

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química

Isabella Borges Cherulli Colichio

Limpeza CIP: comparação das cinéticas em permutadores de calor

Uberlândia, MG
2023

Isabella Borges Cherulli Colichio

Limpeza CIP: comparação das cinéticas em permutadores de calor

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

2023

Isabella Borges Cherulli Colichio

Limpeza CIP: comparação das cinéticas em permutadores de calor

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

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Instituto Federal de São Paulo / Campus Guarulhos

Eng. Mestre Vinicius Pimenta Barbosa

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Uberlândia, 18 de junho de 2023

2023

AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos que sempre me apoiaram em toda a minha jornada.

Ao professor Rubens Gedraite pela orientação e suporte no desenvolvimento do tema e realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é estudado o comportamento do processo de remoção de resíduos de hidróxido de sódio à superfície interna de dois permutadores de calor, a saber: permutador casco e tubo e permutador de placas. 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 (igual ou superior a $0,20\text{ m/s}$). Foi empregada uma solução detergente alcalina formada por hidróxido de sódio a $0,5\% \text{ m/m}$, e velocidade de $0,41\text{ m/s}$ para o trocador de calor casco e tubo, com tempo de operação de 30 minutos, e a velocidade de $0,43\text{ m/s}$ para o trocador de calor de placas, com tempo de operação de 3 minutos. O comportamento da cinética de remoção do detergente alcalino apresentou diferenças significativas, permitindo inferir que, sob o ponto de vista estatístico, os dois processos são bastante diferentes. O emprego dos modelos matemáticos aproximados permitiu avaliar de maneira satisfatória o comportamento da cinética de remoção de resíduos em cada permutador de calor.

Palavras-chave: limpeza CIP, detergente alcalino, cinética de remoção, modelo.

ABSTRACT

In this work, the behavior of the process of removing sodium hydroxide residue adhered to the internal surface of two heat exchangers, namely: shell and tube exchanger and plate exchanger. The evaluation of waste removal kinetics was performed based mathematical model developed from a transfer function. The flow velocity values were chosen based on studies published in the literature, which report the use of lower flow velocities (equal to or greater than 0.20 m/s). An alkaline detergent solution formed by sodium hydroxide at 0.5% w/w and a speed of 0.41 m/s was used for the shell and tube heat exchanger, with an operating time of 30 minutes, and a speed of 0.43 m/s for the plate heat exchanger, with an operating time of 3 minutes. The behavior of the kinetics of removal of alkaline detergent showed significant differences, allowing us to infer that, from a statistical point of view, the two processes are quite different. The use of approximate mathematical models allowed a satisfactory evaluation of the behavior of the kinetics of waste removal in each heat exchanger.

Key words: CIP cleaning, alkaline detergent, removal kinetics, model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Modelo de Sinner.....	14
Figura 2.2 - Fluxograma das etapas do sistema CIP	18
Figura 2.3 - Representação de um sistema	23
Figura 2.4 – Malha típica de controle por realimentação.....	24
Figura 2.5 – Reação de processo superamortecido a degrau.....	30
Figura 2.6 - Método da tangente para determinação dos parâmetros θ e τ do modelo	31
Figura 3.1 - Facilidades experimentais pesquisadas.....	32
Figura 4.1 - - Concentração de NaOH residual para velocidade de 0,41 m/s	36
Figura 4.2 - Concentração de NaOH residual para velocidade de 0,43 m/s	36
Figura 4.3 - Comparação da remoção dos resíduos entre os permutadores de calor	37
Figura 4.4 - Concentração de detergente alcalino para 0,41 m/s	39
Figura 4.5 - Concentração de detergente alcalino para 0,43 m/s	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Concentração normalizada de NaOH na saída do permutador Casco e Tubos	34
Tabela 4.2 - Concentração normalizada de NaOH na saída do permutador de placas	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONCLUSÃO.....	42

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, o processamento de alimentos vem proporcionando muitos benefícios à sociedade. Avanços em processos como a aplicação de calor à comida antes do consumo torna muitos alimentos mais seguros e fáceis de serem digeridos. Além disso, o processamento dos alimentos ajuda em sua conservação ao longo do tempo, permitindo que populações vulneráveis que teriam dificuldades em consumir certos nutrientes em quantidades ideais passem a ter acesso facilitado a esses alimentos. **(MONTEIRO et al., 2019; BAKER et al., 2020)**

O consumo desses alimentos industrializados vem crescendo a cada ano. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a aquisição média per capita dos alimentos industrializados foi de 2.560 kg entre os anos de 2002 e 2003, para 3.992 kg no período de 2017 a 2018, representando um aumento de 56%.

Com esse aumento, algumas das maiores preocupações da indústria alimentícia abrangem as técnicas e formas de preservação da qualidade de produção desses alimentos, a fim de que se evitem transformações químicas e biológicas indesejáveis, e afetem a qualidade do produto após sua fabricação. **(BANSAL; CHEN, 2006)**

Muito além da conservação dos produtos alimentícios após a sua fabricação, um processo produtivo deve voltar sua atenção à higienização das superfícies de seus equipamentos para que não gere a proliferação de microrganismos e substâncias indesejáveis ao processo, contaminação por produtos estranhos ou resíduos de processos anteriores **(GOZERMANO, 2007)**. O contato de alimentos com superfícies contaminadas aumenta os riscos aos quais os consumidores são expostos, além de causar problemas operacionais em equipamentos.

Em um trocador de calor, por exemplo, uma superfície mal higienizada gera a queda de rendimento na troca térmica e uma grande perda de carga no sistema, gerando prejuízos ao processo produtivo. A incrustação de trocadores de calor é um

problema em várias áreas e processos da indústria alimentícia, e custa bilhões de dólares todos os anos. Assim surge a necessidade da utilização de um processo de higienização, para que tais prejuízos sejam minimizados ou eliminados.

Vários são os processos utilizados com a finalidade de higienização de equipamentos industriais, e um dos mais utilizados é a limpeza CIP (*Clean-In-Place*), pois permite que o processo seja realizado integralmente sem que ocorra a necessidade da desmontagem dos equipamentos (**BANSAL; CHEN, 2006**).

Apesar de não necessitar da desmontagem de equipamentos, a limpeza CIP é um procedimento que requer paradas de produção e um grande gasto de água para que possa acontecer de maneira que atenda as exigências dos órgãos de vigilância sanitária. Por isso, a comunidade industrial não vem poupando esforços para que se assegure que os processos de limpeza de equipamentos sejam adequados e aderentes aos critérios estabelecidos na legislação em vigor.

No entanto, realizar um processo que atenda aos requisitos técnicos e sanitários estabelecidos exige maior quantidade de insumos (**GEDRAITE et al., 2010**). O estabelecimento do tempo adequado para se realizar um processo de higienização é fundamental não só para que haja o controle no gasto de insumos e água, mas para se possa garantir a eficiência do processo. Esse tempo deve ser suficientemente longo para que as reações químicas e as interações físicas ocorram de forma eficaz; mas não deve ser excessivo, pois isso reduziria a produtividade da indústria (**GEDRAITE, 2011**).

Um processo de higienização padrão é composto pelas seguintes etapas: pré-lavagem, que visa reduzir superficialmente os resíduos presentes nos equipamentos e tubulações; a circulação de solução detergente para remoção dos resíduos aderidos à superfície que não foram removidos na etapa anterior; enxágue, que consiste na passagem de água pelo equipamento, removendo o detergente químico utilizado e os resíduos suspensos pela ação deste detergente; e a circulação de solução com ação antimicrobiana (sanificante). As etapas estudadas neste trabalho serão: aplicação de solução do detergente e o enxágue.

Dois parâmetros importantes envolvidos nestes processos merecem ser estudados com mais detalhes: *(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 monitoração e, por isso, é 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 ainda se baseia em experiências empíricas, o que deixa 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)**.

Por isso, é fundamental que esse tipo de processo seja estudado e otimizado através do estabelecimento das cinéticas de remoção de resíduos das etapas do processo. Neste trabalho é realizada a comparação entre as cinéticas de remoção de resíduos em dois tipos distintos de permutadores de calor, a saber: permutador de placas e permutador do tipo casco e tubos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico dos processos de higienização de instalações industriais alimentícias

Desde o surgimento da civilização humana, a conservação dos alimentos foi uma das necessidades primordiais para a sobrevivência. Esta era uma atividade necessária para garantir a qualidade, durabilidade e segurança dos alimentos durante o período de inverno ou durante deslocamentos **(GEDRAITE et al., 2010)**.

Vários são os tipos de sistemas de conservação dos alimentos desenvolvidos ao longo dos séculos, como a cura, defumação, desidratação, congelamento etc. A partir do século 19, após os trabalhos desenvolvidos por Louis Pasteur, passou-se a aplicar técnicas de aquecimento de alimentos a uma temperatura específica por um determinado período de tempo e técnicas de embalagem à vácuo, mantendo-os hermeticamente selados para evitar a entrada de ar e de microrganismos.

Com o advento da era industrial, a indústria alimentícia exigiu cada vez mais metodologias que aliassem grandes volumes de produção à alta precisão e tecnologia. Os alimentos passaram a ser processados e vários processos foram criados para sua elaboração, manuseio, conservação e transporte. O processamento dos alimentos por máquinas levou à necessidade do desenvolvimento de técnicas de limpeza após o seu uso, de forma que não deixassem resíduos em locais onde pudesse ocorrer a proliferação de microrganismos que contaminassem outros alimentos a serem processados posteriormente. **(SISLIAN et al., 2012)**.

A convivência com microrganismos é inevitável, pois todos os animais, incluindo os seres humanos dependem de associações simbióticas com bactérias para sua sobrevivência. Contudo, na indústria alimentícia, é desejável que seja realizado o controle desses microrganismo para que se evite a contaminação do

produto, a diminuição da vida de prateleira e a destruição ou reprocessamento da matéria do processo produtivo.

Os sistemas de limpeza são adaptáveis às várias áreas da planta de produção e, no início de sua utilização, eram realizados manualmente. Processos manuais ainda são utilizados em instalações industriais de pequeno porte. Nestes casos, é vital que haja uma acurada atenção nos detalhes, pois, devido a razões de qualidade, saúde e segurança, somente soluções químicas brandas e frias podem ser utilizadas.

2.2 Processo de Higienização

A limpeza, esterilização ou desinfecção de qualquer item ou equipamento em uma instalação industrial deve ser realizada com máximo cuidado, atenção e eficácia para assegurar a qualidade do produto final. De acordo com o modelo de Sinner, representado pela Figura 2.1, a eficiência de um processo ideal de higienização e limpeza de um equipamento é uma sinergia entre a ação mecânica, a ação química (detergência), a temperatura e o tempo (**FORNI, 2007**).

Figura 2.1 – Modelo de Sinner



Fonte: **SPSP (2022)**

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)**. Mas, essas técnicas de limpeza utilizadas em laboratório são inviáveis na maioria das instalações industriais devido ao grande volume de produção e ao tempo para realização desse tipo de limpeza. Os vasos, equipamentos e tubulações devem ser limpos no local onde estão instalados. O processo CIP é um dos processos de limpeza mais utilizados por não haver tal necessidade de desmontagem dos equipamentos e assegurar que as tubulações e os equipamentos estejam livres de contaminantes de qualquer natureza.

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 detergentes e sanitizantes em concentrações pré-determinadas. As soluções são circuladas no sistema a ser limpo e sanitizado por tempos e sequências pré-definidas. Dependendo da aplicação pode ser acrescentado o uso de vapor de água para aquecimento na sequência acima **(GEDRAITE, 2011)**.

Alguns fatores importantes devem ser levados em consideração na elaboração de 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 odores, sabores ou compostos tóxicos ao produto. Deve-se evitar que metais diferentes entrem em contato entre si, pois com a presença de eletrólitos é possível que haja a ocorrência de um 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 cavidades e reentrâncias onde possa ocorrer o desenvolvimento de microrganismos.

A FDA (*Food and Drug Administration*), agência reguladora do governo dos Estados Unidos que tem como objetivo proteger a saúde pública garantindo a segurança e eficácia dos alimentos, medicamentos e outros, recomenda que, para a indústria alimentícia “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”.

Um fator muito importante e que deve ser levado em consideração na escolha dos equipamentos e tubulações é o acabamento de suas superfícies, pois os depósitos indesejados de materiais têm maior aderência em superfícies mais rugosas do que em superfícies lisas. Portanto, as superfícies dos equipamentos devem ser lisas, para que facilitem a remoção de tais depósitos. O acabamento sanitário padrão para os equipamentos usados na indústria alimentícia exige valores de *Ra* (medida do acabamento de uma superfície) inferiores a 1 μm . O *Ra* representa a média ponderada da altura das irregularidades da superfície.

Um sistema CIP eficiente utiliza produtos de limpeza e sanitização apropriados para cada aplicação e equipamento, e um mesmo produto não é adequado para todos os usos. Produtos ideais para o processo 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 solúveis (**MARRIOT, 1994**).

De acordo com **Maddox (1994)**, para que um sistema de limpeza e sanitização seja eficiente, deverão ser disponibilizados um suprimento adequado de água de boa qualidade (potável), o detergente e o sanitizante correto para a aplicação e um procedimento de limpeza adequado.

A função do detergente é a remoção da sujeira (que pode ser um resíduo orgânico ou minerais aderidos na superfície), 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, reduzindo o número de patogênicos para um número considerado seguro `saúde humana **(MADDOX, 1994)**.

O processo de limpeza CIP pode ser executado tanto de forma manual como de forma automática. Nos processos executados de forma manual, o operador do processo executa as manobras necessárias nas válvulas dos equipamentos, bem como o controle dos parâmetros do processo: 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 et al., 2010)**.

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

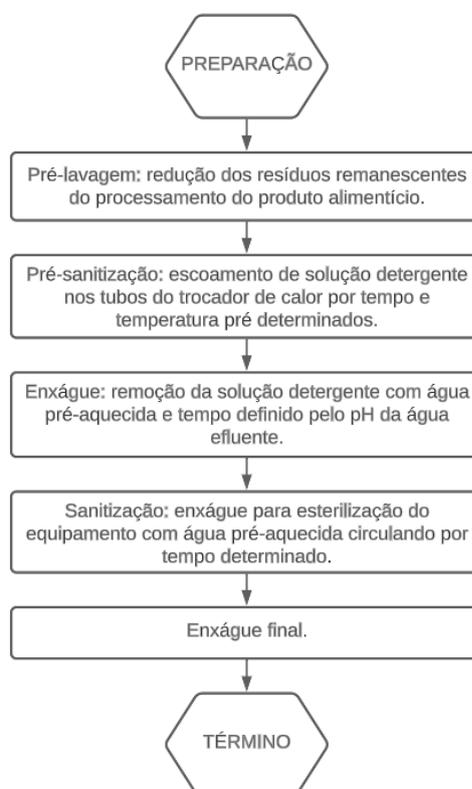
Segundo **Marriot (1994)**, a automação do processo possui vantagens e desvantagens sobre o processo manual. As vantagens do processo automatizado em relação ao processo manual são a confiabilidade de que todas as etapas foram realmente cumpridas e de que os tempos das etapas foram obedecidos. Além disso, há a possibilidade de obter-se registros das atividades para efeito de fiscalização e ISO 9000. O processo automatizado também reduz a mão de obra (redução de custos), conserva melhor as soluções utilizadas na limpeza, e proporciona melhoria na higiene, devido ao melhor controle das operações, e na utilização dos

equipamentos, pois estes podem ser higienizados imediatamente após o uso, permitindo o início de uma nova batelada (**GEDRAITE, 2011**).

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

O sistema CIP de limpeza envolve as etapas representadas no fluxograma ilustrado na **Figura 2.2**. A operação de um sistema Clean-in-place pode ser descrita pelo processo de fazer circular água e soluções químicas de limpeza pelas superfícies internas dos equipamentos, tubulações e tanques.

Figura 2.2 - Fluxograma das etapas do sistema CIP



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

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

A segunda etapa consiste na pré-lavagem. Quando verificada a necessidade, realiza-se o pré-aquecimento da água de pré-enxágue para evitar que ocorra um choque térmico no sistema a ser limpo. O aquecimento é feito até a temperatura típica de 50°C. É realizada a pré-lavagem e a água recuperada é 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, então, descartada.

A terceira etapa é a pré-sanitização: é realizada a limpeza do equipamento desejado com uma solução alcalina detergente proveniente do tanque de hidróxido de sódio quente. Nesta etapa, a solução de hidróxido de sódio previamente preparada na etapa 1 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 equipamento. Posteriormente, a solução retorna ao tanque de hidróxido de sódio quente (CIP de sistema fechado) para reaproveitamento da solução. Em alguns sistemas, dependendo do tipo de sujidade (caso ofereça riscos patogênicos ou de contaminação), é realizado o descarte da solução efluente (CIP de sistema aberto).

A quarta etapa consiste no enxágue 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 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.

Após a passagem da água de enxague, é feita a 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, caracterizando um sistema de limpeza dito completo. 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.

Realiza-se, então, outro enxágue intermediário com água tratada proveniente da rede de utilidades visando remover a solução ácida do sistema. Este enxágue intermediário da etapa ácida é normalmente realizado à temperatura ambiente, com o objetivo de não volatilizar o sanitizante. Semelhantemente 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 quinta etapa consiste na passagem da solução de sanitizante em 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 é realizado um enxágue com a passagem de água a temperatura ambiente para que sejam retirados resíduos do sanitizante dos equipamentos antes de reiniciar a produção. Por haver desgaste nas partes de borracha de válvulas e bombas, nem sempre a etapa ácida do CIP é aplicada, 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**).

2.3 Controle do Processo

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 (2016)**, 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 conseqüente 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, com a necessidade da aprimoração de processos fabris, 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.

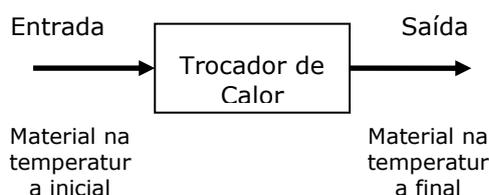
Há bem pouco tempo atrás, o controle de processo era feito apenas por sistemas com realimentação simples, até porque o custo para automação de processos inviabilizava a tentativa de controles mais elaborados. A evolução da engenharia eletrônica, que tornou os componentes utilizados nos controladores e equipamentos menores e com custos mais baixos, e da engenharia de sistemas de informação, contribuiu 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 seqüência 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 2.3**, para definir um sistema a ser modelado ou controlado (**AGUIRRE, 2015**).

Figura 2.3 - Representação de um sistema



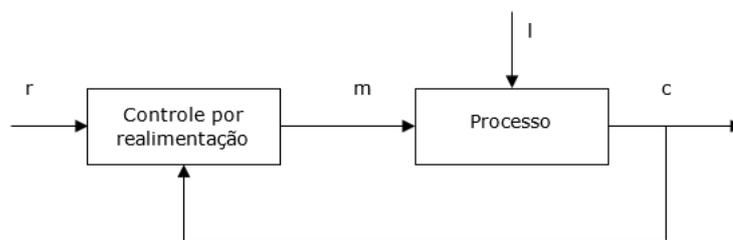
Fonte: adaptado de **AGUIRRE (2015)**

A representação apresentada na **Figura 2.3** 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 2.4** pode-se observar um sistema típico de malha fechada de controle por realimentação.

Figura 2.4 – 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

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).

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, 2016)**.

Antes de discorrer sobre o modelamento matemático de processos, será 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, 2015)**.

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 (τ) 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, 2015)**.

2.4 Modelos Matemáticos

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, 2016)**.

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, 2016)**.

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, 2015**).

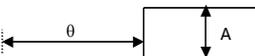
A identificação não-paramétrica emprega basicamente curvas de resposta do processo quando excitados por sinais de entrada do tipo degrau, impulso ou senoidal. A partir dessas curvas, podem-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo. Esses modelos 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, 2016**).

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: a autora

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**).

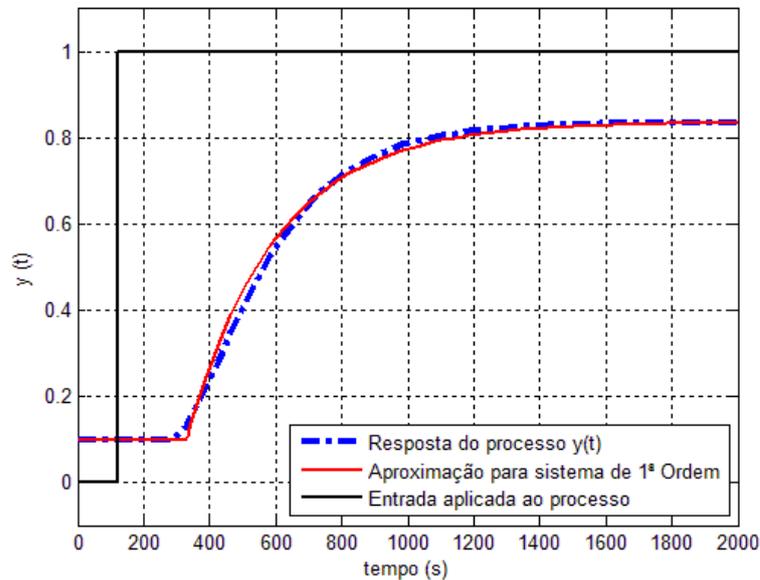
$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad (2.1)$$

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 2.5** 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 2.5 – Reação de processo superamortecido a degrau

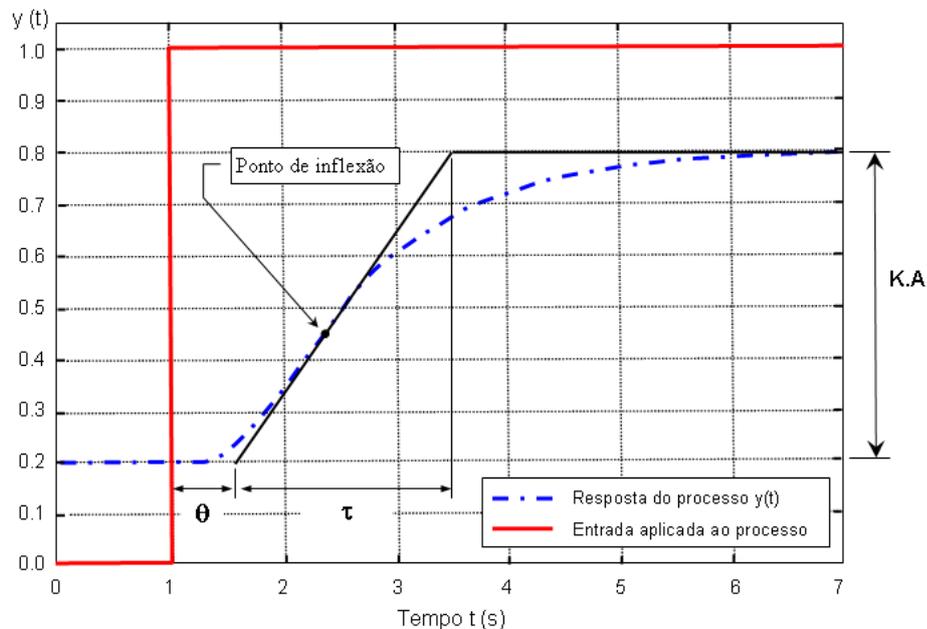


Existem diversos métodos de se determinar os parâmetros θ e τ do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto, a saber: *i)*- Método da Tangente, *ii)*- Método de Miller, *iii)*- Método de Smith e *iv)*- Método de Sundaresan e Krishnaswamy (**GARCIA, 2005**). Nesta monografia, será 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 2.6**.

O tempo morto θ 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 2.6**.

Figura 2.6 - Método da tangente para determinação dos parâmetros θ e τ 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 θ e de τ . A constante de tempo τ 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

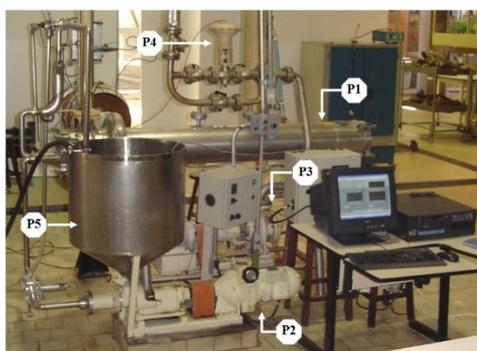
3.1 Materiais Utilizados

Para elaboração deste trabalho foram utilizados um computador portátil de processador Intel(R)™ Core 2 Duo, CPU T5750 2.00GHz, um aplicativo tipo planilha eletrônica (optou-se pelo uso do editor de planilhas Excel™ da Microsoft™) e o conjunto de resultados experimentais obtidos por **Sousa et al. (2017)** e por **Alvares et al. (2015)**.

3.2 Metodologia Empregada

Os valores experimentais de concentração de resíduo de detergente alcalino presente na solução efluente de cada permutador de calor em função do tempo foram coletados por **Sousa et al. (2017)** e por **Alvares et al. (2015)**, empregando duas facilidades experimentais diferentes, como mostrado na **Figura 3.1**.

Figura 3.1 - Facilidades experimentais pesquisadas



Permutador casco e tubos



Permutador de placas

Fonte: adaptado de **Sousa et al. (2017)** e de **Alvares et al. (2015)**

Foi considerado que o valor de velocidade de escoamento do fluido fosse igual ou superior àquela utilizada por **Chen et al (2004)**, ou seja, $0,20 \text{ m/s}$. Após a definição do valor da velocidade de escoamento do fluido de limpeza (solução de hidróxido de sódio), realizou-se a passagem do detergente pelas duas unidades experimentais: uma composta de um trocador de calor tipo casco e tubos, e outra composta de um trocador de calor de placas. A solução de NaOH utilizada nas baterias dos experimentos foi preparada com concentração de 0,5 % em massa (**GORMEZANO, 2007**).

Os ensaios de remoção dos resíduos de detergente alcalino realizados por **Sousa et al. (2017)** e por **Alvares et al. (2015)** consistiram no escoamento da água de lavagem através dos permutadores de calor com velocidades aproximadamente iguais a $0,4 \text{ m/s}$, por intervalos de tempo diferentes. O tempo de lavagem para o permutador casco e tubos foi de aproximadamente 30 minutos e o tempo de lavagem para o permutador de placas foi de aproximadamente 3 minutos. As amostras da solução efluente da seção de testes tiveram a concentração de detergente residual medidas em tempo real, com intervalo de tempo entre as coletas de amostras de 1 segundo aproximadamente.

Os modelos matemáticos aproximados das cinéticas de remoção dos resíduos foram identificados com base na metodologia proposta pelo método da tangente, já apresentado na seção 2.4 deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da concentração em função do tempo

Na **Tabela 4.1**, são apresentados os primeiros 91 valores de concentração normalizada, obtidos por **Sousa et al. (2017)**, acerca dos resultados relativos ao comportamento temporal da variação da concentração residual da solução de hidróxido de sódio na corrente de processo que deixa o permutador de calor casco e tubos, com a velocidade de **0,41 m/s**. A tabela completa é apresentada no **Anexo A**.

Tabela 4.1 - Concentração normalizada de NaOH na saída do **permutador Casco e Tubos**

t (seg.)	Conc. (adim.)						
0	1,00	23	1,00	46	1,00	69	1,00
1	1,00	24	1,00	47	1,00	70	1,00
2	1,00	25	1,00	48	1,00	71	1,00
3	1,00	26	1,00	49	1,00	72	1,00
4	1,00	27	1,00	50	1,00	73	1,00
5	1,00	28	1,00	51	1,00	74	1,00
6	1,00	29	1,00	52	1,00	75	1,00
7	1,00	30	1,00	53	1,00	76	1,00
8	1,00	31	1,00	54	1,00	77	1,00
9	1,00	32	1,00	55	1,00	78	1,00
10	1,00	33	1,00	56	1,00	79	1,00
11	1,00	34	1,00	57	1,00	80	1,00
12	1,00	35	1,00	58	1,00	81	0,99
13	1,00	36	1,00	59	1,00	82	0,99
14	1,00	37	1,00	60	1,00	83	0,99
15	1,00	38	1,00	61	1,00	84	0,99
16	1,00	39	1,00	62	1,00	85	0,99
17	1,00	40	1,00	63	1,00	86	0,99
18	1,00	41	1,00	64	1,00	87	0,99
19	1,00	42	1,00	65	1,00	88	0,99
20	1,00	43	1,00	66	1,00	89	0,99
21	1,00	44	1,00	67	1,00	90	0,99
22	1,00	45	1,00	68	1,00	91	0,99

Na **Tabela 4.2**, são apresentados os primeiros 91 valores de concentração normalizada, obtidos por **Alvares et al. (2015)**, acerca dos resultados relativos ao comportamento temporal da variação da concentração residual da solução de hidróxido de sódio na corrente de processo que deixa o permutador de calor de placas, com a velocidade de **0,43 m/s**. A tabela completa é apresentada no **Anexo A**.

Tabela 4.2 - Concentração normalizada de NaOH na saída do **permutador de placas**

t (seg.)	Conc. (adim.)						
0	1,00	23	0,99	46	0,98	69	0,98
1	0,97	24	1,00	47	0,97	70	0,98
2	0,98	25	0,98	48	0,96	71	0,95
3	0,94	26	0,95	49	0,96	72	0,94
4	0,94	27	0,97	50	0,97	73	0,97
5	0,99	28	0,99	51	0,99	74	1,00
6	0,98	29	0,98	52	1,01	75	1,00
7	0,95	30	0,95	53	0,97	76	1,01
8	0,98	31	0,96	54	0,93	77	0,95
9	0,99	32	0,98	55	0,97	78	0,95
10	0,99	33	1,02	56	1,01	79	1,01
11	0,98	34	1,00	57	1,01	80	0,97
12	0,96	35	0,95	58	0,94	81	0,93
13	0,94	36	0,95	59	0,97	82	0,97
14	0,99	37	0,99	60	1,02	83	1,00
15	1,00	38	0,96	61	0,99	84	0,98
16	0,95	39	0,95	62	0,94	85	0,99
17	0,98	40	0,97	63	0,95	86	0,96
18	1,01	41	1,00	64	0,98	87	0,95
19	0,98	42	0,98	65	0,98	88	0,93
20	0,95	43	0,97	66	0,97	89	0,93
21	0,95	44	0,97	67	0,99	90	0,93
22	0,98	45	0,96	68	0,97	91	0,92

Com base nos valores apresentados na **Tabela 4.2** e na **Tabela 4.3** acima, foram construídos os gráficos apresentados na **Figura 4.1** e **Figura 4.2**, respectivamente. Estas ilustram o comportamento temporal das concentrações normalizadas de resíduo de solução de NaOH presentes na corrente de processo efluente de cada permutador de calor estudado para as velocidades consideradas.

Figura 4.1 - - Concentração de NaOH residual para velocidade de **0,41 m/s**

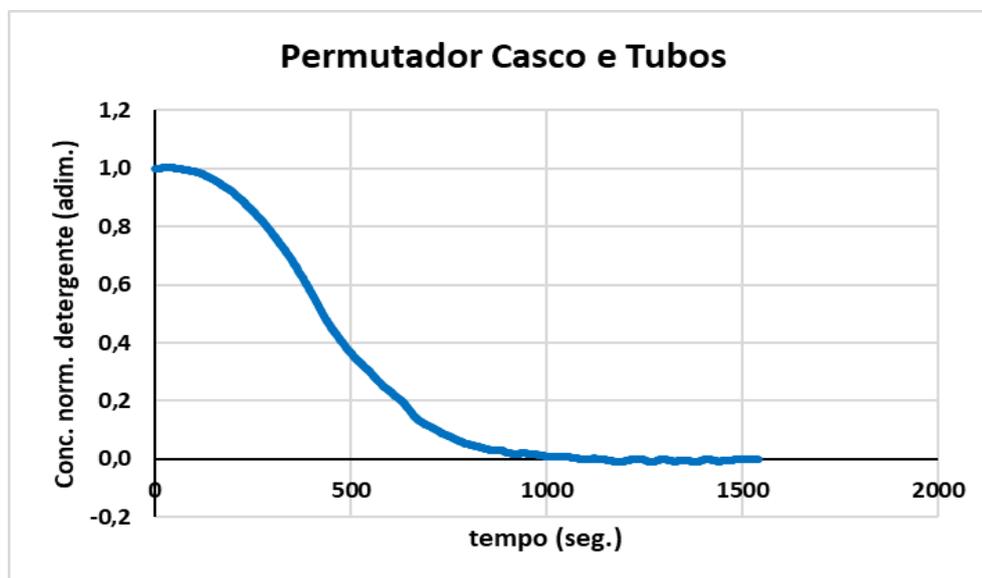
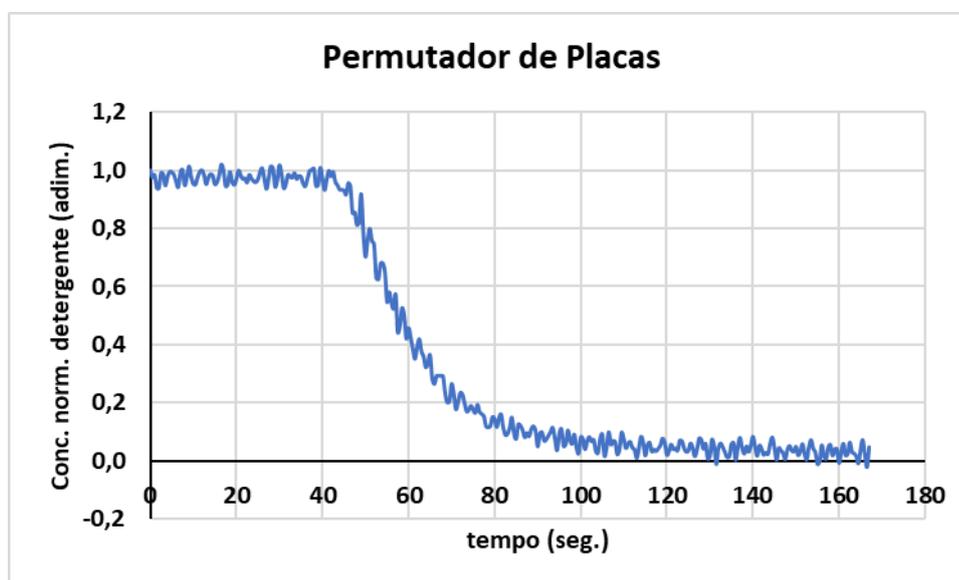


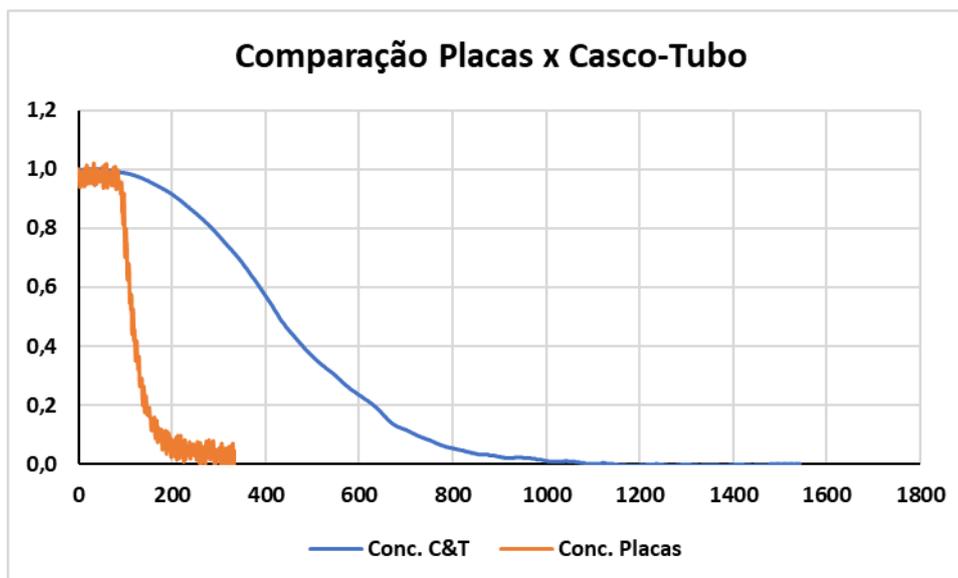
Figura 4.2 - Concentração de NaOH residual para velocidade de **0,43 m/s**



É importante destacar que para fins de comparação do comportamento da cinética de remoção considerando os dois permutadores de calor estudados, foi necessário normalizar os valores experimentais de concentração de resíduo de NaOH presentes na saída de cada um. O resultado da comparação é apresentado na **Figura 4.3**. Apesar dos cuidados adotados por **Sousa et al. (2017)** e por **Alvares et al. (2015)**

nas etapas de incrustação e de remoção dos resíduos de detergente alcalino (solução de NaOH), durante a realização dos experimentos, é praticamente impossível garantir níveis de incrustação idênticos entre ambos (**BRASILEIRO, 2021**).

Figura 4.3 - Comparação da remoção dos resíduos entre os permutadores de calor



Pode-se observar que as duas cinéticas de remoção apresentam comportamentos coerentes com o esperado, decaindo ao longo do tempo. No que diz respeito à velocidade de decaimento da concentração nos trechos iniciais das curvas de concentração normalizada, percebe-se que a remoção dos resíduos de detergente foi bem mais rápida no permutador de placas. Esta constatação nos permite inferir que os valores de velocidade utilizados – apesar de serem praticamente idênticos – apresentaram comportamentos bastante distintos na remoção dos resíduos.

Uma possível explicação para este comportamento poderia residir na turbulência provocada pelo fluido ao escoar no interior de cada permutador de calor. Os ressaltos existentes nas placas do permutador de placas, associados com a proximidade entre as placas, faz com que a turbulência no interior dos caminhos por onde a água de enxágue escoar seja muito maior do que aquela causada no interior dos tubos do permutador casco e tubos.

4.2 Identificação dos modelos das cinéticas de remoção

Para que se possa quantificar o desempenho de cada cinética de remoção dos resíduos de detergente em cada permutador de calor, podem ser utilizados modelos matemáticos aproximados obtidos a partir da curva de reação do processo, conforme citado no **Capítulo 2** desta monografia.

O modelo matemático aproximado identificado para o permutador de calor tipo casco e tubos, com velocidade de escoamento da água de lavagem igual a $0,41 \text{ m/s}$ é apresentado na **Equação (4.1)** e o correspondente ao permutador de calor tipo placas, com velocidade de escoamento da água de lavagem igual a $0,43 \text{ m/s}$ é apresentado na **Equação (4.2)**. Estes modelos são baseados nas funções de transferência correspondentes a cada caso estudado.

$$\frac{C(s)[\text{adim.}]}{v(s)\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]} = \frac{-2,44}{(205 \cdot s + 1)} \cdot e^{-280 \cdot s} \quad (4.1)$$

$$\frac{C(s)[\text{adim.}]}{v(s)\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]} = \frac{-2,37}{18 \cdot s + 1} \cdot e^{-45 \cdot s} \quad (4.2)$$

Com base na **Equação (4.1)** e na **Equação (4.2)** foram construídos os gráficos apresentados na **Figura 4.4** e **Figura 4.5**, respectivamente. Estes ilustram o comportamento temporal das concentrações normalizada de resíduo de detergente alcalino presente na água de enxágue efluente dos permutadores de calor estudados para cada uma das velocidades consideradas.

O valor do parâmetro **ganho** identificado para cada modelo representa o quanto a concentração normalizada varia por unidade de velocidade de escoamento. Em resumo, representa fisicamente a capacidade de remoção que a velocidade de escoamento é capaz de promover. Pode-se verificar que ambos os valores encontrados para o parâmetro **ganho** foram bastante próximos para os dois tipos de permutadores de calor estudados. Este resultado era esperado, haja vista o fato de

que as velocidades de escoamento da água de enxágue são praticamente idênticas e o intervalo de variação das concentrações foi normalizado.

Figura 4.4 - Concentração de detergente alcalino para $0,41 \text{ m/s}$

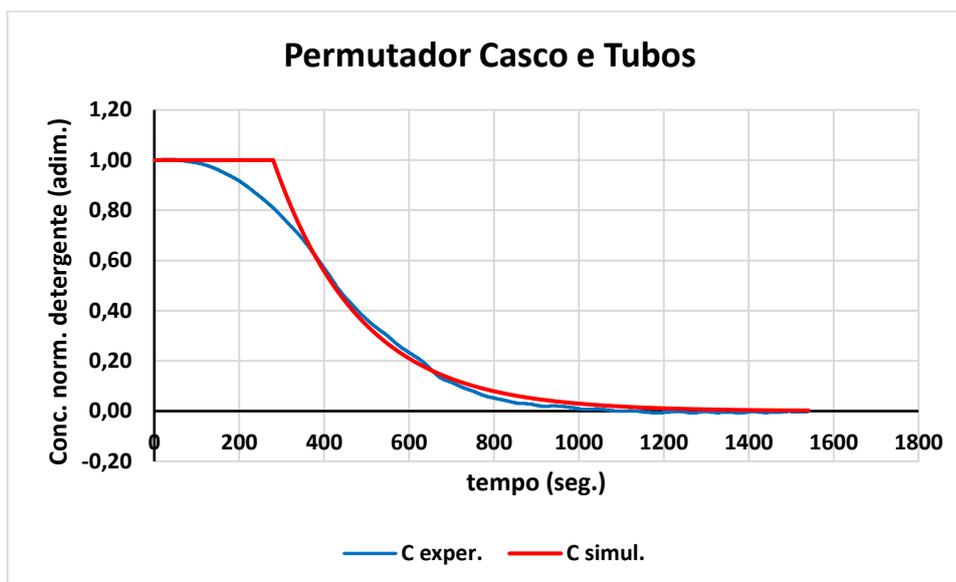
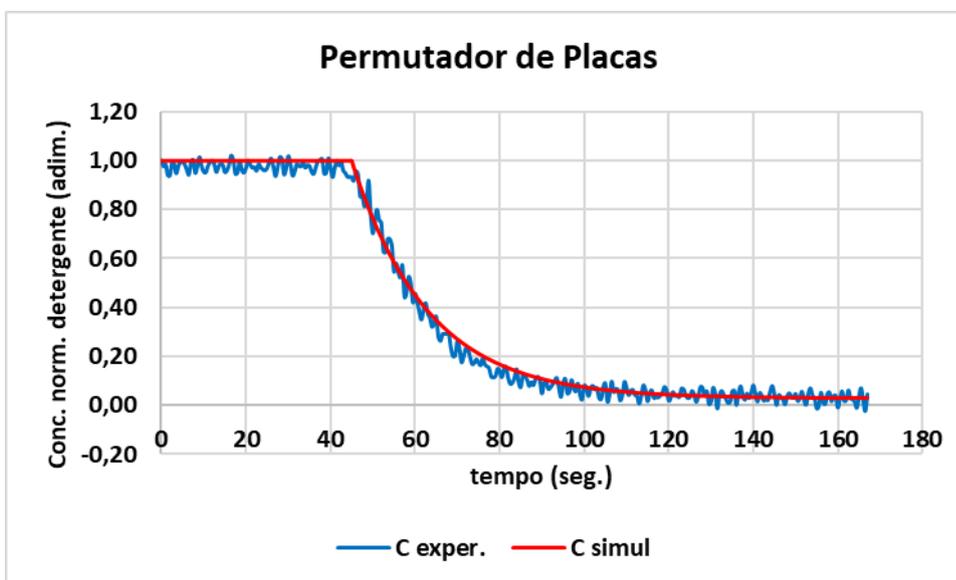


Figura 4.5 - Concentração de detergente alcalino para $0,43 \text{ m/s}$



O valor do parâmetro **constante de tempo** identificado para cada modelo representa o tempo que a concentração normalizada leva para alcançar 63,2% da variação total para cada permutador de calor testado. Em resumo, representa

fisicamente o tempo de resposta da concentração de resíduos de solução detergente alcalino para cada permutador de calor.

Os valores obtidos para este parâmetro indicam que as cinéticas de remoção tiveram velocidades de remoção bastante distintas, apesar do fato de os valores das velocidades de escoamento da água de enxágue serem muito próximos. Assim, a **constante de tempo** para o permutador de placas (18 *seg.*) foi muito inferior à constante de tempo para o permutador casco e tubos (205 *seg.*).

Neste ponto reside um paradoxo que não pôde ser respondido de maneira segura com a realização deste trabalho, a saber: se os ganhos dos modelos foram praticamente idênticos, como explicar a questão de os tempos de lavagem identificados em cada modelo serem tão diferentes? Isto não deveria acontecer, considerando que as velocidades de escoamento da água de lavagem são praticamente iguais, o que resultou em um ganho praticamente idêntico nos dois modelos.

O fato que provavelmente dificultou a correta interpretação do resultado foi a normalização dos valores das concentrações. Entretanto, o comportamento dos tempos de resposta apresentados pelos modelos identificados traz uma luz sobre o assunto, permitindo inferir que a turbulência causada pelo escoamento da água de lavagem no interior do permutador de placas seja muito maior do que a turbulência gerada no permutador do tipo casco e tubos. Por este motivo, a concentração de resíduo de detergente decai muito mais rapidamente no permutador de placas. Assim, pode-se inferir que os ganhos de cada modelo identificado sejam – na realidade – diferentes.

O último parâmetro identificado em cada modelo da cinética de remoção dos resíduos de detergente alcalino foi o **tempo morto**. Este parâmetro está relacionado com a demora do processo em começar a variar a concentração após o início da operação de lavagem. Na realidade, este parâmetro não foi adequadamente avaliado nos trabalhos utilizados para embasar esta monografia, não se dispo de

informações que permitissem avaliar criteriosamente o valor identificado para o **tempo morto**.

Sabe-se que a posição na qual o medidor de concentração foi montado influencia de maneira significativa o valor calculado para o **tempo morto**. Como não se dispõe desta informação, foi assumido que o valor identificado representa aproximadamente o tempo que a água de lavagem que deixa cada permutador de calor leva para alcançar o sensor.

Considerando o anteriormente exposto, pode-se afirmar – correndo o risco de uma generalização equivocada – que o sensor montado no permutador casco e tubos estaria localizado em um ponto mais distante em relação ao bocal de saída do que o sensor montado no permutador tipo placas. Esta interpretação apresenta coerência, dado que um permutador de placas é bem mais compacto que um permutador casco e tubos. Por este motivo o **tempo morto** apresentado por seu modelo (280 *seg.*) foi muito superior ao **tempo morto** apresentado pelo modelo do permutador de placas (45 *seg.*).

Uma possível interpretação alternativa seria a de que dadas as dimensões típicas de um permutador casco e tubos, a água de lavagem levaria mais tempo para percorrer o seu interior, em comparação com um permutador de placas.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho feita a avaliação do comportamento da cinética de remoção de resíduos de detergente alcalino à base de hidróxido de sódio, com concentração igual a 0,5% *m/m*, empregando água de enxágue e utilizando informações disponíveis na literatura.

O emprego do valor de velocidade de escoamento da água de enxágue adotado para a realização do estudo mostrou que o comportamento da cinética de remoção apresentou diferenças significativas, permitindo inferir que, sob o ponto de vista estatístico, os dois processos são bastante diferentes. Deve ser destacado que os resultados obtidos apresentam pouca variabilidade nos valores de concentração, em decorrência da amostragem eletrônica dos valores de concentração permitindo caracterizar adequadamente a cinética de remoção.

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

Sob a ótica da economia de insumos no processo de limpeza CIP, seria mais interessante utilizar nos processos industriais um trocador de calor do tipo placas, pois este equipamento possibilitou uma remoção dos resíduos de detergente bem mais rápida. Sugere-se também a utilização de menores velocidades de escoamento, permitindo a utilização de um menor volume de água em cada batelada utilizada.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A., 2015. **Introdução à identificação de sistemas**. 3. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1616.7925>.
- ALVARES, C. A.; SILVA, G. A. P.; VIEIRA, J. S.; PINHEIRO, B. H. O; PEREIRA JR., W. V.; CAMPOS, L. L.; SILVA, G. A. P.; MARTINS, S. P.; COUTINHO FILHO, U.; e GEDRAITE, R. 2015. **Estudo comparativo da cinética de remoção de depósitos de proteína de leite usando reator tipo tanque agitado considerando diferentes condições de limpeza**. In: Anais da XX Jornada em Engenharia Química (JORNEQ – 2015). 20 a 25 de setembro de 2015, Uberlândia, MG.
- ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. 1996. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 182 p.
- ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. 1995. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. North Carolina, USA: ISA.
- BAKER P.; MACHADO P.; SANTOS T.; SIEVERT K.; BACKHOLER K.; HADJIKAKOU M.; RUSSELL C.; HUSE O.; BELL C.; SCRINIS G.; WORSLEY A.; FRIEL S.; LAWRENCE M. 2020. **Ultra-processed foods and the nutrition transition: Global, regional and national trends, food systems transformations and political economy drivers**. *Obes Rev.* 2020 Dec;21(12): e13126. <https://doi.org/10.1111/obr.13126>. Epub 2020 Aug 6. PMID: 32761763.
- BANSAL, B.; CHEN, X. D. 2006. **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. 1992. **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. 2004 **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.
- FORNI, R. 2007. **Projeto Mecânico de um Sistema de Higienização CIP**. São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia mecânica. Trabalho de Formatura.
- FRYER, P.J.; CHRISTIAN, G.K.; LIU, W. 2006. **How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning**. *International Journal of Dairy Technology*, v. 59, n. 2, pp. 76-84.

- GARCIA, C. 2005. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: EDUSP.
- GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; RIBEIRO, S.; MELERO Jr., V.; VASCONCELOS, F.; SISLIAN, R. (2010). **Experimental investigation about the milk protein based deposit removal kinetics**. In: Proceedings of *World congress on communication and arts, WCCA*, Guimarães- Portugal.
- GEDRAITE, R.; 2011. **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. 2007. **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.
- HANGOS, K. M.; CAMERON, I. 2001. **Process Modelling and Model Analysis**. San Diego, California, USA: Academic Press, 1. ed., jun. 2001.
- HARROLD, D. 2000. **Automate CIP, track pipe status**. *Control Engineering*, Dez. 2000.
- HONER, C. 1992. **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. 1975. **Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos**. *Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 43, p. 1-35, set. 1975.
- MADDOX, I. S. 1994. **Practical Sanitation in Food Industry**, USA: CRC, 184p
- MARRIOT, N. G. 1994. **Principles of Food Sanitation**. Springer Science + Business Media Inc, 416 p. New York - U.S.A.
- MONTEIRO, C. A., CANNON, G., LAWRENCE, M., COSTA LOUZADA, M. L. and PEREIRA MACHADO, P. 2019. **Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system**. Rome, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca5644en/CA5644EN.pdf> Acesso em 10 de junho de 2023.
- OGATA, K. B. 2000. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro, RJ: Prentice-Hall do Brasil.
- REED, G. H. J. 1992. **The cleaning process - some definitions of terms**. *Dairy, Food and Environmental Sanitation*, v. 12, p. 612-613, set. 1992.
- SEBORG D. E., EDGAR, T. F. and MELLINCHAMP, D. A., 2016. **Process dynamics and control**, USA: Wiley, 3rd Ed.
- SISLIAN, R.; SILVA, F.V.; GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; AUGUSTO, S. R. e MELERO JR., V. 2012. **Investigação experimental e modelagem matemática da cinética de remoção de resíduos de detergente em sistemas de limpeza CIP usando redes neuro-fuzzy**. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ – 2012). 9 a 12 de setembro de 2012, Búzios, RJ.

- SOUSA, V. G.; CARNEIRO, L. R. A.; KUNIGK, L.; CARDOSO, V. L. e GEDRAITE, R. 2017. **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.
- SPSP. 2023. **Dicas de limpeza ciclo de sinner**. Disponível em: <https://www.spsp.com.br/post/dicas-de-limpeza-ciclo-de-sinner-p40>. Acesso em: 12 de junho de 2023.
- ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. 1942. **Optimum settings for automatic controllers**. *Transactions of the ASME*, v. 64, n. 11, nov. 1942.

Anexo A

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
0	1,00	1,00	38	1,00	0,96	76	1,00	1,01
1	1,00	0,97	39	1,00	0,95	77	1,00	0,95
2	1,00	0,98	40	1,00	0,97	78	1,00	0,95
3	1,00	0,94	41	1,00	1,00	79	1,00	1,01
4	1,00	0,94	42	1,00	0,98	80	1,00	0,97
5	1,00	0,99	43	1,00	0,97	81	0,99	0,93
6	1,00	0,98	44	1,00	0,97	82	0,99	0,97
7	1,00	0,95	45	1,00	0,96	83	0,99	1,00
8	1,00	0,98	46	1,00	0,98	84	0,99	0,98
9	1,00	0,99	47	1,00	0,97	85	0,99	0,99
10	1,00	0,99	48	1,00	0,96	86	0,99	0,96
11	1,00	0,98	49	1,00	0,96	87	0,99	0,95
12	1,00	0,96	50	1,00	0,97	88	0,99	0,93
13	1,00	0,94	51	1,00	0,99	89	0,99	0,93
14	1,00	0,99	52	1,00	1,01	90	0,99	0,93
15	1,00	1,00	53	1,00	0,97	91	0,99	0,92
16	1,00	0,95	54	1,00	0,93	92	0,99	0,96
17	1,00	0,98	55	1,00	0,97	93	0,99	0,94
18	1,00	1,01	56	1,00	1,01	94	0,99	0,85
19	1,00	0,98	57	1,00	1,01	95	0,99	0,85
20	1,00	0,95	58	1,00	0,94	96	0,99	0,81
21	1,00	0,95	59	1,00	0,97	97	0,99	0,82
22	1,00	0,98	60	1,00	1,02	98	0,99	0,92
23	1,00	0,99	61	1,00	0,99	99	0,99	0,78
24	1,00	1,00	62	1,00	0,94	100	0,99	0,70
25	1,00	0,98	63	1,00	0,95	101	0,99	0,76
26	1,00	0,95	64	1,00	0,98	102	0,99	0,80
27	1,00	0,97	65	1,00	0,98	103	0,99	0,75
28	1,00	0,99	66	1,00	0,97	104	0,99	0,74
29	1,00	0,98	67	1,00	0,99	105	0,99	0,63
30	1,00	0,95	68	1,00	0,97	106	0,99	0,62
31	1,00	0,96	69	1,00	0,98	107	0,99	0,68
32	1,00	0,98	70	1,00	0,98	108	0,99	0,68
33	1,00	1,02	71	1,00	0,95	109	0,99	0,65
34	1,00	1,00	72	1,00	0,94	110	0,99	0,55
35	1,00	0,95	73	1,00	0,97	111	0,99	0,58
36	1,00	0,95	74	1,00	1,00	112	0,98	0,55
37	1,00	0,99	75	1,00	1,00	113	0,98	0,52

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
114	0,98	0,57	155	0,96	0,15	196	0,92	0,06
115	0,98	0,44	156	0,96	0,12	197	0,92	0,09
116	0,98	0,46	157	0,96	0,11	198	0,92	0,04
117	0,98	0,53	158	0,96	0,12	199	0,92	0,02
118	0,98	0,50	159	0,95	0,15	200	0,92	0,08
119	0,98	0,42	160	0,95	0,14	201	0,92	0,07
120	0,98	0,46	161	0,95	0,12	202	0,92	0,04
121	0,98	0,42	162	0,95	0,15	203	0,91	0,07
122	0,98	0,38	163	0,95	0,16	204	0,91	0,08
123	0,98	0,35	164	0,95	0,11	205	0,91	0,07
124	0,98	0,39	165	0,95	0,09	206	0,91	0,07
125	0,98	0,42	166	0,95	0,09	207	0,91	0,03
126	0,98	0,37	167	0,95	0,11	208	0,91	0,03
127	0,98	0,36	168	0,95	0,15	209	0,91	0,07
128	0,98	0,32	169	0,95	0,09	210	0,91	0,09
129	0,98	0,34	170	0,94	0,07	211	0,90	0,02
130	0,97	0,36	171	0,94	0,12	212	0,90	0,04
131	0,97	0,28	172	0,94	0,12	213	0,90	0,10
132	0,97	0,26	173	0,94	0,10	214	0,90	0,06
133	0,97	0,29	174	0,94	0,08	215	0,90	0,07
134	0,97	0,29	175	0,94	0,09	216	0,90	0,06
135	0,97	0,29	176	0,94	0,08	217	0,90	0,02
136	0,97	0,29	177	0,94	0,11	218	0,90	0,04
137	0,97	0,23	178	0,94	0,12	219	0,89	0,10
138	0,97	0,20	179	0,94	0,10	220	0,89	0,07
139	0,97	0,20	180	0,94	0,05	221	0,89	0,04
140	0,97	0,26	181	0,93	0,09	222	0,89	0,06
141	0,97	0,23	182	0,93	0,10	223	0,89	0,06
142	0,97	0,18	183	0,93	0,07	224	0,89	0,04
143	0,97	0,20	184	0,93	0,07	225	0,89	0,04
144	0,96	0,23	185	0,93	0,09	226	0,88	0,01
145	0,96	0,23	186	0,93	0,10	227	0,88	0,04
146	0,96	0,20	187	0,93	0,11	228	0,88	0,08
147	0,96	0,17	188	0,93	0,07	229	0,88	0,06
148	0,96	0,17	189	0,93	0,03	230	0,88	0,02
149	0,96	0,19	190	0,93	0,09	231	0,88	0,05
150	0,96	0,18	191	0,93	0,11	232	0,88	0,06
151	0,96	0,16	192	0,92	0,05	233	0,88	0,03
152	0,96	0,19	193	0,92	0,06	234	0,88	0,04
153	0,96	0,17	194	0,92	0,10	235	0,87	0,03
154	0,96	0,16	195	0,92	0,07	236	0,87	0,04

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
237	0,87	0,05	278	0,81	0,03	319	0,74	0,04
238	0,87	0,08	279	0,81	0,05	320	0,74	-0,01
239	0,87	0,06	280	0,81	0,08	321	0,74	0,03
240	0,87	0,02	281	0,81	0,05	322	0,74	0,06
241	0,87	0,03	282	0,81	0,02	323	0,73	0,02
242	0,86	0,06	283	0,80	0,05	324	0,73	0,02
243	0,86	0,04	284	0,80	0,04	325	0,73	0,06
244	0,86	0,04	285	0,80	0,02	326	0,73	0,03
245	0,86	0,03	286	0,80	0,03	327	0,73	0,02
246	0,86	0,07	287	0,80	0,02	328	0,73	0,01
247	0,86	0,07	288	0,80	0,06	329	0,72	-0,01
248	0,86	0,04	289	0,79	0,08	330	0,72	0,04
249	0,85	0,03	290	0,79	0,04	331	0,72	0,07
250	0,85	0,03	291	0,79	0,00	332	0,72	0,02
251	0,85	0,06	292	0,79	0,04	333	0,72	-0,02
252	0,85	0,04	293	0,79	0,03	334	0,71	0,05
253	0,85	0,01	294	0,79	0,03	335	0,71	
254	0,85	0,04	295	0,79	0,00	336	0,71	
255	0,85	0,08	296	0,78	0,04	337	0,71	
256	0,84	0,07	297	0,78	0,05	338	0,71	
257	0,84	0,04	298	0,78	0,03	339	0,71	
258	0,84	0,06	299	0,78	0,03	340	0,70	
259	0,84	0,01	300	0,78	0,05	341	0,70	
260	0,84	0,01	301	0,77	0,02	342	0,70	
261	0,84	0,07	302	0,77	0,03	343	0,70	
262	0,84	0,05	303	0,77	0,06	344	0,70	
263	0,83	-0,01	304	0,77	0,02	345	0,69	
264	0,83	0,04	305	0,77	0,00	346	0,69	
265	0,83	0,06	306	0,76	0,05	347	0,69	
266	0,83	0,04	307	0,76	0,07	348	0,69	
267	0,83	0,03	308	0,76	0,04	349	0,69	
268	0,83	0,01	309	0,76	0,03	350	0,68	
269	0,83	0,01	310	0,76	-0,01	351	0,68	
270	0,83	0,06	311	0,75	0,00	352	0,68	
271	0,82	0,06	312	0,75	0,05	353	0,68	
272	0,82	0,00	313	0,75	0,02	354	0,67	
273	0,82	0,05	314	0,75	0,01	355	0,67	
274	0,82	0,08	315	0,75	0,05	356	0,67	
275	0,82	0,04	316	0,75	0,05	357	0,67	
276	0,82	0,02	317	0,75	0,02	358	0,67	
277	0,81	0,05	318	0,74	0,04	359	0,67	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
360	0,66		401	0,57		442	0,47	
361	0,66		402	0,57		443	0,47	
362	0,66		403	0,56		444	0,46	
363	0,66		404	0,56		445	0,46	
364	0,65		405	0,56		446	0,46	
365	0,65		406	0,56		447	0,46	
366	0,65		407	0,55		448	0,46	
367	0,65		408	0,55		449	0,46	
368	0,64		409	0,55		450	0,45	
369	0,64		410	0,55		451	0,45	
370	0,64		411	0,54		452	0,45	
371	0,64		412	0,54		453	0,45	
372	0,63		413	0,54		454	0,45	
373	0,63		414	0,54		455	0,44	
374	0,63		415	0,54		456	0,44	
375	0,63		416	0,53		457	0,44	
376	0,63		417	0,53		458	0,44	
377	0,63		418	0,53		459	0,44	
378	0,62		419	0,52		460	0,44	
379	0,62		420	0,52		461	0,43	
380	0,62		421	0,52		462	0,43	
381	0,62		422	0,52		463	0,43	
382	0,61		423	0,51		464	0,43	
383	0,61		424	0,51		465	0,43	
384	0,61		425	0,51		466	0,42	
385	0,61		426	0,51		467	0,42	
386	0,60		427	0,50		468	0,42	
387	0,60		428	0,50		469	0,42	
388	0,60		429	0,50		470	0,42	
389	0,60		430	0,50		471	0,42	
390	0,59		431	0,49		472	0,41	
391	0,59		432	0,49		473	0,41	
392	0,59		433	0,49		474	0,41	
393	0,59		434	0,49		475	0,41	
394	0,58		435	0,48		476	0,41	
395	0,58		436	0,48		477	0,40	
396	0,58		437	0,48		478	0,40	
397	0,58		438	0,48		479	0,40	
398	0,58		439	0,48		480	0,40	
399	0,57		440	0,47		481	0,40	
400	0,57		441	0,47		482	0,39	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
483	0,39		524	0,33		565	0,28	
484	0,39		525	0,33		566	0,27	
485	0,39		526	0,33		567	0,27	
486	0,39		527	0,33		568	0,27	
487	0,39		528	0,33		569	0,27	
488	0,38		529	0,33		570	0,27	
489	0,38		530	0,32		571	0,27	
490	0,38		531	0,32		572	0,27	
491	0,38		532	0,32		573	0,26	
492	0,38		533	0,32		574	0,26	
493	0,38		534	0,32		575	0,26	
494	0,38		535	0,32		576	0,26	
495	0,37		536	0,32		577	0,26	
496	0,37		537	0,32		578	0,26	
497	0,37		538	0,31		579	0,26	
498	0,37		539	0,31		580	0,25	
499	0,37		540	0,31		581	0,25	
500	0,37		541	0,31		582	0,25	
501	0,36		542	0,31		583	0,25	
502	0,36		543	0,31		584	0,25	
503	0,36		544	0,31		585	0,25	
504	0,36		545	0,31		586	0,25	
505	0,36		546	0,30		587	0,25	
506	0,36		547	0,30		588	0,25	
507	0,35		548	0,30		589	0,25	
508	0,35		549	0,30		590	0,25	
509	0,35		550	0,30		591	0,24	
510	0,35		551	0,30		592	0,24	
511	0,35		552	0,29		593	0,24	
512	0,35		553	0,29		594	0,24	
513	0,35		554	0,29		595	0,24	
514	0,34		555	0,29		596	0,24	
515	0,34		556	0,29		597	0,24	
516	0,34		557	0,29		598	0,24	
517	0,34		558	0,29		599	0,23	
518	0,34		559	0,29		600	0,23	
519	0,34		560	0,28		601	0,23	
520	0,34		561	0,28		602	0,23	
521	0,33		562	0,28		603	0,23	
522	0,33		563	0,28		604	0,23	
523	0,33		564	0,28		605	0,23	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
606	0,23		647	0,17		688	0,12	
607	0,23		648	0,17		689	0,12	
608	0,22		649	0,17		690	0,12	
609	0,22		650	0,17		691	0,12	
610	0,22		651	0,17		692	0,12	
611	0,22		652	0,17		693	0,12	
612	0,22		653	0,16		694	0,12	
613	0,22		654	0,16		695	0,12	
614	0,22		655	0,16		696	0,12	
615	0,22		656	0,16		697	0,12	
616	0,22		657	0,16		698	0,12	
617	0,21		658	0,16		699	0,12	
618	0,21		659	0,15		700	0,12	
619	0,21		660	0,15		701	0,11	
620	0,21		661	0,15		702	0,11	
621	0,21		662	0,15		703	0,11	
622	0,21		663	0,15		704	0,11	
623	0,21		664	0,15		705	0,11	
624	0,21		665	0,14		706	0,11	
625	0,21		666	0,14		707	0,11	
626	0,21		667	0,14		708	0,11	
627	0,20		668	0,14		709	0,11	
628	0,20		669	0,14		710	0,11	
629	0,20		670	0,14		711	0,11	
630	0,20		671	0,14		712	0,11	
631	0,20		672	0,13		713	0,10	
632	0,20		673	0,13		714	0,10	
633	0,20		674	0,13		715	0,10	
634	0,19		675	0,13		716	0,10	
635	0,19		676	0,13		717	0,10	
636	0,19		677	0,13		718	0,10	
637	0,19		678	0,13		719	0,10	
638	0,19		679	0,13		720	0,10	
639	0,19		680	0,13		721	0,10	
640	0,19		681	0,13		722	0,10	
641	0,18		682	0,13		723	0,10	
642	0,18		683	0,13		724	0,10	
643	0,18		684	0,13		725	0,09	
644	0,18		685	0,12		726	0,09	
645	0,18		686	0,12		727	0,09	
646	0,18		687	0,12		728	0,09	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
729	0,09		770	0,07		811	0,05	
730	0,09		771	0,07		812	0,05	
731	0,09		772	0,06		813	0,05	
732	0,09		773	0,06		814	0,05	
733	0,09		774	0,06		815	0,05	
734	0,09		775	0,06		816	0,05	
735	0,09		776	0,06		817	0,04	
736	0,09		777	0,06		818	0,04	
737	0,09		778	0,06		819	0,04	
738	0,09		779	0,06		820	0,04	
739	0,09		780	0,06		821	0,04	
740	0,08		781	0,06		822	0,04	
741	0,08		782	0,06		823	0,04	
742	0,08		783	0,06		824	0,04	
743	0,08		784	0,06		825	0,04	
744	0,08		785	0,06		826	0,04	
745	0,08		786	0,06		827	0,04	
746	0,08		787	0,06		828	0,04	
747	0,08		788	0,06		829	0,04	
748	0,08		789	0,06		830	0,04	
749	0,08		790	0,06		831	0,04	
750	0,08		791	0,05		832	0,04	
751	0,08		792	0,05		833	0,04	
752	0,08		793	0,05		834	0,04	
753	0,08		794	0,05		835	0,04	
754	0,08		795	0,05		836	0,04	
755	0,08		796	0,05		837	0,04	
756	0,08		797	0,05		838	0,04	
757	0,08		798	0,05		839	0,04	
758	0,08		799	0,05		840	0,04	
759	0,07		800	0,05		841	0,04	
760	0,07		801	0,05		842	0,04	
761	0,07		802	0,05		843	0,04	
762	0,07		803	0,05		844	0,04	
763	0,07		804	0,05		845	0,04	
764	0,07		805	0,05		846	0,04	
765	0,07		806	0,05		847	0,04	
766	0,07		807	0,05		848	0,03	
767	0,07		808	0,05		849	0,03	
768	0,07		809	0,05		850	0,03	
769	0,07		810	0,05		851	0,03	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
852	0,03		893	0,03		934	0,02	
853	0,03		894	0,03		935	0,02	
854	0,03		895	0,03		936	0,02	
855	0,03		896	0,02		937	0,02	
856	0,03		897	0,02		938	0,02	
857	0,03		898	0,02		939	0,02	
858	0,03		899	0,02		940	0,02	
859	0,03		900	0,02		941	0,02	
860	0,03		901	0,02		942	0,02	
861	0,03		902	0,02		943	0,02	
862	0,03		903	0,02		944	0,02	
863	0,03		904	0,02		945	0,02	
864	0,03		905	0,02		946	0,02	
865	0,03		906	0,02		947	0,02	
866	0,03		907	0,02		948	0,02	
867	0,03		908	0,02		949	0,02	
868	0,03		909	0,02		950	0,02	
869	0,03		910	0,02		951	0,02	
870	0,03		911	0,02		952	0,02	
871	0,03		912	0,02		953	0,02	
872	0,03		913	0,02		954	0,02	
873	0,03		914	0,02		955	0,02	
874	0,03		915	0,02		956	0,02	
875	0,03		916	0,02		957	0,02	
876	0,03		917	0,02		958	0,02	
877	0,03		918	0,02		959	0,02	
878	0,03		919	0,02		960	0,02	
879	0,03		920	0,02		961	0,02	
880	0,03		921	0,02		962	0,02	
881	0,03		922	0,02		963	0,02	
882	0,03		923	0,02		964	0,02	
883	0,03		924	0,02		965	0,02	
884	0,03		925	0,02		966	0,02	
885	0,03		926	0,02		967	0,02	
886	0,03		927	0,02		968	0,02	
887	0,03		928	0,02		969	0,02	
888	0,03		929	0,02		970	0,02	
889	0,03		930	0,02		971	0,02	
890	0,03		931	0,02		972	0,02	
891	0,03		932	0,02		973	0,02	
892	0,03		933	0,02		974	0,02	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
975	0,02		1016	0,01		1057	0,01	
976	0,02		1017	0,01		1058	0,01	
977	0,02		1018	0,01		1059	0,01	
978	0,01		1019	0,01		1060	0,01	
979	0,01		1020	0,01		1061	0,01	
980	0,01		1021	0,01		1062	0,00	
981	0,01		1022	0,01		1063	0,00	
982	0,01		1023	0,01		1064	0,00	
983	0,01		1024	0,01		1065	0,00	
984	0,01		1025	0,01		1066	0,00	
985	0,01		1026	0,01		1067	0,00	
986	0,01		1027	0,01		1068	0,00	
987	0,01		1028	0,01		1069	0,00	
988	0,01		1029	0,01		1070	0,00	
989	0,01		1030	0,01		1071	0,00	
990	0,01		1031	0,01		1072	0,00	
991	0,01		1032	0,01		1073	0,00	
992	0,01		1033	0,01		1074	0,00	
993	0,01		1034	0,01		1075	0,00	
994	0,01		1035	0,01		1076	0,00	
995	0,01		1036	0,01		1077	0,00	
996	0,01		1037	0,01		1078	0,00	
997	0,01		1038	0,01		1079	0,00	
998	0,01		1039	0,01		1080	0,00	
999	0,01		1040	0,01		1081	0,00	
1000	0,01		1041	0,01		1082	0,00	
1001	0,01		1042	0,01		1083	0,00	
1002	0,01		1043	0,01		1084	0,00	
1003	0,01		1044	0,01		1085	0,00	
1004	0,01		1045	0,01		1086	0,00	
1005	0,01		1046	0,01		1087	0,00	
1006	0,01		1047	0,01		1088	0,00	
1007	0,01		1048	0,01		1089	0,00	
1008	0,01		1049	0,01		1090	0,00	
1009	0,01		1050	0,01		1091	0,00	
1010	0,01		1051	0,01		1092	0,00	
1011	0,01		1052	0,01		1093	0,00	
1012	0,01		1053	0,01		1094	0,00	
1013	0,01		1054	0,01		1095	0,00	
1014	0,01		1055	0,01		1096	0,00	
1015	0,01		1056	0,01		1097	0,00	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
1098	0,00		1139	0,00		1180	-0,01	
1099	0,00		1140	0,00		1181	-0,01	
1100	0,00		1141	0,00		1182	-0,01	
1101	0,00		1142	0,00		1183	-0,01	
1102	0,00		1143	0,00		1184	-0,01	
1103	0,00		1144	0,00		1185	-0,01	
1104	0,00		1145	0,00		1186	-0,01	
1105	0,00		1146	0,00		1187	-0,01	
1106	0,00		1147	0,00		1188	-0,01	
1107	0,00		1148	0,00		1189	-0,01	
1108	0,00		1149	0,00		1190	-0,01	
1109	0,00		1150	0,00		1191	-0,01	
1110	0,00		1151	0,00		1192	-0,01	
1111	0,00		1152	0,00		1193	-0,01	
1112	0,00		1153	0,00		1194	-0,01	
1113	0,00		1154	0,00		1195	-0,01	
1114	0,00		1155	0,00		1196	-0,01	
1115	0,00		1156	0,00		1197	-0,01	
1116	0,00		1157	0,00		1198	-0,01	
1117	0,00		1158	0,00		1199	0,00	
1118	0,00		1159	0,00		1200	0,00	
1119	0,00		1160	0,00		1201	0,00	
1120	0,00		1161	0,00		1202	0,00	
1121	0,00		1162	0,00		1203	0,00	
1122	0,00		1163	0,00		1204	0,00	
1123	0,00		1164	0,00		1205	0,00	
1124	0,00		1165	0,00		1206	0,00	
1125	0,00		1166	0,00		1207	0,00	
1126	0,00		1167	0,00		1208	0,00	
1127	0,00		1168	0,00		1209	0,00	
1128	0,00		1169	0,00		1210	0,00	
1129	0,00		1170	-0,01		1211	0,00	
1130	0,00		1171	-0,01		1212	0,00	
1131	0,00		1172	-0,01		1213	0,00	
1132	0,00		1173	-0,01		1214	0,00	
1133	0,00		1174	-0,01		1215	0,00	
1134	0,00		1175	-0,01		1216	0,00	
1135	0,00		1176	-0,01		1217	0,00	
1136	0,00		1177	-0,01		1218	0,00	
1137	0,00		1178	-0,01		1219	0,00	
1138	0,00		1179	-0,01		1220	0,00	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
1221	0,00		1262	-0,01		1303	0,00	
1222	0,00		1263	-0,01		1304	0,00	
1223	0,00		1264	-0,01		1305	0,00	
1224	0,00		1265	-0,01		1306	0,00	
1225	0,00		1266	-0,01		1307	0,00	
1226	0,00		1267	-0,01		1308	0,00	
1227	0,00		1268	-0,01		1309	0,00	
1228	0,00		1269	-0,01		1310	0,00	
1229	0,00		1270	-0,01		1311	0,00	
1230	0,00		1271	-0,01		1312	0,00	
1231	0,00		1272	-0,01		1313	0,00	
1232	0,00		1273	-0,01		1314	0,00	
1233	0,00		1274	-0,01		1315	0,00	
1234	0,00		1275	-0,01		1316	0,00	
1235	0,00		1276	-0,01		1317	0,00	
1236	0,00		1277	-0,01		1318	0,00	
1237	0,00		1278	0,00		1319	0,00	
1238	0,00		1279	0,00		1320	0,00	
1239	0,00		1280	0,00		1321	0,00	
1240	0,00		1281	0,00		1322	0,00	
1241	0,00		1282	0,00		1323	-0,01	
1242	0,00		1283	0,00		1324	-0,01	
1243	0,00		1284	0,00		1325	-0,01	
1244	0,00		1285	0,00		1326	-0,01	
1245	0,00		1286	0,00		1327	-0,01	
1246	0,00		1287	0,00		1328	-0,01	
1247	0,00		1288	0,00		1329	-0,01	
1248	0,00		1289	0,00		1330	-0,01	
1249	0,00		1290	0,00		1331	-0,01	
1250	0,00		1291	0,00		1332	0,00	
1251	0,00		1292	0,00		1333	0,00	
1252	0,00		1293	0,00		1334	0,00	
1253	0,00		1294	0,00		1335	0,00	
1254	0,00		1295	0,00		1336	0,00	
1255	0,00		1296	0,00		1337	0,00	
1256	0,00		1297	0,00		1338	0,00	
1257	0,00		1298	0,00		1339	0,00	
1258	-0,01		1299	0,00		1340	0,00	
1259	-0,01		1300	0,00		1341	0,00	
1260	-0,01		1301	0,00		1342	0,00	
1261	-0,01		1302	0,00		1343	0,00	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
1344	0,00		1385	-0,01		1426	0,00	
1345	0,00		1386	-0,01		1427	0,00	
1346	0,00		1387	-0,01		1428	0,00	
1347	0,00		1388	-0,01		1429	0,00	
1348	0,00		1389	-0,01		1430	0,00	
1349	0,00		1390	-0,01		1431	0,00	
1350	0,00		1391	0,00		1432	0,00	
1351	0,00		1392	0,00		1433	0,00	
1352	0,00		1393	0,00		1434	0,00	
1353	0,00		1394	0,00		1435	0,00	
1354	0,00		1395	0,00		1436	-0,01	
1355	0,00		1396	0,00		1437	-0,01	
1356	0,00		1397	0,00		1438	-0,01	
1357	0,00		1398	0,00		1439	-0,01	
1358	0,00		1399	0,00		1440	-0,01	
1359	0,00		1400	0,00		1441	-0,01	
1360	0,00		1401	0,00		1442	-0,01	
1361	0,00		1402	0,00		1443	-0,01	
1362	0,00		1403	0,00		1444	-0,01	
1363	0,00		1404	0,00		1445	0,00	
1364	0,00		1405	0,00		1446	0,00	
1365	0,00		1406	0,00		1447	0,00	
1366	0,00		1407	0,00		1448	0,00	
1367	0,00		1408	0,00		1449	0,00	
1368	-0,01		1409	0,00		1450	0,00	
1369	-0,01		1410	0,00		1451	0,00	
1370	-0,01		1411	0,00		1452	0,00	
1371	-0,01		1412	0,00		1453	0,00	
1372	-0,01		1413	0,00		1454	0,00	
1373	-0,01		1414	0,00		1455	0,00	
1374	-0,01		1415	0,00		1456	0,00	
1375	-0,01		1416	0,00		1457	0,00	
1376	-0,01		1417	0,00		1458	0,00	
1377	-0,01		1418	0,00		1459	0,00	
1378	-0,01		1419	0,00		1460	0,00	
1379	-0,01		1420	0,00		1461	0,00	
1380	-0,01		1421	0,00		1462	0,00	
1381	-0,01		1422	0,00		1463	0,00	
1382	-0,01		1423	0,00		1464	0,00	
1383	-0,01		1424	0,00		1465	0,00	
1384	-0,01		1425	0,00		1466	0,00	

t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)	t (seg.)	Conc. Casco e tubos (adim.)	Conc. Placas (adim.)
1467	0,00		1492	0,00		1517	0,00	
1468	0,00		1493	0,00		1518	0,00	
1469	0,00		1494	0,00		1519	0,00	
1470	0,00		1495	0,00		1520	0,00	
1471	0,00		1496	0,00		1521	0,00	
1472	0,00		1497	0,00		1522	0,00	
1473	0,00		1498	0,00		1523	0,00	
1474	0,00		1499	0,00		1524	0,00	
1475	0,00		1500	0,00		1525	0,00	
1476	0,00		1501	0,00		1526	0,00	
1477	0,00		1502	0,00		1527	0,00	
1478	0,00		1503	0,00		1528	0,00	
1479	0,00		1504	0,00		1529	0,00	
1480	0,00		1505	0,00		1530	0,00	
1481	0,00		1506	0,00		1531	0,00	
1482	0,00		1507	0,00		1532	0,00	
1483	0,00		1508	0,00		1533	0,00	
1484	0,00		1509	0,00		1534	0,00	
1485	0,00		1510	0,00		1535	0,00	
1486	0,00		1511	0,00		1536	0,00	
1487	0,00		1512	0,00		1537	0,00	
1488	0,00		1513	0,00		1538	0,00	
1489	0,00		1514	0,00		1539	0,00	
1490	0,00		1515	0,00		1540	0,00	
1491	0,00		1516	0,00		1541	0,00	