

ECONOMIA DE ÁGUA EM SISTEMA DE LIMPEZA CIP APLICADO A UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

T. S. OLIVEIRA¹, R. G. BRASILEIRO², M. S. COSTA³, R. GEDRAITE⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

RESUMO – *O processo de limpeza CIP (Clean-In-Place) em instalações industriais consome um grande volume de água, utilizada principalmente nas etapas de enxágue. A minimização do seu consumo tornou-se imperativo atualmente, dado o cenário de escassez deste recurso natural que se projeta para o futuro. Neste trabalho foram empregados modelos matemáticos semiempíricos identificados para representar o comportamento da variável de processo condutividade da solução efluente do sistema CIP. Os modelos obtidos permitiram representar adequadamente o comportamento do processo, facilitando a sua análise com vistas à economia de água nas etapas de pré-lavagem e enxágue. A economia de água foi calculada com base na redução do tempo de operação, determinada com o emprego dos modelos. A redução estimada no consumo de água foi, em média, igual a 50% do valor empregado atualmente pela indústria estudada.*

1. INTRODUÇÃO

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 (MELERO Jr. et al., 2013).

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 (GEDRAITE et al., 2010).

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 (OLIVEIRA et al., 2012).

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 (BICALHO et al., 2014).

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 (COUTINHO Filho et al., 2012; BICALHO et al., 2014; ALVARES et al., 2015), 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.

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 coletadas diretamente de uma instalação industrial.

2. MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

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). Neste trabalho foram utilizadas as funções de transferência.

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 (SILVA et al., 2018). 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). Na equação (1) é apresentada a função de transferência típica do processo 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; BICALHO et al., 2014).

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 (ROCHA et al., 2016; GEDRAITE et al., 2011).

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.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho analisou a limpeza de três equipamentos de processo, a saber: tanque de mistura, tubulação de interligação e centrífuga.

A análise do comportamento da cinética de remoção dos resíduos de detergente foi conduzida com base no procedimento operacional praticado na empresa que serviu de base para a realização do estudo 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. 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. Na Tabela 1 são apresentados equipamentos e respectivas etapas de operação estudadas.

Tabela 1 – Equipamentos e condições estudadas

Equipamento	Etapa	Pré-lavagem		Limpeza Alcalina		Enxágue	
		$\Delta t_{\text{operação}}$ (min)	vazão (m ³ /h)	$\Delta t_{\text{operação}}$ (min)	vazão (m ³ /h)	$\Delta t_{\text{operação}}$ (min)	vazão (m ³ /h)
Tanque de mistura		10	29,51	20	29,51	20	29,51
Tubulação de distribuição		20	24	55	24	20	24
Centrífuga		20	60	55	60	20	60

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme já citado, foram identificados experimentalmente modelos do tipo *FOPDT*, que são caracterizados por até 03 parâmetros, a saber: o ganho (K_p), o atraso de transferência (τ_p) e o atraso de transporte (θ_p). Os valores destes parâmetros foram ajustados a partir das curvas de reação do processo, obtidas experimentalmente, e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – valores dos parâmetros dos modelos

Equipamento	Etapa	Pré-lavagem			Limpeza Alcalina			Enxágue		
		K_p (mS.h/cm.m ³)	τ_p (min)	θ_p (min)	K_p (mS.h/cm.m ³)	τ_p (min)	θ_p (min)	K_p (mS.h/cm.m ³)	τ_p (min)	θ_p (min)
Tanque de mistura		- 0,019	0,9	-	2,053	1,4	-	- 1,895	1,2	-
Tubulação de distribuição ⁽¹⁾		- 0,004375	1,7	-	1,959	1,3	-	- 1,399 0,5	5 9	- 15
Centrífuga		- 0,063	0,9	-	0,85512	1,5	14	- 0,854	1,8	-

⁽¹⁾A etapa de enxágue da tubulação de distribuição apresentou um modelo com duas dinâmicas distintas.



Os comportamentos temporais da condutividade medida e da condutividade simulada com base nos modelos identificados para cada uma das etapas analisadas nos três equipamentos avaliados é apresentado na Figura 1.

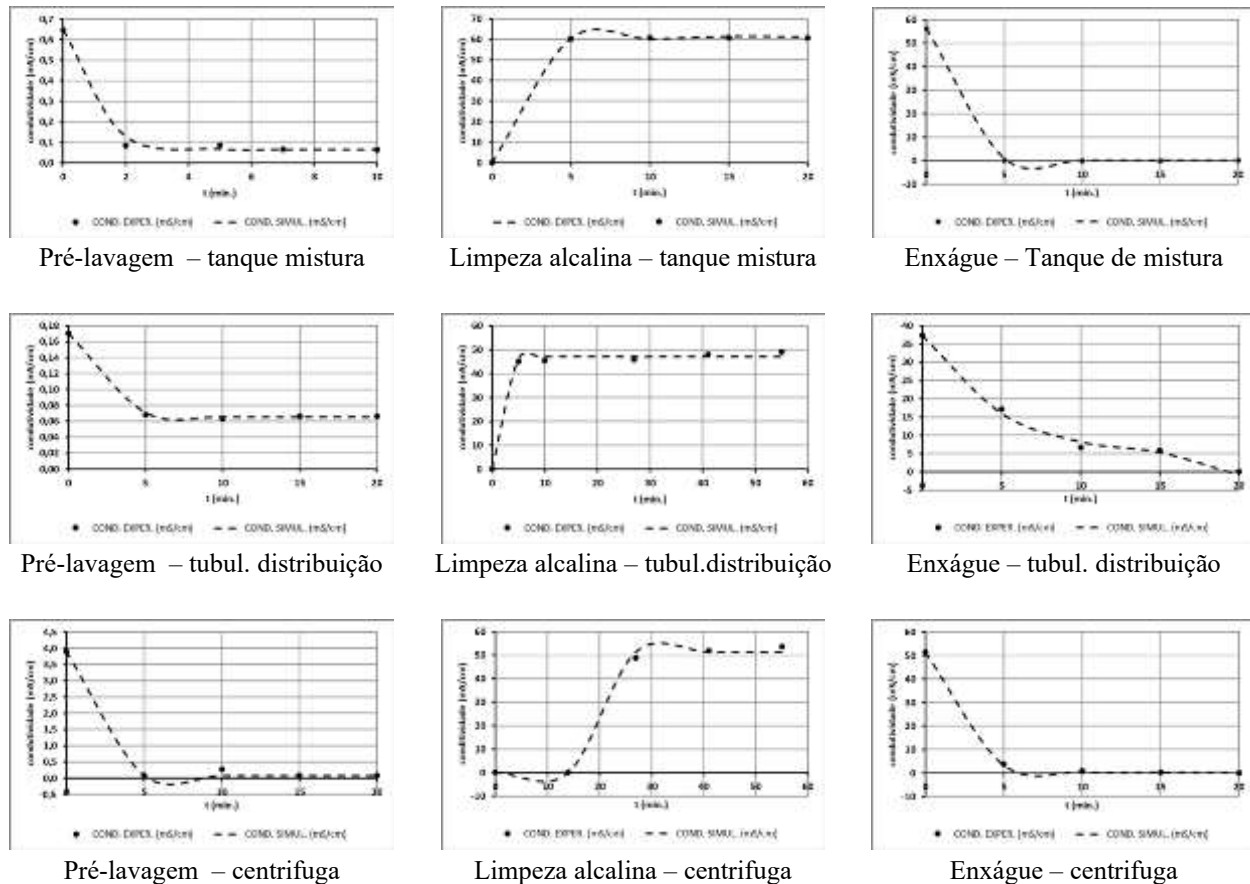


Figura 1 – Comportamento temporal da condutividade medida e simulada

O comportamento da condutividade da solução efluente nas etapas de pré-lavagem foi semelhante, com tendência de decaimento acentuado no início e posterior estabilização no valor final. Pode-se perceber com base na Figura 1 que após decorrido o tempo correspondente a aproximadamente cinco atrasos de transferência, a condutividade da solução efluente atinge o valor estacionário final (MELERO Jr et al., 2013). Os valores da condutividade final são diferentes entre si, devido às características intrínsecas de cada sistema/equipamento analisado, sendo que a centrífuga apresentou a maior variação no valor da condutividade da solução efluente, o que pode ser explicado pelo fato dela apresentar uma geometria interna mais complexa, o que a torna mais suscetível ao acúmulo de produto residual do processamento. Pode-se perceber, também, que há possibilidade de reduzir a duração da etapa após ter sido alcançado o estado estacionário final.

O comportamento da condutividade da solução efluente nas etapas de limpeza alcalina também foi semelhante, com tendência de aumento acentuado no início e posterior estabilização no valor final.

Pode-se perceber com base na Figura 1 que após decorrido o tempo correspondente a aproximadamente cinco atrasos de transferência, a condutividade da solução efluente igualmente atinge o valor correspondente ao estado estacionário final. Os valores da condutividade final são diferentes entre si, devido às características intrínsecas de cada sistema/equipamento analisado, sendo que a centrífuga e a tubulação de distribuição apresentaram menor variação no valor da condutividade da solução efluente em comparação ao tanque de mistura, o que pode ser explicado pelo fato do teor de produto residual do processamento consumir mais alcalinidade nos dois primeiros sistemas. A condutividade da solução efluente da centrífuga apresentou atraso de transporte igual a 14 min, sugerindo com esse comportamento que a remoção dos resíduos foi mais demorada e difícil. De maneira análoga, ao comentado anteriormente, pode-se perceber que há possibilidade de reduzir a duração da etapa após ter sido alcançado o estado estacionário final.

O comportamento da condutividade da solução efluente nas etapas de enxágue foi semelhante, com tendência de decaimento acentuado no início e posterior estabilização no valor final. Observou-se que a condutividade da solução efluente da tubulação de distribuição não atingiu o estado estacionário final. Uma possível razão para este comportamento pode estar associada ao fato de que seria necessário um maior tempo de funcionamento do sistema CIP nesta etapa, dado que a tubulação em estudo apresenta longo comprimento. Ademais, o tempo de recirculação da solução detergente alcalina foi maior neste sistema quando comparado com os demais. A menos da tubulação de distribuição, pode-se perceber com base na Figura 1 que após decorrido o tempo correspondente a aproximadamente cinco atrasos de transferência, a condutividade da solução efluente atinge o valor correspondente ao estado estacionário final. Os valores da condutividade final da solução efluente do tanque de mistura e da centrífuga são próximos entre si, sugerindo que a remoção do detergente alcalino residual foi bem sucedida. Pode-se perceber, também, que há possibilidade de reduzir a duração da etapa após ter sido alcançado o estado estacionário final.

A economia de água foi calculada com base na possibilidade de redução do tempo de recirculação da água de pré-lavagem e da água de enxágue, tendo sido considerada a redução de aproximadamente 50% na duração das referidas etapas. Não foi calculada a economia de água na etapa de enxágue para a tubulação de distribuição pois não foi alcançado o estado estacionário final. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos com a economia proposta neste trabalho.

Tabela 3 – Resultados da Economia de água

Etapa	Pré-lavagem		Limpeza Alcalina		Enxágue	
	Economia		Economia		Economia	
Equipamento	(m ³)	(%)	(L)	(%)	(L)	(%)
Tanque de mistura	2,4	50	4,9	50	4.918,33	50
Tubulação de distribuição	4,0	50	18,0	81,8	0	0
Centrífuga	10,0	50	25,0	45	10,0	50

5. CONCLUSÃO

Verificou-se com base na metodologia proposta neste trabalho que existe a possibilidade de economizar água no processo em estudo, diminuindo o tempo de recirculação deste insumo em cada etapa. Na análise realizada, a vazão de água empregada em cada etapa não foi alterada em relação ao empregado na instalação industrial.

O emprego dos modelos identificados do tipo *FOPDT* se revelou uma ferramenta simples e robusta para avaliar o comportamento do processo, permitindo estimar a duração correspondente ao estado estacionário final de maneira satisfatória, em que pese o fato da coleta de amostras ter sido realizada de maneira manual e com relativamente poucos pontos.

A redução do tempo de duração da etapa proposta neste trabalho não levou em consideração a análise microbiológica final do processo de limpeza, a qual deve ser considerada no caso de se aplicar os resultados obtidos na instalação industrial. A comprovação da eficácia da redução proposta depende diretamente deste aspecto, podendo haver risco de contaminação do produto final caso não seja realizada.

Os modelos obtidos neste trabalho podem ser facilmente configurados na base de dados de sistemas digitais de controle, permitindo a automatização do tempo de parada da etapa e melhorando assim o desempenho econômico da instalação industrial no que tange à economia de água.

A redução percentual no consumo de água foi significativa nas etapas estudadas, contribuindo também para diminuir o impacto ambiental decorrente da necessidade de tratamento dos efluentes produzidos, o que se traduz em um benefício indireto associado com este estudo.

6. REFERÊNCIAS

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.; 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.

COUTINHO FILHO, U., GEDRAITE, R., KUNIGK, L., NEIRO, S. M. S., SILVA, P.B. **Cinética de remoção de película proteica 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.

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.

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.

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.

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.

SMITH, C. L. **Digital computer process control.** Scranton, PA: Intext Educational Publisher, 1972.

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.