

MATEUS BASTOS MIRANDA

**ESTUDO ENVOLVENDO A CINÉTICA DE REMOÇÃO DE
RESÍDUOS EM SISTEMA INDUSTRIAL DE LIMPEZA CIP**

Uberlândia/MG

2020

MATEUS BASTOS MIRANDA

**ESTUDO ENVOLVENDO A CINÉTICA DE REMOÇÃO DE
RESÍDUOS EM SISTEMA INDUSTRIAL DE LIMPEZA CIP**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do Título de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

UBERLÂNDIA
2020

Mateus Bastos Miranda

Estudo envolvendo a cinética de remoção de resíduos em sistema industrial de limpeza CIP. Mateus Bastos Miranda – Uberlândia, MG: Faculdade de Engenharia Química / UFU, 2020

Monografia – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

1. Modelagem; 2. Sistema CIP; 3. Sensor virtual. I. Mateus Bastos Miranda
II. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química III.
Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e meus irmãos, por confiarem em mim e terem me dado o suporte necessário durante toda a graduação para que eu chegasse até aqui, redigindo esse trabalho de conclusão. Agradeço também ao meu professor, orientador e grande inspiração para mim, Rubens Gedraite, por todo seu apoio e motivação, não só na realização deste presente trabalho, como em toda a graduação. Agradeço também meus grandes e verdadeiros amigos que me ajudaram em toda a graduação. Sem eles, provavelmente eu não seria emocionalmente capaz de chegar até essa fase final do curso. São os principais deles: Gabriel Romano, Felipe Assis Martins, Gabriel Faleiro, Matheus Gaiad, Gustavo Denardi, Lucas Sá, Nicholas Rocha, Gustavo Delatin, Lucas Pegrucci, Júlio Wilson, Maria Eduarda de Melo, Thaís Viana, Vitória Marques, Isadora Alves e Rafaela Akemi. Pelo mesmo motivo do agradecimento aos meus amigos, me vejo na obrigação de agradecer também a minha cadela, Julieta, minha grande companheira dos últimos anos. Agradeço também à “República Rei de Copos”, por me receber e se tornar verdadeiramente parte do que eu sou hoje. Pode soar estranho um agradecimento a um animal e uma casa, mas sem a existência deles dificilmente eu chegaria até aqui. Por fim, gostaria de agradecer a minha namorada, a cineasta Maria Laura Rocha Moreira, pelo suporte emocional incrível que ela me deu para que eu conseguisse concluir esse trabalho. Muito obrigado a todos.

RESUMO

Esta monografia tem como objetivo estudar a cinética do processo de limpeza CIP em uma instalação industrial típica, buscando entender a cinética do processo, bem como estimar economias que podem ser obtidas no procedimento. O processo estudado foi uma instalação industrial de processamento de proteína de soja. Os modelos matemáticos foram obtidos com base em resultados experimentais coletados na planta industrial estudada. Para a simulação e validação do modelo proposto foi utilizada planilha eletrônica tradicional. Os resultados obtidos sugerem que o modelo matemático aproximado identificado apresenta desempenho satisfatório e pode ser utilizado como base para o estudo de desempenho do sistema de limpeza CIP, além de, com tais resultados, ser possível estimar a economia de água e de solução alcalina nas etapas analisadas.

Palavras-chave: modelamento matemático, cinética do processo, sistema CIP.

ABSTRACT

This monograph aims to study the kinetics of the CIP cleaning process in a typical industrial facility, aiming to understand the process kinetics as well as to estimate savings that can be obtained in the process. The process studied was an industrial soy protein processing facility. The mathematical models were obtained based on experimental results collected in the studied industrial plant. For the simulation and validation of the proposed model, a traditional spreadsheet was used. The results obtained suggest that the approximate mathematical model identified presents satisfactory performance and can be used as a basis for the study of the performance of the CIP cleaning system, and with these results it is possible to estimate the water and alkaline solution savings in the steps analyzed.

Key words: mathematical modeling, process kinetics, CIP system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Círculo de Sinner.....	10
Figura 2.2 –	Diagrama ilustrando o caminho a seguir para a eficácia do CIP.....	11
Figura 4.1 –	Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem – Tanque de Coagulação 2.....	16
Figura 4.2 –	Comportamento da condutividade na etapa de limpeza alcalina – Tanque de Coagulação 2.....	18
Figura 4.3 –	Comportamento da condutividade na etapa de enxágue – Tanque de Coagulação 2.....	19
Figura 4.4 –	Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem – Tubulação de Polpa.....	21
Figura 4.5 –	Comportamento da condutividade na etapa de limpeza alcalina– Tubulação de Polpa.....	22
Figura 4.6 –	Comportamento da condutividade na etapa de enxágue – Tubulação de Polpa.....	23
Figura 4.7 –	Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem – Tanque de Polpa.....	25
Figura 4.8 –	Comportamento da condutividade na etapa de limpeza alcalina – Tanque de Polpa.....	26
Figura 4.9 –	Comportamento da condutividade na etapa de enxágue – Tanque de Polpa	27
Figura 4.10 –	Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem – Centrífuga.....	28
Figura 4.11 –	Comportamento da condutividade na etapa de limpeza alcalina – Centrífuga.....	29
Figura 4.12 –	Comportamento da condutividade na etapa de enxágue – Centrífuga.....	31
Figura 4.13 –	Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem – Tanque de Expansão.....	32
Figura 4.14 –	Comportamento da condutividade na 1ª etapa de limpeza alcalina –Tanque de Expansão.....	33
Figura 4.15 –	Comportamento da condutividade na 2ª etapa de limpeza alcalina –Tanque de Expansão.....	35
Figura 4.16 –	Comportamento da condutividade na etapa enxágue – Tanque de Expansão.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 –	Etapa de pré-lavagem (Tanque de Coagulação 2).....	16
Tabela 4.2 –	Etapa de limpeza alcalina (Tanque de Coagulação 2).....	18
Tabela 4.3 –	Etapa de enxágue (Tanque de Coagulação 2).....	19
Tabela 4.4 –	Etapa de pré-lavagem (Tubulação de Polpa).....	20
Tabela 4.5 –	Etapa de limpeza Etapa de pré-lavagem (Tanque de Coagulação 2) alcalina (Tubulação de Polpa).....	22
Tabela 4.6 –	Etapa de enxágue (Tubulação de Polpa).....	23
Tabela 4.7 –	Etapa de pré-lavagem (Tanque de Polpa).....	24
Tabela 4.8 –	Etapa de limpeza alcalina (Tanque de Polpa).....	25
Tabela 4.9 –	Etapa de enxágue (Tanque de Polpa).....	27
Tabela 4.10 –	Etapa de pré-lavagem (Centrífuga).....	28
Tabela 4.11 –	Etapa de limpeza alcalina (Centrífuga).....	29
Tabela 4.12 –	Etapa de enxágue (Centrífuga).....	30
Tabela 4.13 –	Etapa de pré-lavagem (Tanque de Expansão).....	32
Tabela 4.14 –	1ª etapa de limpeza alcalina (antes da raspagem) (Tanque de Expansão).....	33
Tabela 4.15 –	1ª etapa de limpeza alcalina (depois da raspagem) (Tanque de Expansão).....	34
Tabela 4.16 –	Etapa de enxágue (Tanque de Expansão).....	35
Tabela 5.1 –	Economias para o Tanque de Coagulação 2.....	37
Tabela 5.2 –	Economias para a Tubulação de Polpa.....	38
Tabela 5.3 –	Economias para o Tanque de Polpa.....	38
Tabela 5.4 –	Economias para a Centrífuga.....	38
Tabela 5.5 –	Economias para o Tanque de Expansão.....	38
Tabela 5.6 –	Economias totais para o processo CIP.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	07
1.1 Justificativa para a realização do Trabalho	07
1.2 Objetivos.....	09
1.3 Conteúdo e estrutura	09
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA & FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
3. MATERIAIS & MÉTODOS.....	15
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	16
5. CÁLCULO DA ECONOMIA DE ÁGUA & SOLUÇÃO ALCALINA	38
6. CONCLUSÕES & RECOMENDAÇÕES.....	41
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa para a realização do trabalho

O consumo de produtos alimentícios industrializados vem crescendo sistematicamente nos últimos anos. Neste cenário, uma das maiores preocupações da indústria alimentícia sempre foi a preservação da qualidade de seus produtos após sua fabricação. Atualmente são usadas várias técnicas de preservação que inibem ou eliminam as transformações químicas, bioquímicas e biológicas indesejáveis nos mesmos (**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.

A quantidade de água gasta nos processos de limpeza, em especial nos processos 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 aos critérios estabelecidos 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 (**GEDRAITE et al., 2013**).

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 (**CARLOTTI, 2008**).

O processo escolhido para este estudo é caracterizado por efetuar a higienização nas máquinas utilizadas sem a desmontagem dos componentes e de forma cinética, denominado sistema CIP (*Clean in Place*) (**ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999; JEURNINK & BRINKMAN, 1994**), de reconhecida eficiência na remoção de tipos de resíduos que possam resultar na proliferação de microrganismos e, por sua vez, contaminar alimentos que venham a ser processados no ciclo seguinte. Dois parâmetros envolvidos no processo CIP despertam especial interesse: vazão de escoamento e temperatura. O primeiro está relacionado com a ação cisalhante proporcionada pela água 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 para otimização de custos. Porém, se alterado de forma não criteriosa pode ocasionar a não efetividade do processo. A prática de higienização de equipamentos pela indústria de alimentos normalmente baseia-se em experiências empíricas, deixando o setor à mercê de informações provenientes dos fornecedores de detergentes e sanitizantes. Parâmetros semi-empíricos 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.

O processo industrial utilizado como base de estudo foi uma unidade de processamento de proteína de soja, composta por diversos equipamentos e que foi submetida à limpeza CIP. O nome da instalação industrial objeto de estudo não foi divulgado por motivo de não ter sido autorizado pela empresa.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi estimar a economia de água e de solução alcalina, utilizando os modelos semi-empíricos encontrados, em um sistema CIP estudado em

suas diversas fases, utilizando informações coletas diretamente de uma instalação industrial.

1.3. Conteúdo e estrutura

Com o intuito de se alcançar o objetivo proposto no trabalho, esta monografia apresenta a seguinte estrutura:

No **Capítulo 1** é apresentada a justificativa que motivou a realização deste trabalho, os objetivos e o conteúdo da monografia.

No **Capítulo 2** são apresentadas a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica sobre o tema desenvolvido nesta monografia.

No **Capítulo 3** são apresentados os métodos e materiais utilizados para o desenvolvimento desta monografia.

No **Capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos com o modelo proposto.

No **Capítulo 5** é feita uma análise dos resultados obtidos.

No **Capítulo 6** são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA & FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A limpeza é um processo complexo baseado em princípios químicos e físicos. A principal tarefa da limpeza é separar a sujeira da superfície. As sujidades são ligadas à superfície por uma combinação de três efeitos físicos: forças de van der Waal, efeitos eletrostáticos e adesão mecânica. A soma destes efeitos pode ser denominada como aderência da sujeira. Esta aderência deve ser vencida com a ação de forças contrárias à adesão. Essas forças podem ser resumidas em quatro parâmetros básicos de qualquer processo de limpeza: energia mecânica ou cinética, energia química (atividade química), temperatura ou energia térmica e o tempo de contato das soluções de limpeza com as superfícies a serem higienizadas.

Estes quatro parâmetros são interconectados e dependem um do outro, o que significa que se qualquer um deles for alterado, os outros três precisam ser adaptados de modo a obter o mesmo resultado. Todos os parâmetros são necessários, se apenas um deles for omitido, não ocorre limpeza. Eles geralmente são agrupados em um diagrama chamado círculo de Sinner. Como se observa na Figura 2.1, incluem-se vazão, temperatura, concentração e tempo (VAN ASSELT et al., 2002; SEIBERLING, 2007; SANTOS, 2010; HOLAH, 2014; WERNE, 2016; PAK, 2016).

A operação eficaz do CIP depende não só de um projeto bem executado, mas, também dos parâmetros aplicados adequadamente, sendo os principais aqueles reunidos no círculo de Sinner.

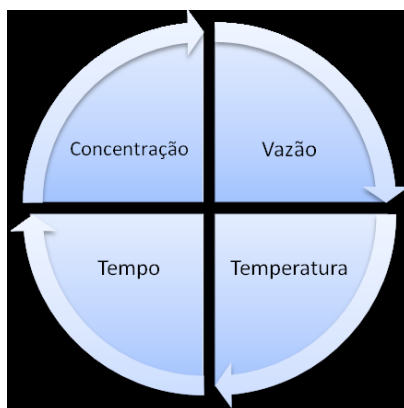


Figura 2.1: Círculo de Sinner

Na Figura 2.2 é apresentado um diagrama simplificado de como alcançar um processo CIP eficaz. Definidos o projeto e os parâmetros, é necessário treinar todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente, tais como: equipe de manutenção, operadores, líderes, engenheiros, etc. Observar e registrar o CIP em operação é muito importante, pois pode-se obter informações valiosas sobre a forma de otimizar o sistema e, além disso, é uma forma de detectar uma possível ineficácia, investigá-la e corrigi-la.

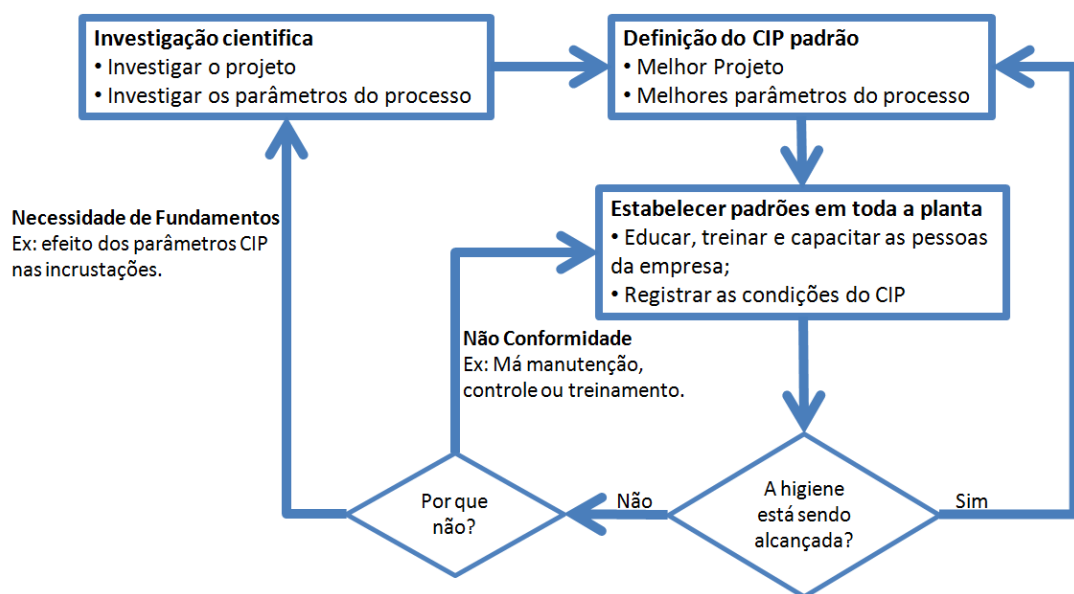


Figura 2.2: Diagrama ilustrando o caminho a seguir para eficácia do CIP

Embora o diagrama da Figura 2.2 apresente um bom direcionamento, normalmente é muito difícil determinar se uma boa higienização está sendo alcançada. Os procedimentos CIP foram empiricamente desenvolvidos devido à complexidade e dificuldade de compreender os fenômenos que ocorrem. Se os principais parâmetros de limpeza forem identificados, ainda é difícil prever a cinética de limpeza, por isso, a melhor eficácia continua a ter que ser comprovada. De fato, as interações entre os parâmetros são numerosas, complexas e longe de serem bem conhecidas (LELIÈVRE et al., 2002).

A representação do comportamento do processo por meio de modelo(s) matemático(s) é muito utilizado no presente, quer seja como ferramenta de

projeto do processo quer seja como ferramenta de análise do processo (**GARCIA, 2005**).

A identificação não-paramétrica emprega basicamente as 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 (**SEBORG et al., 2011**). Neste trabalho, estes modelos foram utilizados para representar o comportamento dinâmico da condutividade em função do tempo, tendo-se optado por ajustar um modelo de 1ª ordem com atraso de transporte. Eles empregam parâmetros típicos de funções de transferência, a saber: ganho (K_p), atraso de transferência (τ_p) e atraso de transporte ou tempo morto (θ_p). A Equação (1) apresenta a função de transferência do modelo simplificado em estudo.

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

Existem diversos métodos para se determinar os parâmetros do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto, a saber: (i)- Método da Tangente, (ii)- Método de **Miller (1967)**, (iii)- Método de **Smith (1972)** e (iv)- Método de **Sundaresan e Krishnaswamy (1978)**. Neste trabalho foi utilizado o Método da tangente, por sua simplicidade no ajuste dos modelos (**GEDRAITE et al., 2010**).

O modelo da planta em estudo foi desenvolvido de maneira a representar o comportamento temporal da condutividade elétrica do efluente do sistema CIP. Os valores dos parâmetros K_p , τ_p e θ_p foram obtidos por interpolação, para cada equipamento e vazão estudada, a partir dos resultados experimentais obtidos.

Com base nos resultados experimentais obtidos, foram propostos modelos matemáticos aproximados do tipo *FOPDT* ("First Order Plus Dead Time") para representar o comportamento dinâmico das cinéticas de remoção de resíduos em função das vazões consideradas na etapa de enxágue, cujos parâmetros identificados são apresentados na sequência do presente trabalho.

O tema vem sendo estudado há algum tempo no âmbito do curso de graduação em Engenharia Química da UFU, tendo iniciado com o trabalho

investigativo desenvolvido por **Santos et al. (2011)** que abordou o entendimento e interpretação da curva de reação do processo como fonte de informação para o desenvolvimento do modelo matemático. Ainda neste mesmo ano, **Reis et al. (2011)** estudaram o ajuste de modelo matemático do tipo FOPDT para representar a cinética de remoção de resíduos em sistemas CIP. **Gedraite et al. (2011)** ampliaram o escopo do estudo, abrangendo o emprego de modelos FOPDT para diversas condições de operação do sistema CIP.

Os estudos no assunto foram ampliados, abrangendo o estudo da remoção de película proteica de leite em superfície de aço inox 316 pela ação de solução de hidróxido de sódio (**COUTINHO Filho et al., 2012**). Ainda neste ano, **Silva et al. (2012)** aplicaram a modelagem neuro-fuzzy da cinética de remoção de resíduos de detergente em sistemas de limpeza CIP, tendo obtido na simulação resultados muito próximos do comportamento experimental. **Reis et al. (2012)** estudaram a cinética da remoção de resíduos na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP visando a minimização e gastos com insumos, realizando o ajuste de modelos aos resultados experimentais relacionados à variação de pH com a vazão. **Pires et al. (2012)** estudaram a aplicação do sistema CIP a um trocador de calor do tipo casco e tubos, enfocando a determinação das propriedades de transporte de calor e a sua influência sobre o processo. **Oliveira et al. (2012)** estudaram o desenvolvimento de modelo semiempírico do tipo FOPDT para avaliação da quantidade de insumos gastos em um sistema CIP empregado na limpeza de um sistema de pasteurização de leite de uma instalação industrial localizada em Uberlândia/MG.

Melero Junior et al. (2013) investigaram experimentalmente o consumo de água na etapa de enxágue de sistema CIP, em protótipo de trocador de calor do tipo casco e tubos. **Sislian et al. (2013)** refinaram a aplicação de modelo neuro-fuzzy a sistemas CIP, contemplando diferentes valores de vazão de escoamento da água de enxague.

Bicalho et al. (2013) estudaram a sintonia dos parâmetros de controle de controlador de temperatura usado em protótipo de trocador de calor feixe

tubular usado para avaliar o funcionamento da etapa de remoção de resíduos de detergente com água de enxágue.

Tanner et al. (2014) estudaram cinética de remoção de depósitos proteicos da superfície de aço inox 304 por solução de hidróxido de sódio em processo CIP, com ênfase na descrição difusivo-reacional do mecanismo.

Bicalho et al. (2014) utilizaram os modelos do tipo FOPDT como ferramentas de análise do processo, estudando a influência de variações aleatórias no valor da vazão de água de enxágue sobre o comportamento do pH de saída do equipamento.

Vieira et al. (2015) estudaram o processo de remoção de depósitos proteicos de proteína de leite utilizando um tanque agitado com a finalidade de estudar a remoção dos resíduos das paredes de tanques.

Alvares et al. (2015) estudaram o processo de remoção de resíduos de detergente alcalino na etapa de enxágue utilizando um protótipo de trocador de calor de placas utilizando modelos do tipo FOPDT.

Rocha et al. (2016) utilizaram algoritmo de evolução diferencial para realizar o ajuste dos parâmetros de modelo semiempírico identificado do tipo FOPDT aplicado a trocador de calor de placas.

Sousa et al. (2017) estudaram os parâmetros de sintonia de sistema de controle de vazão de água de enxágue com *set-point* variável sobre a cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em trocador de calor feixe tubular.

Silva et al. (2018) estudaram o emprego de vazão pulsada de água de enxágue sobre a cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em trocador de calor feixe tubular.

3. MATERIAIS & MÉTODOS

A análise do comportamento da cinética de remoção dos resíduos de detergente foi conduzida com base no procedimento operacional praticado na EMPRESA e na estratégia de controle configurada na base de dados do sistema de automação do processo.

A coleta das amostras foi realizada de maneira manual, na saída da tubulação principal de descarte dos produtos utilizados na limpeza CIP do equipamento do processo.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório de análise química da empresa, o qual ficou responsável por medir o valor das variáveis de processo de interesse, a saber: vazão e condutividade. O teor de proteína remanescente nas amostras coletadas não foi medido devido à falta de disponibilidade de reagente para a sua determinação.

4. RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro equipamento analisado foi o **Tanque de Coagulação 2**, cujo CIP teve duração de: (i)- 10 minutos na etapa de pré-lavagem; (ii)- 20 minutos na etapa de limpeza cáustica e (iii)- 10 minutos na etapa de enxágue. Foram coletadas manualmente entre 05 e 06 amostras do efluente do sistema em cada etapa de limpeza CIP estudada, as quais foram utilizadas para o levantamento da cinética do processo em análise. Os resultados dos experimentos e as respectivas equações dos modelos matemáticos semiempíricos identificados são apresentados na sequência.

Etapa de pré-lavagem

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.1 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.1 - Etapa de pré-lavagem

TANQUE DE COAGULAÇÃO 2			
PRÉ-LAVAGEM			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	16	1,850	1,850
2	17	5,991	5,667
5	18	4,440	4,551
7	19	3,159	3,079
10	20	1,145	1,340

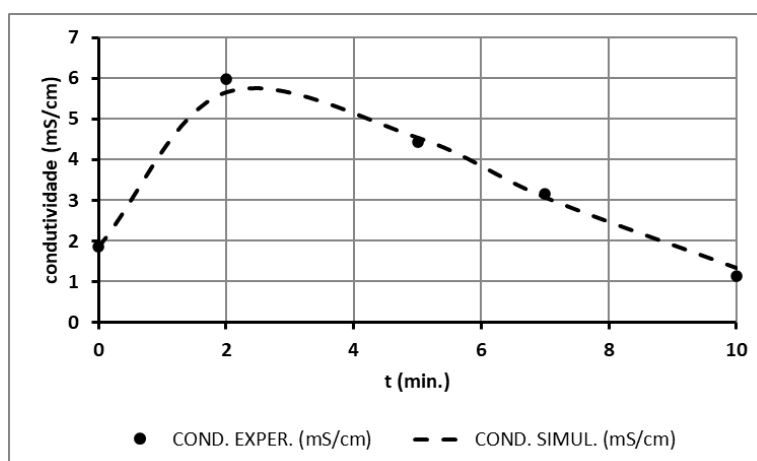


Figura 4.1 - Condutividade na etapa de pré-lavagem – Tanque de Coagulação 2

As equações do modelo para esta etapa são as seguintes:

Para: $t \leq 2$ minutos

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) \quad (2)$$

Para: $2 \text{ minutos} \leq t \leq 6 \text{ minutos}$

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) - (Kp1 * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{(t-teta_p)}{\tau_{p1}}}\right)) \quad (3)$$

Para: $t \geq 6$ minutos

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) - \left(Kp1 * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{(t-teta_p)}{\tau_{p1}}}\right)\right) - (Kp2 * Vaz\tilde{a}o * \left(1 - e^{-\frac{(t-teta_{p1})}{\tau_{p2}}}\right)) \quad (4)$$

Os parâmetros Kp , $Kp1$ e $Kp2$ representam o ganho do processo; eles relacionam a variação da condutividade em resposta à variação na vazão do processo.

Os parâmetros τ_p , τ_{p1} e τ_{p2} representam o tempo característico de resposta do processo (constante de tempo); eles estão relacionados com a variação temporal da condutividade em resposta à variação na vazão do processo.

Os parâmetros $teta_p$ e $teta_{p1}$ representam o tempo morto da resposta do processo; eles estão relacionados com a demora no início da variação temporal da condutividade em resposta à variação na vazão do processo.

A vazão de água utilizada na etapa de pré-lavagem foi igual a $7 \text{ m}^3/h$. Os valores dos parâmetros dos modelos são apresentados na Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Valores dos parâmetros dos modelos

$Kp =$ 0,56 mS·h/cm·m ³	$Kp1 =$ 0,2 mS·h/cm·m ³	$Kp2 =$ 1,1 mS·h/cm·m ³
$\tau_p =$ 0,55 min.	$\tau_{p1} =$ 30 min.	$\tau_{p2} =$ 10 min.
	$teta_{p1} =$ 10 min.	$teta_{p2} =$ 5 min.

A condutividade aumenta gradativamente no início do processo, muito provavelmente em função da água de enxágue ainda remanescente do CIP anterior. Na sequência ela decresce gradativamente conforme constatado experimentalmente e representado pelos modelos anteriormente identificados.

Etapa de limpeza alcalina

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.2 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.2 - Etapa de limpeza alcalina

TANQUE DE COAGULAÇÃO 2			
LIMPEZA ALCALINA			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	21	1,776	1,776
2	22	50,660	49,470
5	23	60,960	59,664
10	24	59,860	60,562
15	24A	62,310	60,576
20	25	63,5	60,576

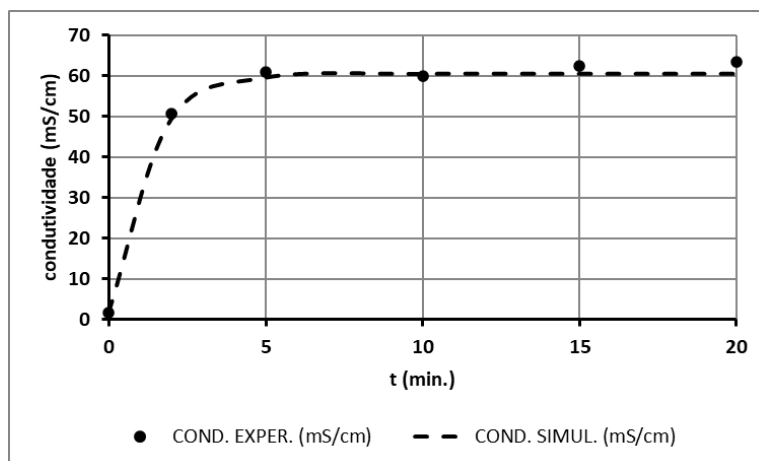


Figura 4.2 - Condutividade na etapa de limpeza alcalina - Tanque de Coagulação 2

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (5)$$

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a $7 \text{ m}^3/\text{h}$.

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada após decorridos aproximadamente 6 min. (5 vezes o valor da

constante de tempo do processo). Os valores dos parâmetros dos modelos são apresentados na Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 8,4 \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau p = 1,2 \text{ min.}$$

Etapa de enxágue

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.3 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.3 - Etapa de enxágue

TANQUE DE COAGULAÇÃO 2			
ENXÁGUE			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	26	45,230	45,230
5	27	3,215	4,750
10	28	1,473	1,427
15	29	0,729	1,154
20	30	0,289	1,132

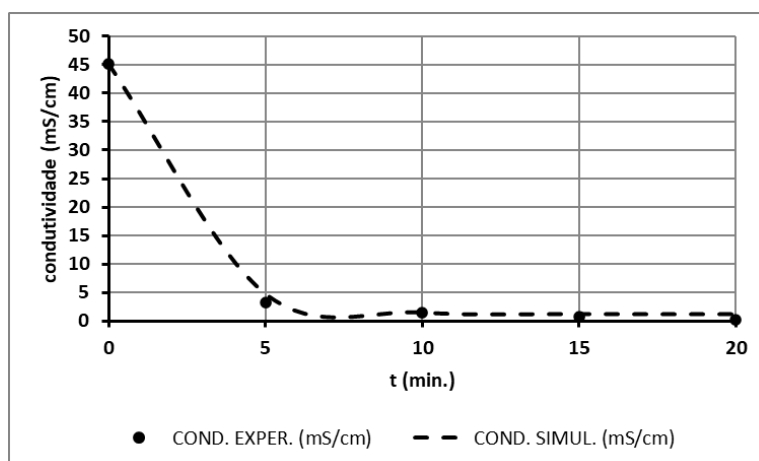


Figura 4.3: Condutividade na etapa de enxágue - Tanque de Coagulação 2

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}) \quad (6)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Valores dos parâmetros do modelo

$Kp =$	6,3	mS·h/cm·m ³
$\tau p =$	2	min.

A vazão de água utilizada na etapa de enxágue foi igual a 7 m³/h.

A condutividade da água de enxágue diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo).

O segundo “equipamento” analisado foi a **tubulação de polpa**, cujo CIP teve duração de: (i)- 20 minutos na etapa de pré-lavagem; (ii)- 55 minutos na etapa de limpeza cáustica e (iii)- 20 minutos na etapa de enxágue. Foram coletadas manualmente entre 05 e 06 amostras do efluente do sistema, as quais foram utilizadas para o levantamento da cinética do processo em análise. Os resultados dos experimentos e as respectivas equações dos modelos matemáticos semiempíricos identificados são apresentados na sequência.

Etapa de pré-lavagem

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.4 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.4 - Etapa de pré-lavagem

TUBULAÇÃO DE POLPA			
PRÉ-LAVAGEM			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	46	0,171	0,171
5	47	0,068	0,071
10	48	0,063	0,066
15	49	0,067	0,066
20	50	0,066	0,066

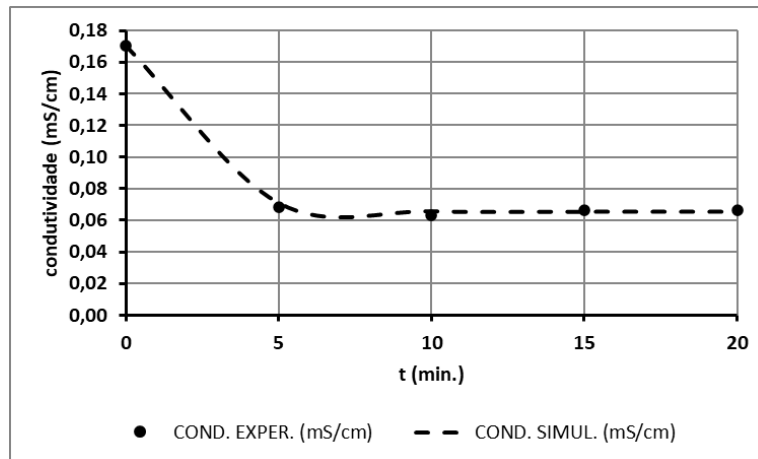


Figura 4.4 - Condutividade na etapa de pré-lavagem – Tubulação de Polpa

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}) \quad (7)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 0,004375 \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau p = 1,7 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de pré-lavagem foi igual a 24 m³/h.

A condutividade da água de pré-lavagem diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Etapa de limpeza alcalina

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.5 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.5 - Etapa de limpeza alcalina

TUBULAÇÃO DE POLPA			
LIMPEZA ALCALINA			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	51A	0,069	0,069
5	51	45,130	46,086
10	52	45,420	47,069
27	53	45,960	47,091
41	54	48,060	47,091
55	55	49,050	47,091

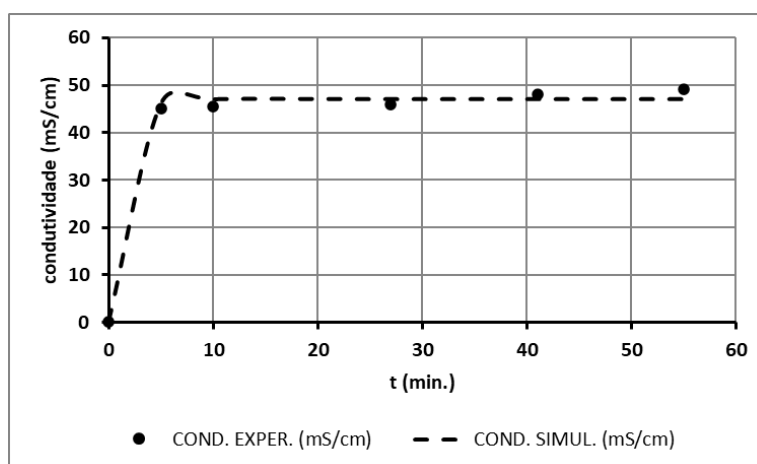


Figura 4.5- Condutividade na etapa de limpeza alcalina – Tubulação de Polpa

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (8)$$

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a 24 m³/h.

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 4.5.

Quadro 4.5 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 1,959 \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$
$$\tau p = 1,3 \text{ min.}$$

Etapa de enxágue

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.6 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.6 - Etapa de limpeza alcalina

TUBULAÇÃO DE POLPA			
ENXÁGUE			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	56	37,230	37,230
5	56A	17,190	15,992
10	57	6,687	8,180
15	58	5,850	5,305
20	59	0,080	-0,867

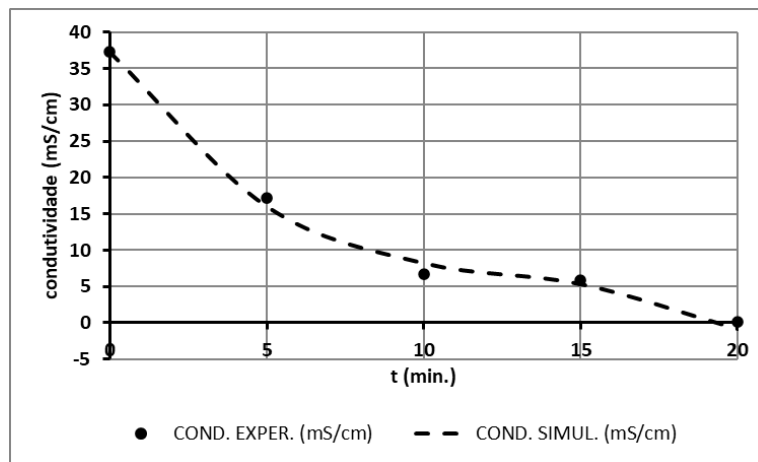


Figura 4.6: Condutividade na etapa de enxágue - Tubulação de Polpa

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul}(t) = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}\right) - Kp1 * Vazão * \left(1 - e^{-\frac{(t-tetap1)}{\tau p1}}\right) \quad (9)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 1,399 \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3 \quad Kp1 = 0,5 \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$
$$\tau p = 5 \text{ min.} \quad \tau p1 = 9 \text{ min.}$$
$$tetap1 = 15 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de enxágue foi igual a 24 m³/h..

A condutividade da água de enxágue diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, SEM ATINGIR o valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário NÃO É alcançada. A dinâmica do sistema pode ser representada por duas constantes de tempo, o que caracterizaria – em princípio – duas fases distintas no processo de enxágue.

O terceiro equipamento analisado foi o Tanque de Polpa, cujo CIP teve duração de: (i)- 10 minutos na etapa de pré-lavagem; (ii)- 10 minutos na etapa de limpeza cáustica e (iii)- 10 minutos na etapa de enxágue. Foram coletadas manualmente 05 amostras do efluente do sistema, as quais foram utilizadas para o levantamento da cinética do processo em análise. Os resultados dos experimentos e as respectivas equações dos modelos matemáticos semiempíricos identificados são apresentados na sequência.

Etapa de pré-lavagem

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.7 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.7 - Etapa de limpeza alcalina

TANQUE DE POLPA			
PRÉ-LAVAGEM			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	1	0,648	0,648
2	2	0,086	0,128
5	3	0,086	0,067
7	4	0,068	0,065
10	5	0,065	0,065

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (10)$$

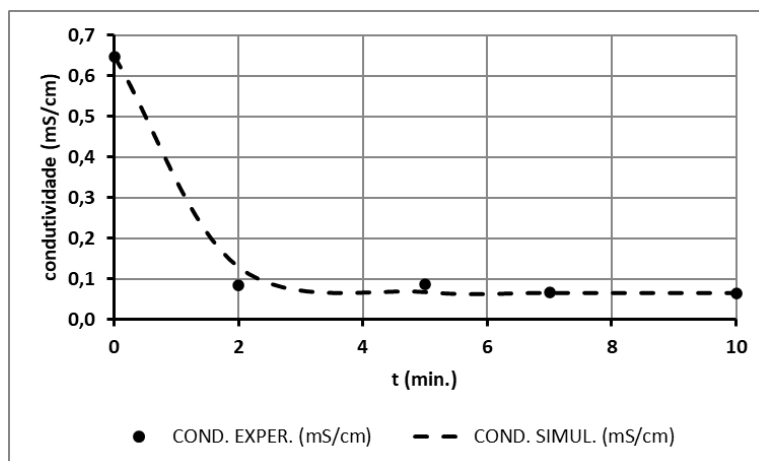


Figura 4.7: Condutividade na etapa de pré-lavagem - Tanque de Polpa

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = \mathbf{0,019} \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$

$$\tau p = \mathbf{0,9} \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de pré-lavagem foi igual a 29,51 m³/h.

A condutividade da água de pré-lavagem diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 5 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Etapa de limpeza alcalina

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.8 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.8 - Etapa de limpeza alcalina

TANQUE DE POLPA			
LIMPEZA ALCALINA			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	6	0,078	0,078
5	7	60,520	60,279
10	8	60,230	60,685
15	9	61,510	60,688
20	10	61,300	60,688

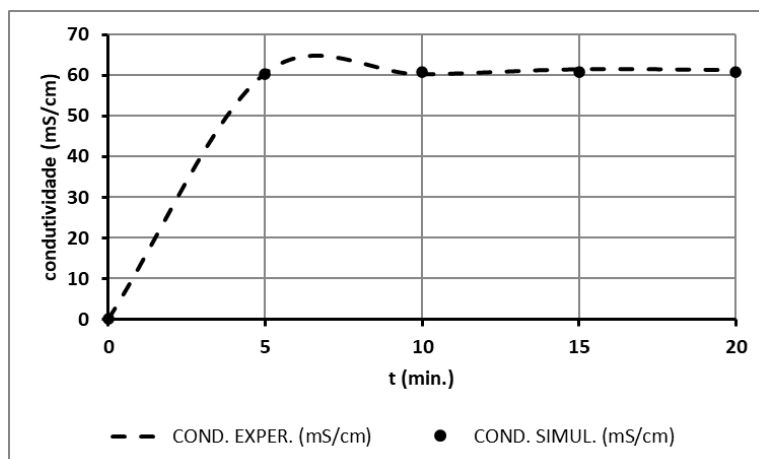


Figura 4.8 - Condutividade na etapa de limpeza alcalina – Tanque de Polpa

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (11)$$

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a 29,51 m³/h .

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = \underline{2,053 \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3}$$

$$\tau_p = \underline{1,4 \text{ min.}}$$

Etapa de enxágue

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.9 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.9 - Etapa de limpeza alcalina

TANQUE DE POLPA			
ENXÁGUE			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	11	56,210	56,210
5	12	0,114	1,132
10	13	0,080	0,278
15	14	0,069	0,265
20	15	0,265	0,265

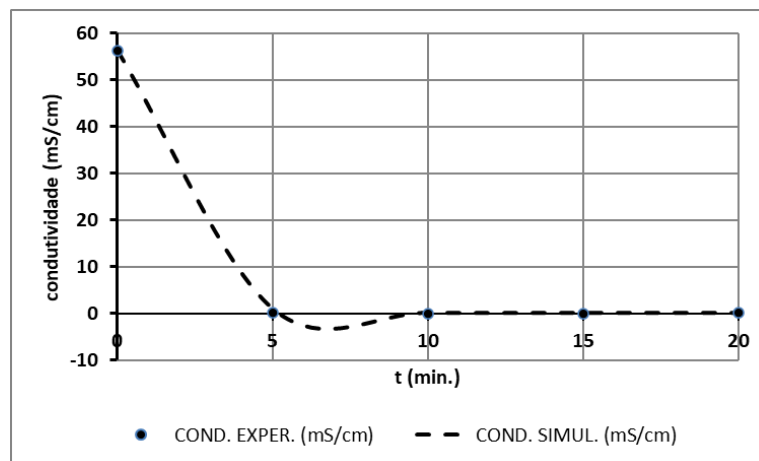


Figura 4.9 - Condutividade na etapa de enxágue – Tanque de Polpa

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (12)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 1,895 \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$

$$\tau_p = 1,2 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de enxágue foi igual a 29,51 m³/h.

A condutividade da água de enxágue diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

O quarto equipamento analisado foi a “centrífuga”, cujo CIP teve duração de: (i)- 20 minutos na etapa de pré-lavagem; (ii)- 55 minutos na etapa de limpeza cáustica e (iii)- 20 minutos na etapa de enxágue. Foram coletadas manualmente 05 amostras do efluente do sistema, as quais foram utilizadas para o levantamento da cinética do processo em análise. Os resultados dos experimentos e as respectivas equações dos modelos matemáticos semiempíricos identificados são apresentados na sequência.

Etapa de pré-lavagem

Na Tabela 4.10 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.10 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.10 - Etapa de pré-lavagem

CENTRÍFUGA			
PRÉ-LAVAGEM			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	61	3,890	3,890
5	62	0,090	0,098
10	63	0,284	0,083
15	64	0,090	0,083
20	65	0,083	0,083

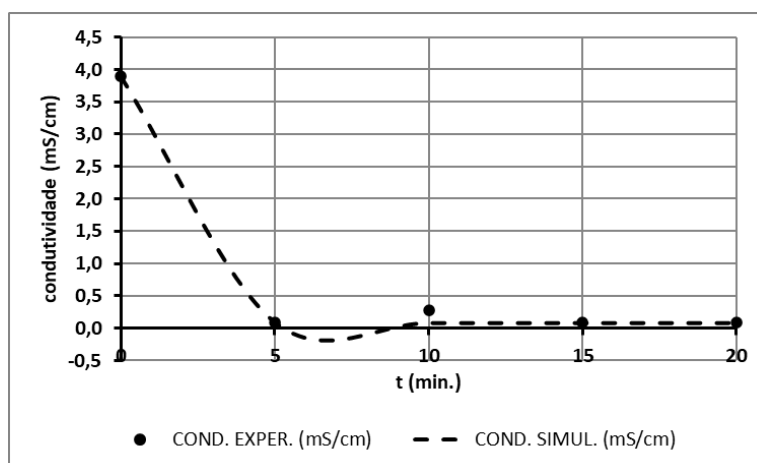


Figura 4.10 - Comportamento da condutividade na etapa de pré-lavagem - Centrífuga

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (13)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 0,063 \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$

$$\tau p = 0,9 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de pré-lavagem foi igual a $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

A condutividade da água de pré-lavagem diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Etapa de limpeza alcalina

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.11 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.11: Etapa de limpeza alcalina

CENTRÍFUGA			
LIMPEZA ALCALINA			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	66	0,085	0,085
14	67	0,062	0,085
27	68	48,780	51,383
41	69	51,800	51,392
55	70	53,530	51,392

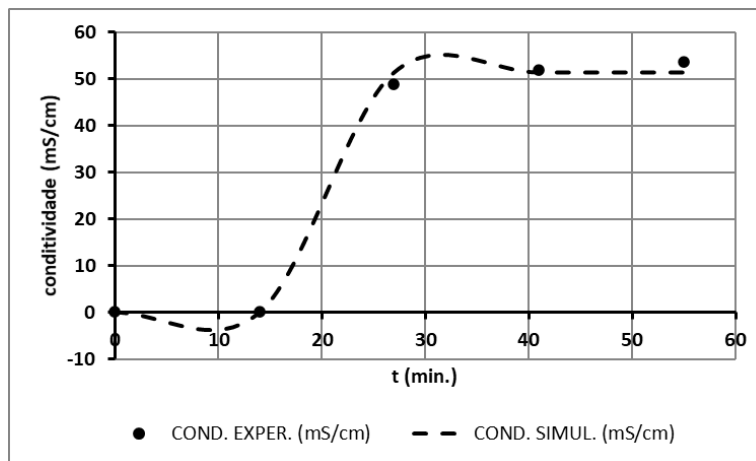


Figura 4.11 - Condutividade na etapa de limpeza alcalina - Centrífuga

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * \left(1 - e^{-\frac{(t-tetap)}{\tau p}} \right) \quad (14)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.11

Quadro 4.11 - Valores dos parâmetros do modelo

Kp	=	0,85512	mS·h/cm·m ³
τp	=	1,5	min.
$tetap$	=	14	min.

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a 60 m³/h .

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 30 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, acrescidos do tempo morto e considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

Etapa de enxágue

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.12 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.12 - Etapa de enxágue

CENTRÍFUGA			
ENXÁGUE			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	71	51,370	51,370
5	72	3,783	3,312
10	73	0,887	0,324
15	74	0,270	0,138
20	75	0,126	0,126

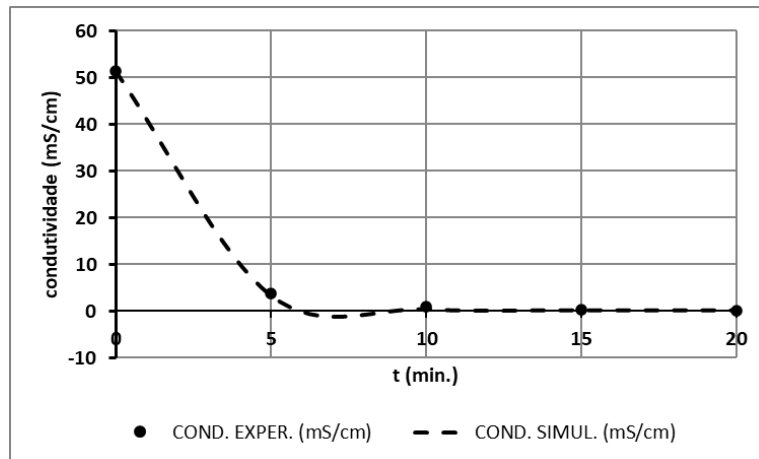


Figura 4.12 - Comportamento da condutividade na etapa de enxágue - Centrífuga

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}) \quad (15)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 0,854 \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau p = 1,8 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de enxágue foi igual a 60 m³/h.

A condutividade da água de enxágue diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

O quinto equipamento analisado foi o **Tanque de Expansão**, cujo CIP teve duração de: (i)- 10 minutos na etapa de pré-lavagem; (ii)- 20 minutos na etapa de limpeza cáustica e (iii)- 10 minutos na etapa de enxágue. Foram coletadas manualmente 05 amostras do efluente do sistema, as quais foram utilizadas para o levantamento da cinética do processo em análise. Os resultados dos experimentos e as respectivas equações dos modelos matemáticos semiempíricos identificados são apresentados na sequência.

Etapa de pré-lavagem

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.13 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.13 - Etapa de pré-lavagem

TANQUE DE EXPANSÃO			
PRÉ-LAVAGEM			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	31	2,709	2,709
2	32	0,116	0,137
5	33	0,113	0,089
7	34	0,093	0,089
10	35	0,089	0,089

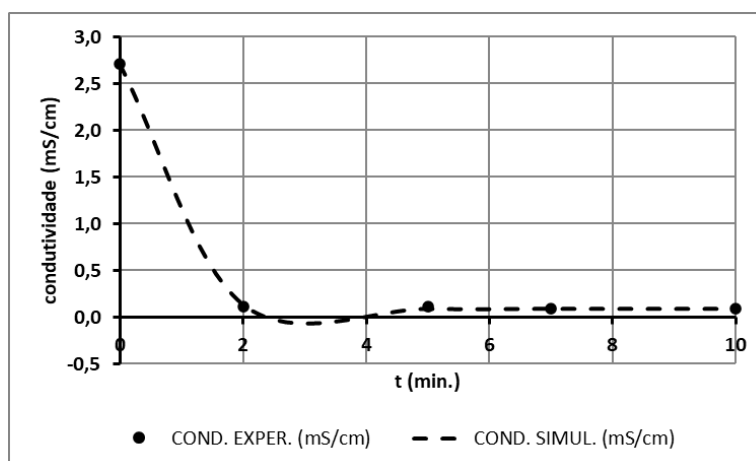


Figura 4.13 - Condutividade na etapa de pré-lavagem – Tanque de Expansão

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}\right) \quad (16)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.13.

Quadro 4.13 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = \mathbf{0,080} \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau p = \mathbf{0,6} \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de pré-lavagem foi igual a 32,69 m³/h.

A condutividade da água de pré-lavagem diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 5 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

1ª Etapa de limpeza alcalina (antes da raspagem)

Na Tabela 4.14 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.14 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.14 - 1ª etapa de limpeza alcalina (antes da raspagem)

TANQUE DE EXPANSÃO			
LIMPEZA ALCALINA 1 (ANTES DA RASPAGEM)			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	36	0,389	0,389
5	37	55,580	56,494
10	38	59,100	58,071
15	39	62,700	58,116
20	40	58,700	58,117

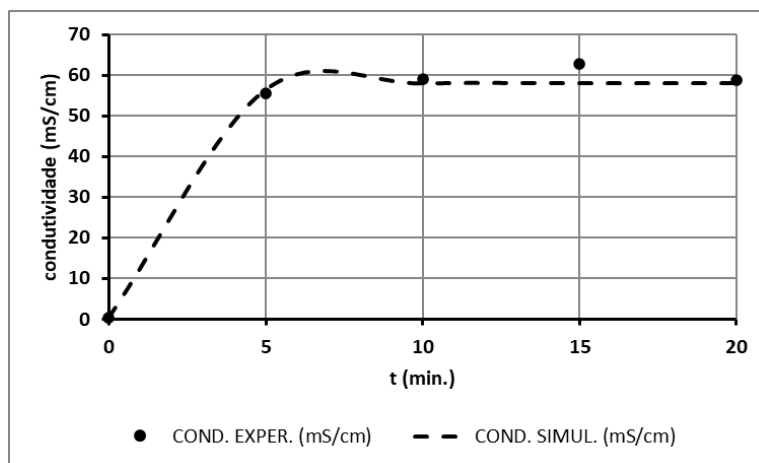


Figura 4.14 - Condutividade na 1ª etapa de limpeza alcalina – Tanque de Expansão

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (17)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Valores dos parâmetros do modelo

$Kp =$	1,766042	mS·h/cm·m ³
$\tau p =$	1,4	min.

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a 32,69 m³/h .

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

2ª Etapa de limpeza alcalina (depois da raspagem)

Na Tabela 4.15 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.15 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.15 - 2ª etapa de limpeza alcalina (depois da raspagem)

TANQUE DE EXPANSÃO			
LIMPEZA ALCALINA 2 (DEPOIS DA RASPAGEM)			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	76	49,500	49,500
5	77	57,440	58,209
10	78	62,020	60,705
15	79	60,180	61,420
20	80	61,830	61,624

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} + Kp * Vazão * (1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}) \quad (18)$$

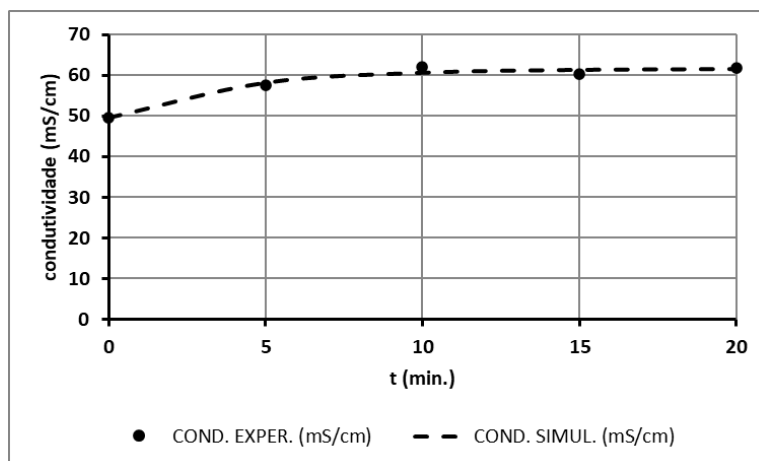


Figura 4.15 - Condutividade na 2ª etapa de limpeza alcalina – Tanque de Expansão

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = \mathbf{0,373} \text{ mS}\cdot\text{h}/\text{cm}\cdot\text{m}^3$$

$$\tau p = \mathbf{4} \text{ min.}$$

A vazão de solução de NaOH utilizada na etapa de limpeza alcalina foi igual a $32,69 \text{ m}^3/\text{h}$.

A condutividade da solução detergente aumenta com o passar do tempo, de maneira gradual e significativamente mais lenta, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 15 min. (3 vezes o valor da constante de tempo do processo).

Etapa de enxágue:

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores experimentais coletados na EMPRESA e na Figura 4.16 o correspondente comportamento da condutividade com o tempo.

Tabela 4.16 - Etapa de enxágue

TANQUE DE EXPANSÃO			
ENXÁGUE			
TEMPO (min.)	AMOSTRA	COND. EXPER. (mS/cm)	COND. SIMUL. (mS/cm)
0	41	56,330	56,330
5	42	3,720	4,621
10	43	1,808	0,900
15	44	1,057	0,632
20	45	0,611	0,613

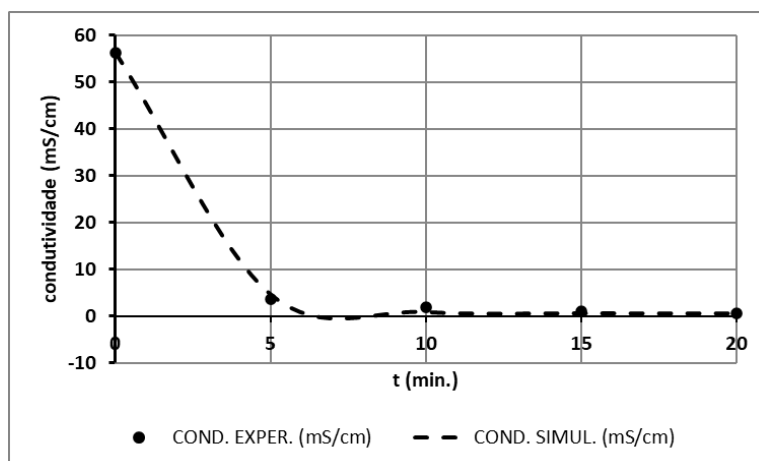


Figura 4.16 - Condutividade na etapa de enxágue – Tanque de Expansão

A equação do modelo para esta etapa é a seguinte

$$Cond_{simul(t)} = Cond_{simul0} - Kp * Vazão * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau p}}\right) \quad (19)$$

Os valores dos parâmetros do modelo são apresentados na Quadro 4.16.

Quadro 4.16 - Valores dos parâmetros do modelo

$$Kp = 1,704 \text{ mS} \cdot \text{h/cm} \cdot \text{m}^3$$

$$\tau p = 1,9 \text{ min.}$$

A vazão de água utilizada na etapa de enxágue foi igual a 32,69 m³/h.

A condutividade da água de enxágue diminui com o passar do tempo, de maneira gradual, tendendo ao valor correspondente ao estado estacionário final conforme apresentado pelo modelo identificado. A nova condição de estado estacionário é alcançada depois de decorridos aproximadamente 10 min. (5 vezes o valor da constante de tempo do processo, considerado o arredondamento para maior valor, por segurança).

5. CÁLCULO DA ECONOMIA DE ÁGUA & SOLUÇÃO ALCALINA

Os cálculos da economia de água e da solução alcalina foram feitos de maneira semelhante para todos os equipamentos e etapas do processo de limpeza. Primeiramente, analisando os dados coletados na EMPRESA, foram observadas as etapas de limpeza de cada um dos equipamentos em que se atingiu o estado estacionário para o valor da condutividade durante o procedimento. Aquelas cujo estado estacionário não foi observado, não foi possível calcular a economia para o processo. Já nas etapas em que se alcançou o estado estacionário, definiu-se que após o valor da condutividade se estabilizar não há mais a necessidade de dar continuidade à etapa em questão. O valor estabelecido como o tempo de estado estacionário foi de 5 vezes a constante de tempo para o processo, estabelecida pelo modelo proposto para cada etapa (MELERO Jr et al, 2013). Nos casos em que a constante calculada não possui um valor exato de tempo, em minutos, arredondou-se para cima o valor encontrado. Algumas das vezes, por inexatidão nos intervalos de tempo de medição, arredondou-se para o próximo valor de tempo em que a condutividade foi medida. A economia calculada está no tempo de processo atualmente empregado pela EMPRESA que está além do tempo necessário para atingir o estado estacionário. Multiplicar esse tempo desnecessário de processo pela vazão utilizada na etapa, nos leva à Equação 20, que representa a economia de água ou de solução alcalina para cada etapa analisada.

$$Economia[L] = Vazão[\frac{L}{min}] * (t_{total}[min] - t_{EE}[min]) \quad (20)$$

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.5.

Tabela 5.1: Economias para o Tanque de coagulação 2

TANQUE DE COAGULAÇÃO		
Etapa	Economia (L)	Economia (%)
Pré-Lavagem	0,00	0
Lavagem Alcalina	1.633,33	70
Enxague	1.166,67	50

Tabela 5.2 - Economias para a Tubulação de polpa

TUBULAÇÃO DE POLPA		
Etapa	Economia (L)	Economia (%)
Pré-Lavagem	4.000,00	50
Lavagem Alcalina	18.000,00	81,82
Enxague	0,00	0

Tabela 5.3 - Economias para o Tanque de polpa

TANQUE DE POLPA		
Etapa	Economia (L)	Economia (%)
Pré-Lavagem	2.459,17	50
Lavagem Alcalina	4.918,33	50
Enxague	4.918,33	50

Tabela 5.4 - Economias para a Centrífuga

CENTRÍFUGA		
Etapa	Economia (L)	Economia (%)
Pré-Lavagem	10.000,00	50
Lavagem Alcalina	25.000,00	45
Enxague	10.000,00	50

Tabela 5.5 - Economias para o Tanque de expansão

TANQUE DE EXPANSÃO		
Etapa	Economia (L)	Economia (%)
Pré-Lavagem	2.724,17	50
Lavagem Alcalina (pré-raspagem)	5.448,33	50
Lavagem Alcalina (pós-raspagem)	2.724,17	25
Enxague	5.448,33	50

Por fim, é apresentado na Tabela 5.6 a economia total de água e de solução alcalina que pode ser alcançada nas etapas consideradas para o processo industrial de limpeza CIP analisado.

Tabela 5.6: Economia total para o processo CIP estudado

ECONOMIA NO PROCESSO CIP		
	Economia (L)	Economia (%)
Água	40.716,67	45
Solução Alcalina	57.724,17	52

6. CONCLUSÕES & RECOMENDAÇÕES

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que os modelos semi-empíricos do tipo *FOPDT* (“First Order Plus Dead Time”) desenvolvidos descrevem bem a cinética do processo CIP e podem ser utilizados para prever, estimativamente, seu comportamento dinâmico.

Conclui-se também que atualmente há um considerável desperdício de água e solução alcalina no processo CIP da EMPRESA, visto que, numa única realização dessas etapas do processo, com as adaptações propostas nessa monografia, pode-se, hipoteticamente, economizar mais de 40 mil litros de água e quase 60 mil litros da solução alcalina. Isto é hipotético devido ao fato de que os cálculos realizados neste presente trabalho não consideraram um fator de segurança (a ser definido pela empresa). Além disso, inevitavelmente existem incertezas a respeito dos dados coletados. Porém, o grande valor percentual calculado (45% para água e 52% para solução alcalina), garante que economias podem e devem ser feitas no processo de limpeza.

Por fim, recomenda-se que estudos mais complexos e exatos sejam feitos a respeito desse processo, utilizando um condutivímetro conectado a um software de controle de processos químicos, como, por exemplo, o aplicativo *LabView™*, que certamente irá auxiliar em precisão e maior número de dados para valores de condutividade, além de exatidão para o tempo de estado estacionário. Recomenda-se também que estudos semelhantes sejam realizados para esse processo, porém analisando a estabilidade do pH, além de analisar também as subseqüentes etapas do CIP que visam a eliminação de contaminações microbiológicas, etapas cruciais do processo, principalmente se tratando de uma indústria alimentícia, que, infelizmente, não foram analisadas nesta monografia, devido às dificuldades na obtenção de dados precisos e ao custo consideravelmente mais elevado que essas análises possuem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; GONÇALVES, P. P.; KUNIGK, L.; SISLIAN, R. & GEDRAITE, R. **Investigação experimental acerca da cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em protótipo de trocador de calor de placas.** In: *Proc. do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (XI COBEQ IC 2015)*. 19 a 22 de julho de 2015, Campinas, SP.
- BICALHO, B. P., TANNER, S. P., GEDRAITE, R. **Contribuição ao estudo da cinética da remoção de resíduos na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP aplicado a trocador de calor feixe tubular.** In: *Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ-IC 2013)*. Vassouras, RJ.
- BICALHO, B.P.; TANNER, S. P.; GEDRAITE, R.; COUTINHO FILHO, U. & KUNIGK, L. **Investigação experimental da cinética de remoção de resíduos de detergente em sistemas de limpeza CIP em resposta a variações na vazão usando modelos semi-empíricos do tipo FOPDT.** In: *Anais da XIX Jornada em Engenharia Química (JORNEQ – 2014)*. 03 a 03 de agosto de 2014, Uberlândia, MG.
- BIRD & BARLETT. **CIP optimization for the food industry: Relationships between detergent concentration, temperature and cleaning time.** Institution of Chemical Engineers, 2005.
- CARLOTTI FILHO, M. A. C. **Estudo da cinética de remoção de resíduos de cálcio e de detergente alcalino nas etapas de pré-lavagem e de enxágue em um trocador de calor de placas,** São Caetano do Sul, SP: CEUN-IMT, 2008. Mestrado.
- COUTINHO FILHO, U., GEDRAITE, R., KUNIGK, L., NEIRO, S. M. S., SILVA, P.B. **Cinética de remoção de película protéica de leite em superfície de aço inox 316 pela ação de solução de hidróxido de sódio.** In: *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2012)*, Búzios - RJ, setembro de 2012.
- FIUZA, D.; GEDRAITE, E. S.; KUNIGK, L.; AUGUSTO, S. R.; MELERO JR, V.; LOBATO, F. S.; NEIRO, S. M. da S.; & GEDRAITE, R. **Considerações sobre bancada experimental usada para estudos de otimização de sistemas de limpeza CIP.** In: IX Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, promovida pela FEELT/UFU, Uberlândia - MG, 2011.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos.** São Paulo, SP: EDUSP, 2005, 678p.
- GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; RIBEIRO, S.; MELERO JR., V.; VASCONCELOS, F.; SISLIAN, R. 'Experimental investigation about the milk protein based deposit removal kinetics'. In: **World Congress on Communication and Arts, WCCA**, Guimarães- Portugal, 2010.
- GEDRAITE, R., LOBATO, F. S., NEIRO, S. M. S., MELERO JR., V., AUGUSTO, S. R., KUNIGK, L. **Modelagem matemática da cinética de remoção de resíduos em sistemas de limpeza CIP.** In: *XXXII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Ouro Preto - MG, 2011.

- MELERO Jr., V. , GEDRAITE, E. dos S., KUNIGK, L, VIEIRA, P. A., MALAGONI, R. A., SISLIAN, R., COUTINHO Filho, U., GEDRAITE, R. e AUGUSTO, S. R. **Experimental investigation about rinse water consumption of a CIP process applied to a shell and tube exchanger.** In: *Proc. of 3rd International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials (ICCEAM – 2013)*. July 6-7, 2013, Guangzhou, China.
- MELO JR., P.A. & PINTO, J. C. C. da S. **Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não Linear de Processos Químicos.** Rio de Janeiro, RJ: COPPE - UFRJ, 2008.
- MILLER, J. R. et al. A comparison of controller tuning techniques. **Control Engineering**, v.14, n. 12, p. 72, Dec. 1967.
- OLIVEIRA, L. R., GEDRAITE, R.; COUTINHO FILHO, U. & KUNIGK, L. **Obtenção de modelo empírico para avaliação da quantidade de insumos gastos em um sistema CIP empregado na limpeza de um sistema de pasteurização de leite.** In: *XV Encontro de Modelagem Computacional e III Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais*, promovidos pela UERJ, e pela UFU, Uberlândia - MG, 2012.
- PIRES, F. F., LOBATO, F. S., KUNIGK, L. & GEDRAITE, R. **Contribuição ao estudo da cinética da remoção de resíduos na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP visando a minimização e gastos com insumos: determinação das propriedades de transporte de calor utilizadas no estudo teórico de trocador de calor casco e tubos.** In: *XVII Jornada em Engenharia Química*, promovida pelo Programa de Educação Tutorial (PET – EQ), Uberlândia - MG, 2012.
- REIS, A. P. P., NEIRO, S. M. da S., COUTINHO FILHO, U., KUNIGK, L. & GEDRAITE, R. **Contribuição ao estudo da cinética da remoção de resíduos na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP visando a minimização e gastos com insumos: ajuste de modelos aos dados experimentais relacionados à variação de pH com a vazão.** In: *XVII Jornada em Engenharia Química*, promovida pelo Programa de Educação Tutorial (PET – EQ), Uberlândia - MG, 2012.
- REIS, A. P. P., PIRES, F. F. & GEDRAITE, R. **Ajuste de modelo matemático à cinética da remoção de resíduos em sistemas de limpeza CIP.** In: *I Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste*, promovida pela FAMAT/UFU e pela SBMAC, Uberlândia - MG, 2011.
- ROCHA, R. R.; KUNIGK, L.; SISLIAN, R.; SOUZA, M. R. S. B.; SILVA, F. V. & GEDRAITE, R.. **Ajuste dos parâmetros de modelo identificado do tipo FOPDT usando algoritmo de evolução diferencial.** In: *Proc. do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2016)*. 25 a 29 de setembro de 2016, Fortaleza, CE.
- SALVAGNINI, W. & GEDRAITE, R. **Rotina de Experimento para trocador de calor feixe tubular.** São Caetano do Sul, SP: CEUN-IMT, 2001.
- SANTOS, R. O.; NEIRO, S. M. da S.; GEDRAITE, R.; KUNIGK, L. & GEDRAITE, E. S. **Curva de reação do processo: uma ferramenta simples e útil para o modelamento dinâmico de sistemas industriais.** In: *I Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste*, promovida pela FAMAT/UFU e pela SBMAC, Uberlândia - MG, 2011.

- SEBORG, D. E. et al. **Process Dynamics and Control**. Singapore: Wiley, 2011.
- SILVA, F. V., GEDRAITE, R., KUNIGK, L., SISLIAN, R. AUGUSTO, S. R. MELERO Jr, V. **Modelagem neuro-fuzzy da cinética de remoção de resíduos de detergente em sistemas de limpeza CIP – uma abordagem experimental**. In: *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2012)*, Búzios - RJ, setembro de 2012.
- SILVA, L. D.; MALAGONI, R. A. & GEDRAITE, R. **Avaliação da estratégia de controle de sistema CIP ponderada pelos erros de pH e volume e previsão do tempo de operação utilizando vazões variáveis**. In: *Proc. do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2018)*. 23 a 26 de setembro de 2018, São Paulo, SP.
- SISLIAN, R., MELERO Jr., V., KUNIGK, L, AUGUSTO, S. R., MALAGONI, R. A., COUTINHO Filho, U. e GEDRAITE, R. **Neuro-Fuzzy Model of the Detergent Leavings Kinetics' Removal in a Clean in Place System**. In: *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013 – Vol. II (WCECS 2013)*, October 23 – 25, 2013, San Francisco, USA.
- SMITH, C. L. **Digital computer process control**. Scranton, PA: Intext Educational Publisher, 1972.
- SOUSA, V. G.; CARNEIRO, L. R. A.; KUNIGK, L.; CARDOSO, V. L. & GEDRAITE, R. **Estudo de sistema de controle de vazão de água de enxágue com set-point variável sobre a cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em trocador de calor feixe tubular**. In: *Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ IC 2017)*. 16 a 19 de julho de 2017, São Carlos, SP.
- SUNDARESAN, K. R. & KRISHNASWAMY. P. R. Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency and Laplace domains. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, n. 2, p. 257-62, Apr. 1978.
- TANNER, S. P.; BICALHO, B. P.; SILVA, G. A. P.; BARBOSA, V. P.; COUTINHO FILHO, U. & GEDRAITE, R.. **Investigação experimental da cinética de remoção de depósitos proteicos da superfície de aço inox 304 por solução de hidróxido de sódio em processo CIP usando modelos semi-empíricos do tipo FOPDT**. In: *Anais da XIX Jornada em Engenharia Química (JORNEQ – 2014)*. 03 a 08 de agosto de 2014, Uberlândia, MG.
- VIEIRA, J. S.; SILVA, G. A. P.; PINHEIRO, B. H. O.; ALVARES, C. A. & GEDRAITE, R.. **Investigação experimental da cinética de remoção de depósitos de proteína de leite usando reator tipo tanque agitado**. In: *Proc. do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (XI COBEQ IC 2015)*. 19 a 22 de julho de 2015, Campinas, SP.