981$ ), a curva de calibração apresentada na **Figura 4.1** foi adotada para a conversão dos valores de absorvância em concentração.

**Figura 4.1** - Curva de calibração considerada



Fonte: adaptado de **Correa (2013)**

Assim, para o comprimento de onda de 280 nm, a concentração de leite em uma solução coletada no experimento pode ser calculada em função da absorvância obtida pelo espectrofotômetro, através da **Equação (4.1)**.



$$C(t)[ppm] = 3333 \cdot Absorb(t) - 12,33 \quad (4.1)$$

#### 4.2 Análise da concentração em função do tempo

Na **Tabela 4.2**, são apresentadas as informações obtidas por **Correa (2013)** acerca dos resultados relativos ao comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de hidróxido de sódio que deixa o tubo de testes com a velocidade de 0,2 m/s.

**Tabela 4.2** - Comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,2 m/s

t (s)	Amostra	Absorb.	Concentração (ppm)
0	1	0,041	124,33
30	2	0,026	74,34
60	3	0,018	47,67
90	4	0,019	51
120	5	0,014	34,34
150	6	0,0215	59,34
180	7	0,017	44,34
210	8	0,019	51
240	9	0,017	44,34

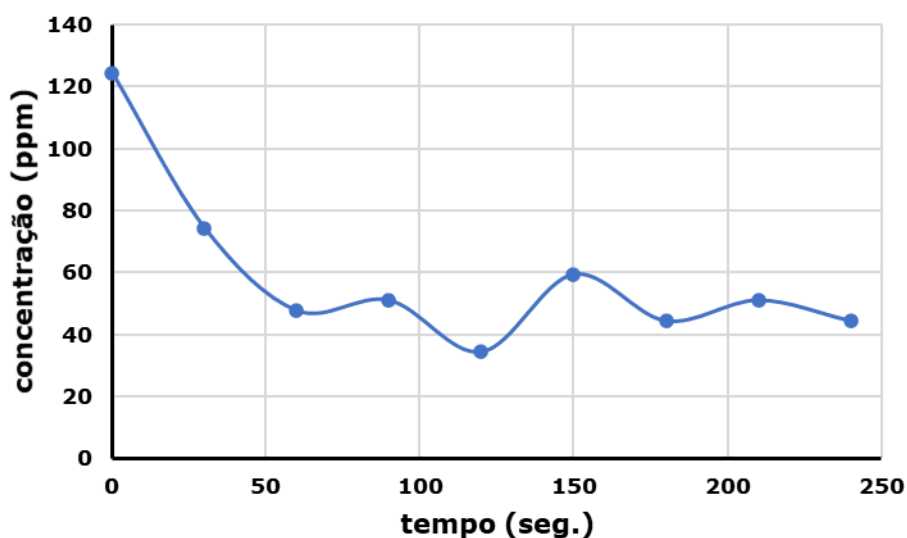
Na **Tabela 4.3**, são apresentadas as informações obtidas por **Correa (2013)** acerca dos resultados relativos ao comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de hidróxido de sódio que deixa o tubo de testes com a velocidade de 0,5 m/s.

**Tabela 4.3** - Comportamento temporal da variação da concentração de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,5 m/s

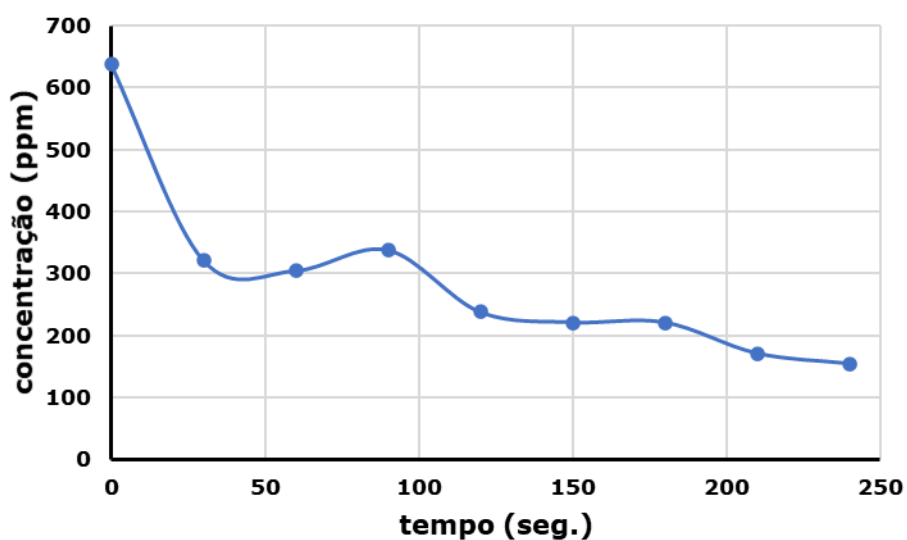
t (s)	Amostra	Absorb.	Concentração (ppm)
0	1	0,195	637,60
30	2	0,1	320,97
60	3	0,095	304,30
90	4	0,105	337,64
120	5	0,075	237,65
150	6	0,07	220,98
180	7	0,07	220,98
210	8	0,055	170,99
240	9	0,05	154,32

Com base nos valores apresentados na **Tabela 4.2** e na **Tabela 4.3** foram construídos os gráficos apresentados na **Figura 4.2** e **Figura 4.3**, respectivamente. Estas ilustram o comportamento temporal das concentrações de leite presentes na solução detergente de NaOH efluente da seção de testes estudada para cada uma das velocidades consideradas.

**Figura 4.2** - Concentração de leite na solução de NaOH para 0,2 m/s



**Figura 4.3** - Concentração de leite na solução de NaOH para 0,5 m/s



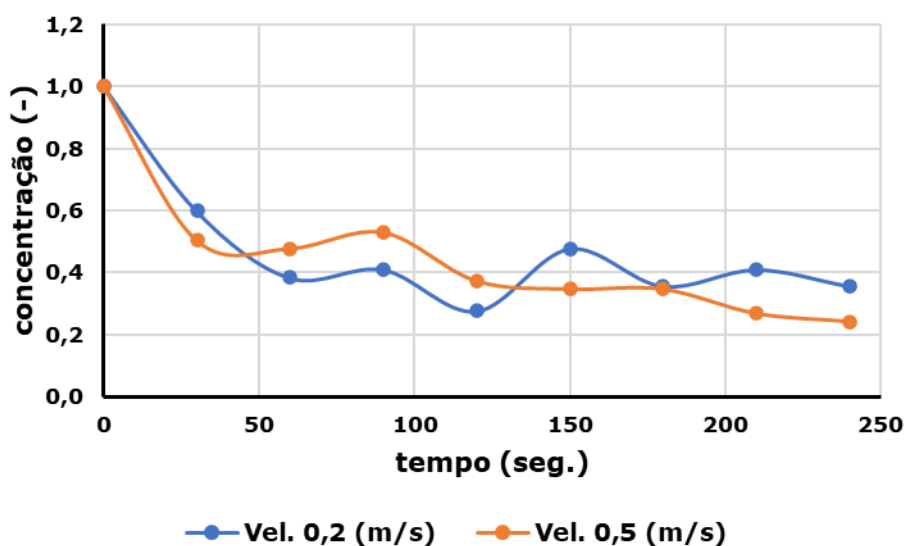
Para poder comparar o comportamento da cinética de remoção considerando os dois valores de vazão estudados, foi necessário normalizar os valores experimentais, apresentando

os mesmos na **Tabela 4.4** e na **Figura 4.4**, procedendo desta maneira eliminou-se a diferença de concentração inicial entre as amostras coletadas. Apesar do cuidado adotado por **Correa (2013)** na etapa de incrustação durante a realização dos experimentos, é praticamente impossível garantir níveis de incrustação idênticos entre diferentes corridas (**BRASILEIRO, 2021**).

**Tabela 4.4** - Variação normalizada da concentração de leite na solução de NaOH

t (seg)	Vel. 0,2 (m/s)	Vel. 0,5 (m/s)
0	1,000	1,000
30	0,598	0,503
60	0,383	0,477
90	0,410	0,530
120	0,276	0,373
150	0,477	0,347
180	0,357	0,347
210	0,410	0,268
240	0,357	0,242

**Figura 4.4** - Concentração de leite na solução de NaOH normalizada



Pode-se observar que as duas cinéticas de remoção apresentam comportamento muito próximo no que diz respeito à velocidade de decaimento da concentração nos trechos iniciais das curvas de concentração normalizada. Esta constatação permite inferir que os valores de velocidade utilizados apresentaram contribuição praticamente idêntica para a remoção dos

resíduos, não sendo possível afirmar que um dos valores de velocidade estudados foi significativamente melhor.

### 4.3 Identificação dos modelos das cinéticas de remoção

O modelo matemático aproximado identificado para a velocidade de escoamento igual a  $0,2 \text{ m/s}$  é apresentado na **Equação (4.2)** e o correspondente à velocidade de  $0,5 \text{ m/s}$  é apresentado na **Equação (4.3)**. Os modelos foram identificados por **Cortes (2021)**.

$$\frac{C(s)[-]}{v(s)\left[\frac{m}{s}\right]} = \frac{-3,217}{33 \cdot s + 1} \quad (4.2)$$

$$\frac{C(s)[-]}{v(s)\left[\frac{m}{s}\right]} = \frac{-1,516}{30 \cdot s + 1} \quad (4.3)$$

Na **Tabela 4.5**, são apresentados os resultados experimentais e os resultados simulados referentes ao modelo matemáticos aproximados, relativos ao comportamento temporal da variação da concentração normalizada de leite na solução de hidróxido de sódio que deixa o tubo de testes, com a velocidade de  $0,2 \text{ m/s}$ .

**Tabela 4.5** - Comportamento temporal experimental e simulado da variação da concentração normalizada de leite na solução de NaOH na velocidade de  $0,2 \text{ m/s}$

t (s)	Conc. Experim. (ppm)	Conc. Simul. (ppm)
0	1,000	1,000
30	0,598	0,616
60	0,383	0,461
90	0,410	0,399
120	0,276	0,374
150	0,477	0,363
180	0,357	0,359
210	0,410	0,358
240	0,357	0,357

Na **Tabela 4.6**, são apresentados os resultados experimentais e os resultados simulados referentes aos modelos matemáticos aproximados, relativos ao comportamento temporal da variação da concentração normalizada de leite na solução de hidróxido de sódio que deixa o tubo de testes, com a velocidade de  $0,5 \text{ m/s}$ .

**Tabela 4.6** - Comportamento temporal experimental e simulado da variação da concentração normalizada de leite na solução de NaOH na velocidade de 0,5 m/s

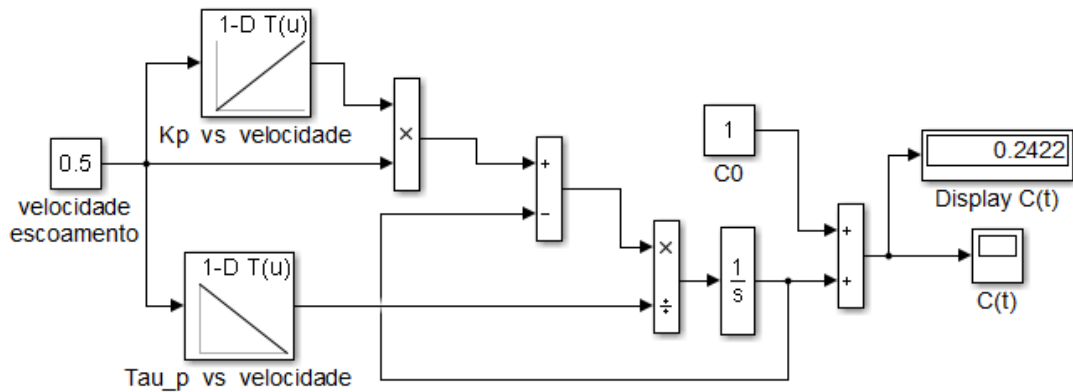
t (s)	Conc. Experim. (ppm)	Conc. Simul. (ppm)
0	1,000	1,000
30	0,503	0,521
60	0,477	0,345
90	0,530	0,280
120	0,373	0,256
150	0,347	0,247
180	0,347	0,244
210	0,268	0,243
240	0,242	0,242

#### 4.4 Implementação do indicador de desempenho

O funcionamento do indicador de desempenho está baseado na possibilidade de se utilizar qualquer uma das velocidades testadas. Para tanto, será necessário criar um algoritmo que permita escolher a velocidade de escoamento desejada e reproduzir a correspondente cinética de remoção dos resíduos.

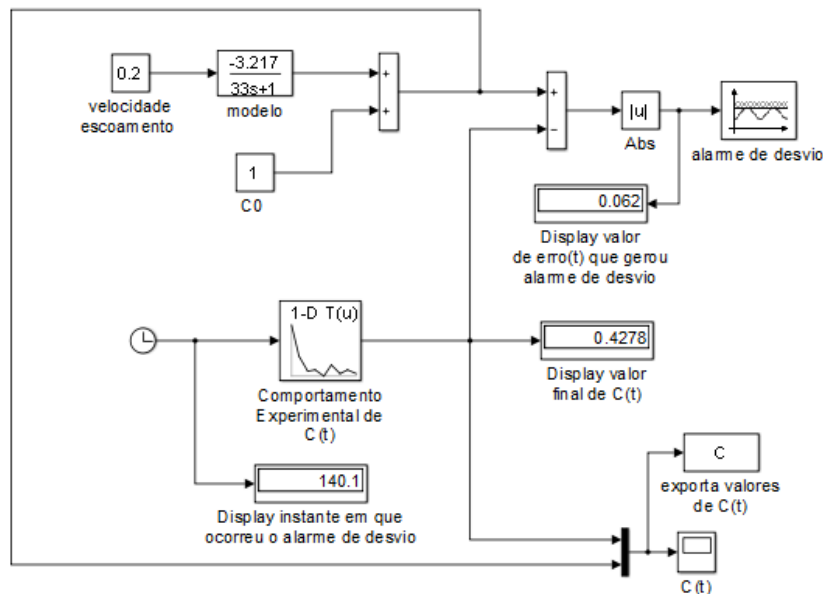
A definição do algoritmo foi feita com base na metodologia estabelecida por **Brasileiro (2021)**, utilizando o aplicativo matlab<sup>TM</sup>/simulink<sup>TM</sup>, segundo a qual os parâmetros cinéticos do modelo de remoção devem ser obtidos por interpolação entre os valores estudados. O diagrama de simulação correspondente ao processo de interpolação é apresentado na **Figura 4.5**. O diagrama de simulação correspondente ao indicador de desempenho para a velocidade de escoamento de 0,2 m/s é apresentado na **Figura 4.6**. Para efeito de teste do indicador de desempenho foi adotado o valor de desvio normalizado igual a 0,062. Esse valor foi obtido a partir da análise dos resultados dos valores experimentais disponibilizados por **Correa (2013)**, sendo o valor médio global dos desvios instantâneos calculados para ambos os valores de velocidade ensaiados.

**Figura 4.5** – Diagrama de simulação do modelo de remoção de resíduos



Fonte: adaptado de Brasileiro (2021)

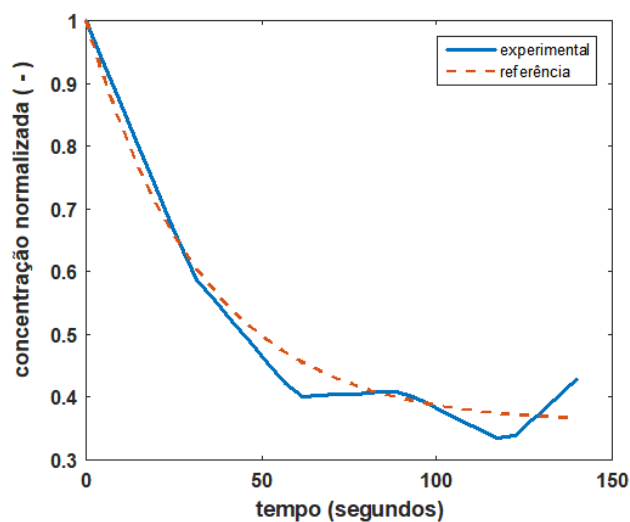
**Figura 4.6** – Diagrama de simulação do indicador de desempenho (0,2 m/s)



Fonte: autoria própria

Na **Figura 4.7** é apresentado o comportamento temporal da concentração normalizada obtida a partir dos resultados experimentais para a velocidade de escoamento igual a 0,2 m/s e da concentração normalizada adotada como comportamento de referência (modelo de referência) considerando a atuação do alarme de desvio no instante 140,1 segundos, com a parada da coleta de dados.

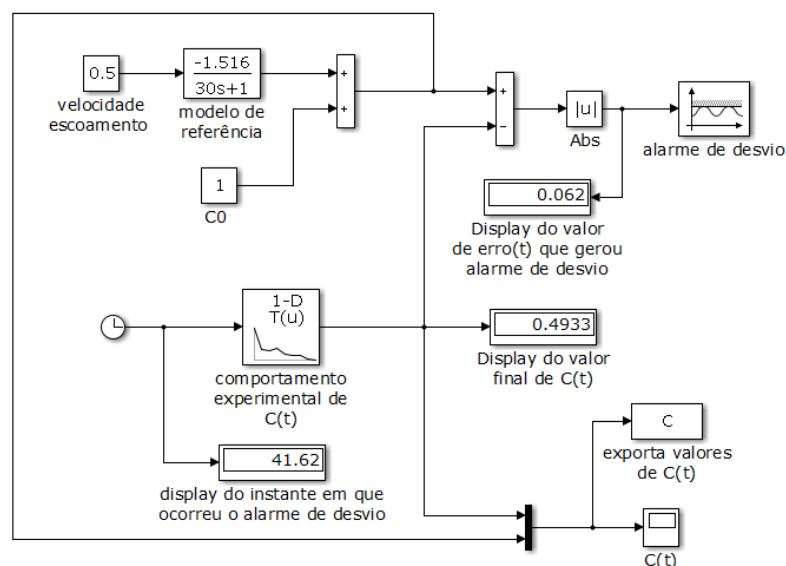
**Figura 4.7** – Comportamento temporal da concentração normalizada



Fonte: autoria própria

O diagrama de simulação correspondente ao indicador de desempenho para a velocidade de escoamento de 0,5 m/s é apresentado na **Figura 4.8**. Para efeito de teste do indicador de desempenho foi igualmente adotado o valor de desvio normalizado igual a 0,062, obtido a partir da análise dos resultados dos valores experimentais disponibilizados por **Correa (2013)**.

**Figura 4.8** – Diagrama de simulação do indicador de desempenho (0,5 m/s)

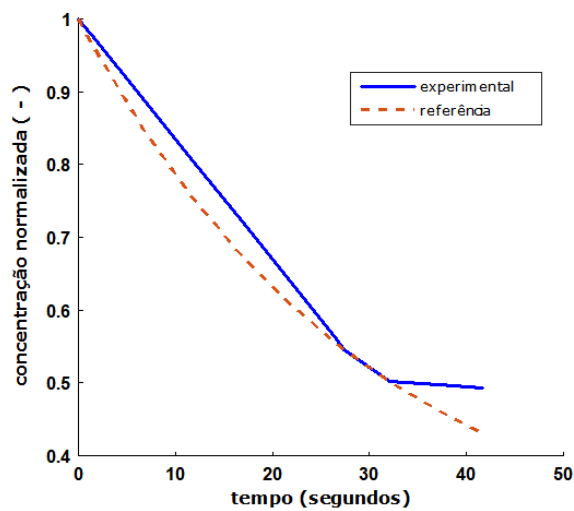


Fonte: autoria própria

Na **Figura 4.9** é apresentado o comportamento temporal da concentração normalizada obtida a partir dos resultados experimentais e aquela de referência para a velocidade de

escoamento igual a 0,5 m/s considerando a atuação do alarme de desvio no instante 41,62 segundos, com a parada da coleta de dados.

**Figura 4.9** – Comportamento temporal da concentração normalizada (0,5 m/s)



Fonte: autoria própria



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o comportamento da cinética de remoção de resíduos de leite com o emprego de solução detergente alcalina à base de hidróxido de sódio com concentração igual a 0,5% (m/m), utilizando informações disponíveis na literatura.

O emprego de valores baixos de velocidade de escoamento mostrou que o comportamento da cinética de remoção não apresentou diferenças significativas, permitindo inferir que, sob o ponto de vista estatístico, os dois processos são praticamente idênticos.

Os resultados obtidos neste trabalho se mostraram compatíveis com os publicados por pesquisadores que avaliaram o emprego de baixos valores de velocidade de escoamento. Deve ser destacado que os resultados obtidos apresentam elevada variabilidade nos valores de condutividade em decorrência da amostragem manual do processo em nosso caso, que não permitiu obter uma representação mais detalhada da cinética de remoção.

O emprego dos modelos matemáticos aproximados permitiu avaliar de maneira mais efetiva o comportamento de cada cinética de remoção de resíduos, contribuindo para estabelecer um possível indicador chave de performance a ser usado para fins de monitoração do desempenho do processo em tempo real.

Sob a ótica da economia de insumos no processo de limpeza CIP, seria mais interessante utilizar a menor velocidade de escoamento, a qual permitiria o emprego de menor volume de solução detergente alcalino em cada batelada realizada, favorecendo o seu reuso.

## REFERÊNCIAS

- 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, april 2006.
- BARNARD, S. E.; IVKOVICH, M.; CAULEER, P. **Processing procedures and sanitation practices to extend the keeping quality of fluid milk**. *Dairy, food and environmental sanitation*, v. 12, n. 2, p. 66-68, fev. 1992.
- BRASILEIRO, R.G. **Estratégia de controle de sistema CIP baseada em múltiplos modelos**. Uberlândia – MG: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2021. Mestrado.
- CHEN, X.D.; OZKANY, N.; QIN, F.; XIN, H.; LIN, L. **An effective CIP procedure for removing dairy protein based deposit – A Laboratory investigation**. *In: Watkinson P.; Muller-Steinhagen, H.; Malayeri, R (editors). ECI Conference on heat exchanger fouling and cleaning fundamentals and applications, Santa Fe, New Mexico, paper 44, 07p. 2004.*
- CORREA, L.S. **Estudo da cinética de remoção de resíduos de leite usando bancada experimental**. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2013. Relatório de Estágio.
- FORNI, R. **Projeto Mecânico de um Sistema de Higienização CIP**. São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia mecânica, 2007. Trabalho de Formatura.
- FORSYTHE, S.J.; HAYES, P.R. **Higiene de los alimentos, microbiología y HACCP**. 2. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 489 p., 2002.
- FRYER P.J.; BELMAR-BEINY M.T. **Fouling of heat exchangers in the food industry: a chemical engineering perspective**. *Trends in Food Science & Technology*, v. 2, p. 33 -37, 1991.

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, 2006.

GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; RIBEIRO, S.; MELERO Jr., V.; VASCONCELOS, F.; SISLIAN, R. (2010). **Experimental investigation about the milk protein based deposit removal kinetics.** *World congressn on communication and arts, WCCA*, Guimarães- Portugal.

GEDRAITE, R.; **Estudo da otimização de sistema de limpeza CIP visando à minimização dos gastos com insumos.** Projeto de Pesquisa - Edital CNPq 14/2011, (2011).

GORMEZANO, L. **Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular.** São Caetano do Sul, SP: CEUN-IMT, 2007. Mestrado.

HARROLD, D. **Automate CIP, track pipe status.** Control Engineering, Dez. 2000.

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

KUNIGK L. **Ação do ácido peracético sobre microrganismos contaminantes do processo cervejeiro.** São Paulo – SP: Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, 1998. Doutorado.

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.

MROZEK, H. **Detergency and disinfection.** Journal of the Society of Dairy Technology, v. 38, n. 4, p. 119-121, out. 1985.

REED, G. H. J. **The cleaning process - some definitions of terms.** Dairy, Food and Environmental Sanitation, v. 12, p. 612-613, set. 1992.