



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**OTIMIZAÇÃO DA LIMPEZA CIP (*CLEAN IN PLACE*) POR MEIO DE
VAZÃO PULSADA**

LUCAS DONIZETE SILVA

UBERLÂNDIA - MG

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



OTIMIZAÇÃO DA LIMPEZA CIP (*CLEAN IN PLACE*) POR MEIO DE VAZÃO PULSADA

Autor: Lucas Donizete Silva

Orientador: Rubens Gedraite

Co-orientadora: Emiliane A. A. Naves

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

UBERLÂNDIA - MG

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586o
2019 Silva, Lucas Donizete, 1995-
Otimização da limpeza CIP por meio de vazão pulsada [recurso eletrônico] / Lucas Donizete Silva. - 2019.

Orientador: Rubens Gedraite.

Coorientadora: Emiliane A. A. Naves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.351>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. 2. Indústria de laticínios. 3. Indústria de laticínios - Controle de processo. 4. Fluidodinâmica computacional. I. Gedraite, Rubens, 1958- (Orient.). II. Naves, Emiliane A. A., 1981- (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

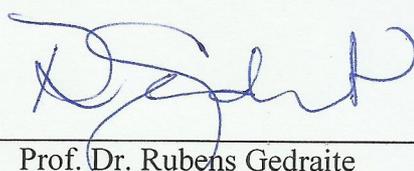
CDU: 66.0

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

OTIMIZAÇÃO DA LIMPEZA CIP (*CLEAN IN PLACE*) POR MEIO DE VAZÃO PULSADA

Dissertação de mestrado submetida à banca avaliadora formada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, em 08 de fevereiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



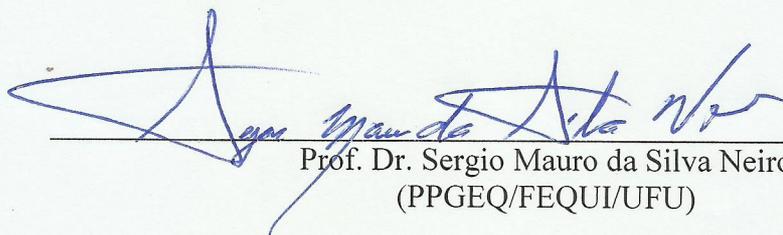
Prof. Dr. Rubens Gedraite
Orientador (PPGEQ/FEQUI/UFU)



Profa. Dra. Emiliane Andrade Araújo Naves
(Coorientadora (DEA/UFTM))



Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho
(PPGEQ/FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Sergio Mauro da Silva Neiro
(PPGEQ/FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Davi Leonardo de Souza
(DEQ/UFTM)

Aos meus pais, Valéria e Nilson.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela presença constante em minha vida e por ter me permitido chegar até aqui.

Aos meus queridos pais, exemplos de caráter, pelo amor, suporte e compreensão em todos os momentos.

À minha namorada, Bianca pelo incentivo, parceria e paciência.

Ao professor Rubens Gedraite pela orientação, amizade, compreensão, oportunidades e confiança. Agradeço ainda ao professor e sua esposa Maria Cristina pelo afetuoso acolhimento feito em sua casa.

À professora Emiliane Andrade Araújo Naves pela confiança, pelas oportunidades e pelos ensinamentos e grandes contribuições dadas para desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Davi Leonardo de Souza pela amizade, confiança e contribuições. Agradeço também o empenho em viabilizar o contato e parceria com professor Rubens.

Aos professores Ubirajara Coutinho Filho, Sérgio Mauro da Silva Neiro, Fran Sérgio Lobato pelos aconselhamentos e sugestões que permitiram a melhoria deste trabalho.

Aos amigos Arthur Iasbeck e Ana Paula Moreira pela ajuda e parceria no desenvolvimento da unidade experimental.

Ao amigo Leonardo Lima de Carvalho pela amizade, parceria e confiança.

Aos meus colegas de Pós-Graduação pela parceria e boa convivência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

E a todos, que de alguma forma, colaboraram para o desenvolvimento e sucesso deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT | x |
| LISTA DE FIGURAS | xi |
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| LISTA DE SIGLAS | xiv |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1. Objetivo..... | 16 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1. Leite | 17 |
| 2.2. Incrustação..... | 18 |
| 2.3. Biofilme..... | 21 |
| 2.4. Higienização | 25 |
| 2.4.1. Fatores associados à higienização | 30 |
| 2.4.2. Métodos de Higienização..... | 35 |
| 2.5. <i>Clean in place</i> (CIP) | 35 |
| 2.6. Modelagem e Filtros | 37 |
| 2.6.1. Identificação de sistemas..... | 37 |
| 2.6.2. Filtros | 39 |
| 2.7. Projeto de Controladores..... | 41 |
| 2.7.1. Síntese Direta (SD)..... | 44 |
| 2.7.2. Controle por Modelo Interno (IMC)..... | 45 |
| 2.7.3. ITAE Servo | 45 |
| 2.7.4. Hagglund Astrom | 45 |
| 2.8. Planejamento e Superfície de Resposta | 46 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.9. | Fluidodinâmica Computacional..... | 46 |
| 2.10. | Consumo Energético | 47 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS | 48 |
| 3.1. | Unidade Experimental..... | 48 |
| 3.2. | Filtros | 50 |
| 3.3. | Determinação de Modelos..... | 50 |
| 3.4. | Projeto e Análise dos Controladores..... | 52 |
| 3.5. | Sintonia | 53 |
| 3.6. | Adesão Microbiana..... | 53 |
| 3.7. | Processo CIP convencional | 54 |
| 3.7.1. | Enxágue Inicial..... | 54 |
| 3.7.2. | Detergente Alcalino | 55 |
| 3.7.3. | Enxágue..... | 55 |
| 3.7.4. | Sanitização | 55 |
| 3.7.5. | Enxágue..... | 56 |
| 3.8. | Processo CIP alternativo | 56 |
| 3.8.1. | Planejamento Experimental..... | 56 |
| 3.9. | Coleta e Contagem Microbiana | 58 |
| 3.10. | Fluidodinâmica Computacional..... | 60 |
| 3.11. | Consumo Energético | 61 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 62 |
| 4.1. | Identificação de Modelos | 62 |
| 4.2. | Filtros | 63 |
| 4.3. | Projeto e Avaliação de Controladores..... | 65 |
| 4.4. | Sintonia | 70 |
| 4.5. | Fluidodinâmica | 71 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 4.6. CIP Convencional..... | 71 |
| 4.7. CIP Alternativo..... | 74 |
| 4.7.1. TR I..... | 75 |
| 4.7.2. Cotovelo..... | 78 |
| 4.7.3. TR II..... | 81 |
| 4.8. Consumo Energético..... | 86 |
| 5. CONCLUSÃO | 88 |
| REFERÊNCIAS..... | 90 |

RESUMO

As indústrias de alimentos empenham esforços para manter a qualidade de seus produtos, reduzir custos e evitar problemas de contaminação alimentar e saúde pública. A etapa de higienização é a chave para manter em condições adequadas as superfícies dos equipamentos e tubulações. O objetivo deste trabalho foi (1) analisar a limpeza *clean in place* (CIP) convencionalmente empregada na indústria de laticínios; (2) avaliar o efeito da vazão pulsada na etapa de sanitização do processo CIP, (3) modelar e controlar o sistema de vazão em um protótipo simulador de linha de circulação de leite e (4) investigar os perfis de velocidades e tensão experimentados pela tubulação utilizando a técnica de fluidodinâmica computacional (CFD). Para realização deste trabalho foi utilizado um protótipo de sistema CIP com três superfícies de aço inoxidável, tipicamente presentes na indústria, no formato de dois tubos cilíndricos retos e um acessório cotovelo. Os cupons foram submetidos a contaminação natural com leite cru durante um período de duas horas a temperatura de 37°C para promover a adesão e formação de biofilme. Em seguida, foram submetidos a higienização CIP convencional. Alternativamente, esses cupons foram contaminados e higienizados empregando vazão pulsada em diferentes configurações na etapa de sanitização, de acordo com planejamento composto central (PCC). Em ambos os cenários, as populações microbianas foram avaliadas por rinsagem e plaqueamento. O sistema de vazão foi modelado por função de transferência de primeira ordem com tempo morto (FOPDT) e o controle da vazão pulsada foi realizado por um controlador PID, o qual foi dimensionado por quatro métodos diferentes: Síntese Direta, Modelo Interno, Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (ITAE) e pelo método de Hagglund Astrom e ajustado com sintonia fina. Além disso, avaliou-se o uso de filtros para suavização de ruídos esporádicos de alta magnitude e ruídos de alta frequência. Simulações fluidodinâmicas utilizando software FLUENT *Academic* foram realizadas para investigar o comportamento da velocidade e tensão na higienização convencional e alternativa. A modelagem do sistema com função de transferência mostrou-se satisfatória para representar a dinâmica da vazão, assim como o uso de filtros suavizou os ruídos nas medidas coletadas. Na higienização, a redução do número de colônias foi mais expressiva nos trechos retos em comparação com acessório cotovelo na higienização convencional. As variáveis ondulação e período da pulsação mostraram-se significativas para remoção de células aderidas a superfície em ambos os cupons avaliados. A técnica CFD permitiu conhecer a dinâmica do escoamento em relação a velocidade e tensão de cisalhamento. As maiores ondulações $W > 1$ promoveram maiores reduções decimais da adesão devido ao efeito anular experimentado pelas superfícies. Dessa forma, foi possível, portanto, reduzir o tempo de operação da etapa de sanitização com a estratégia de vazão pulsada assim como redução no consumo energético.

Palavras-chave: CIP; vazão pulsada; controle; CFD; leite cru.

ABSTRACT

The food industries strive to maintain the quality of their products, reduce costs and avoid problems of food contamination and public health. The sanitizing step is the key to keeping equipment and piping surfaces in proper condition. The objective of this work was (1) to analyze the clean in place (CIP) conventionally employed in the dairy industry; (2) to evaluate the effect of pulsed flow on the CIP process sanitization step, (3) to model and control the flow system in a milk circulation line simulator prototype and (4) to investigate the velocity and shear stress profiles experienced by the using the computational fluid dynamics (CFD). A prototype CIP system with three stainless steel surfaces, typically present in the industry, was used in the shape of two straight cylindrical tubes and an elbow attachment. The coupons were subjected to natural contamination with raw milk for a period of two hours at 37 ° C to promote adhesion and biofilm formation. They were then submitted to conventional CIP sanitization. Alternatively, these coupons were contaminated and sanitized using pulsed flow in different configurations in the sanitization step, according to central composite planning. In both scenarios, the microbial populations were evaluated by rinsing and plating. The flow system was modeled by first order transfer function with dead time (FOPDT) and the pulsed flow control was performed by a PID controller, which was scaled by four different methods: Direct Synthesis, Internal Model, Integral Error (ITAE) and the Hagglund Astrom method and adjusted with fine tuning. In addition, the use of filters for the smoothing of sporadic high-magnitude noises and high-frequency noise was evaluated. Fluid dynamics simulation using FLUENT Academic software was performed to investigate the velocity and shear stress behavior in conventional and alternative sanitization. The modeling of the system with transfer function was satisfactory to represent the flow dynamics, as well as the use of filters smoothed the noise in the measurements collected. In the hygiene, the reduction of the number of colonies was more expressive in the straight stretches as compared to accessory elbow in the conventional hygiene. The ripple and pulsation period variables were significant for the removal of adhered cells to the surface in both evaluated coupons. The CFD technique allowed to know the dynamics of the flow in relation to the speed and shear stress. The larger undulations $W > 1$ promoted higher decimal reductions of the adhesion due to the annular effect experienced by the surfaces. Thus, it was possible to reduce the operating time of the sanitation stage with the pulsed flow strategy as well as the reduction in energy consumption.

Keywords: CIP; pulsed flow; control; CFD; raw milk.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 – Esquema de adesão microbiana. | 23 |
| Figura 2-2 – Efeito do pH na solubilidade de resíduos protéicos. | 28 |
| Figura 2-3 – Esquema de forças envolvidas na limpeza de uma sujidade. | 31 |
| Figura 2-4 – Componentes da vazão pulsada. | 33 |
| Figura 2-5 – Perfil de velocidade de vazão pulsada para diferentes ondulações. | 34 |
| Figura 2-6 – Diagrama de blocos para malha de controle <i>feedback</i> | 42 |
| Figura 2-7 – Diagrama de blocos para controlador de Modelo Interno. | 45 |
| Figura 3-1 – Protótipo simulador de linha de circulação de leite | 48 |
| Figura 3-2 – Representação esquemática da bancada com instrumentação. | 49 |
| Figura 3-3 – Arranjo para simulação do desempenho dos controladores projetados. | 52 |
| Figura 3-4 – Representação da proposta de vazão pulsada. | 58 |
| Figura 3-5 – Rinsagem do cupom com movimentos longitudinais (A), circulares (B e C) e baliza (D). | 58 |
| Figura 3-6 – Método de rinsagem para o acessório cotovelo. | 59 |
| Figura 3-7 – Momentos característicos (A) e posições para investigação dos perfis (B). | 61 |
| Figura 4-1 – Dinâmica de vazão para perturbação aleatória(A) e degrau(B). | 62 |
| Figura 4-2 – Dinâmica da vazão corrente e da vazão com filtro <i>spike</i> | 63 |
| Figura 4-3 – Dinâmica da vazão para filtro exponencial. | 64 |
| Figura 4-4 – Dinâmica da vazão com associação dos filtros <i>spike</i> e exponencial. | 64 |
| Figura 4-5 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Síntese Direta para modelo aleatório. | 66 |
| Figura 4-6 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por IMC para o modelo aleatório. | 66 |
| Figura 4-7 – Perfil de vazão simulado (A) e experimental (B) por ITAE para o modelo aleatório. | 67 |
| Figura 4-8 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Hagglund Astrom para o modelo aleatório. | 67 |
| Figura 4-9 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Síntese Direta para modelo degrau. | 68 |
| Figura 4-10 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por IMC para modelo degrau. | 69 |
| Figura 4-11 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por ITAE para modelo degrau. | 69 |
| Figura 4-12 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por Hagglund Astrom para modelo degrau. | 70 |
| Figura 4-13 – Perfil de vazão para controlador sintonizado. | 70 |
| Figura 4-14 – Perfis de velocidade para estudo de malhas (A) aproximação nos perfis (B). .. | 71 |
| Figura 4-15 – Reduções decimais na superfícies com tratamento convencional. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-16 – Distribuição de velocidade para CIP convencional. | 72 |
| Figura 4-17 – Perfil de velocidade para o CIP convencional. | 73 |
| Figura 4-18 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) da RD para o cupom TR I. | 76 |
| Figura 4-19 – Contorno de velocidade em TR I em instantes característicos. | 77 |
| Figura 4-20 – Perfil de velocidade na Linha 1 em momentos característicos do pulso. | 78 |
| Figura 4-21 – Perfil de tensão na Linha 1 em momentos característicos do pulso. | 78 |
| Figura 4-22 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) para o cupom cotovelo. | 79 |
| Figura 4-23 – Contorno de velocidade no cotovelo em instantes característicos. | 80 |
| Figura 4-24 – Perfil de velocidade na Linha 2 em momentos característicos do pulso. | 80 |
| Figura 4-25 – Perfil de tensão na Linha 2 em momentos característicos do pulso. | 81 |
| Figura 4-26 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) da RD para o cupom TR II. | 82 |
| Figura 4-27 – Contorno de velocidade em TR II em instantes característicos. | 83 |
| Figura 4-28 – Perfil de velocidade na Linha 3 em momentos característicos do pulso. | 84 |
| Figura 4-29 – Perfil de tensão na Linha 3 em momentos característicos do pulso. | 84 |
| Figura 4-30 – Perfil de velocidade na Linha 4 em momentos característicos do pulso. | 85 |
| Figura 4-31 – Perfil de tensão na Linha 4 em momentos característicos do pulso. | 85 |
| Figura 4-32 – Corrente extraída da rede de distribuição na etapa de sanitização. | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1 – Composição centesimal do leite de vaca. | 17 |
| Tabela 2-2 – Etapas da higienização de equipamentos e tubulações..... | 26 |
| Tabela 2-3 – Remoção de diferentes tipos de sujidade na indústria dos laticínios. | 26 |
| Tabela 2-4 – Faixa de temperatura para aplicação do detergente alcalino NaOH..... | 32 |
| Tabela 2-5 – Métodos de identificação de modelos e aplicabilidade. | 38 |
| Tabela 3-1 – Equações de projeto para controladores PID. | 52 |
| Tabela 3-2 – Níveis codificados e reais das variáveis estudadas. | 57 |
| Tabela 3-3 – Matriz de planejamento em variáveis reais e codificadas..... | 57 |
| Tabela 4-1 – Modelos identificados para o sistema. | 62 |
| Tabela 4-2 – Parâmetros projetados pelo modelo de perturbação aleatória..... | 65 |
| Tabela 4-3 – Parâmetros projetados pelo modelo de perturbação degrau. | 68 |
| Tabela 4-4 – Número de reduções decimais nos cupons após CIP alternativo..... | 74 |
| Tabela 4-5 - Regimes de limpeza na remoção de células do biofilme do cotovelo..... | 74 |
| Tabela 4-6 – Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme no cupom TR I..... | 75 |
| Tabela 4-7 - Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme no cotovelo. | 79 |
| Tabela 4-8 - Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme do cupom TR II..... | 82 |
| Tabela 4-9 – Relação de consumo energético para cada tratamento. | 87 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| APHA | <i>American Public Health Association</i> - Associação Americana de Saúde Pública |
| CFD | <i>Computational Fluid Dynamics</i> – Fluidodinâmica computacional |
| CIP | <i>Clean in place</i> – limpeza no local |
| COP | <i>Clean out place</i> – Limpeza fora do local |
| FOPDT | <i>First Order plus Delay Time</i> – Primeira ordem com tempo de atraso |
| IMC | <i>Internal Model Control</i> – Controle por Modelo Interno |
| ITAE | <i>Integral of Time-weighted Absolute Error</i> - Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo |
| MAPA | Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento |
| MSE | <i>Mean Squared Error</i> – Erro Quadrado Médio |
| OMS | Organização Mundial de Saúde |
| PCA | <i>Plate Count Agar</i> – Ágar padrão para contagem |
| PCC | Planejamento Composto Central |
| PI | Proporcional Integral |
| PID | Proporcional Integral Derivativo |
| RD | Redução Decimal |
| RMSE | <i>Root Mean Square Error</i> – Raiz do Erro Quadrado Médio |
| SISO | <i>Single Input Single Output</i> – Única entrada única saída |
| TR | Tubo reto |
| UDF | <i>User Defined Functions</i> - Funções definidas pelo usuário |
| UFC | Unidades Formadoras de Colônia |
| UHT | <i>Ultra High Temperature</i> - Temperatura Ultra Alta |

1. INTRODUÇÃO

As indústrias de alimentos empenham esforços para manter a qualidade de seus produtos, reduzir custos e diminuir o risco de contaminação alimentar e saúde pública. Após o processamento de alimentos é fundamental a higienização de superfícies dos equipamentos e tubulações utilizadas durante o processo (SILVA *et al.*, 2010). A higienização consiste na limpeza e sanitização e busca remover resíduos visíveis e não visíveis, como carboidratos, gorduras, proteínas, sais minerais, produtos químicos e micro-organismos (HOFFMANN, 2002).

A presença de micro-organismos na superfície destes equipamentos e tubulações pode acarretar na adesão microbiana e formação de biofilme. Esse fenômeno pode dificultar a ação de sanitizantes, comprometer a qualidade do produto final e gerar sérios riscos à saúde pública (KUMARI e SARKAR, 2014).

A formação de biofilmes em superfícies utilizadas no processamento de alimentos é um dos principais fatores associados com a contaminação. As células bacterianas podem se fixar nas superfícies mesmo após tratamento térmico por um processo de adesão e formação de biofilme o que aumenta as chances de uma pós contaminação (BÉNÉZECH *et al.*, 2018; SANTOS, 2009).

Nas instalações lácteas, os processos industriais são desenvolvidos em diferentes temperaturas. Além disso, o leite pode ficar em contato com as superfícies por diferentes períodos de tempos, desde alguns segundos até horas como em tanques de estocagem. Esse cenário oferece diferentes tempos de contato da microbiota, presente no ambiente dos laticínios, com as superfícies dos equipamentos e das tubulações (SANTOS, 2009).

A resistência de biofilmes aos compostos sanitizantes e aos tratamentos térmicos explicaria sua persistência em ambientes de processamento de alimentos. Dessa forma, a higienização é o procedimento chave para o controle sanitário das linhas de processamento. Para ser eficaz, a ação mecânica do fluido que escoar juntamente com os agentes químicos deve ser capaz de superar as forças adesivas do biofilme. Esse acontecimento se dá devido a tensão de cisalhamento sobre a parede (FAILLE *et al.*, 2013; MARCHANT BANAT 2012)

Para higienizar as superfícies, em escala industrial, surgiu a tecnologia CIP (*clean in place*). Os sistemas de limpeza no local (CIP), operam com a circulação de produtos químicos e água para remover as sujidades. As indústrias que empregam fortemente essa técnica são

aquelas que exigem altos níveis de higiene, como indústria de alimentos, de bebidas e de produtos farmacêuticos (FRYER *et al.*, 2006).

Desenvolver estratégias efetivas em sistemas CIP para reduzir a adesão microbiana e o biofilme nas superfícies industriais, torna-se um aspecto fundamental para indústria e para saúde pública. Além disso, minimizar custos com consumo de energia e perda de produtividade, relacionadas a inatividade da planta frente a longas paradas para higienização, é de suma importância para o cenário industrial.

1.1. OBJETIVOS

Investigar as características da limpeza CIP convencional e avaliar uma estratégia alternativa eficiente de sanitização utilizando vazão pulsada para minimização da microbiota remanescente após processo CIP, redução do tempo operacional e diminuição no consumo de energia. Os objetivos específicos são:

- Analisar o emprego de filtros de sinais para eliminação de ruídos em plantas industriais;
- Modelar o sistema de vazão, projetar controladores e avaliar seus respectivos desempenhos para vazão pulsada;
- Avaliar a aplicabilidade da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD);
- Estimar a economia de tempo e de energia com o uso do CIP alternativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LEITE

O leite, segundo a Instrução Normativa 62 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), trata-se do produto oriundo da ordenha completa e ininterrupta, de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas, em condições de higiene (BRASIL, 2011).

O leite é um fluido biológico de composição variada e complexa influenciado por fatores como raça do animal, alimentação disponível, condições climáticas entre outros. Dessa forma, a média de componentes sólidos do leite de vaca é aproximadamente 13% conforme a composição apresentada na Tabela 2-1, e cerca de 87% água (BULYND, 2003).

Tabela 2-1 – Composição centesimal do leite de vaca.

| Proteína(%) | Gordura(%) | Carboidrato(%) | Minerais(%) |
|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 3,5 | 3,7 | 4,8 | 0,7 |

Fonte: Adaptado de (BYLUND, 2003).

A caseína, a β -Lactoglobulina (β -Lg) e a α -Lactolbumina (α -La) são as principais proteínas presentes no leite de vaca. Elas estão dispersas como uma suspensão ou solução coloidal no leite. O percentual de carboidrato do leite refere-se basicamente a lactose na solução (BYLUND, 2003).

O leite possui os principais nutrientes para manutenção e desenvolvimento do corpo humano. Este alimento é consumido na forma líquida ou como seus derivados: queijos, iogurtes e manteigas sendo caracterizado como um dos alimentos mais nutritivos (SOUZA, 2015; BYLUND, 2003). Do ponto de vista econômico, o leite tem importância significativa no setor do agronegócio, na composição da renda de produtores rurais e na absorção da mão de obra rural viabilizando a fixação do homem no campo (CAMPOS, 2007).

No Brasil, a quantidade de leite cru adquirido, resfriado ou não, no 1º trimestre de 2018 totalizou, aproximadamente, seis bilhões de litros. Dessa produção, cerca de 99,9 % do volume é industrializado em 1.917 estabelecimentos, os quais são inspecionados em âmbito municipal, estadual ou federal. Destaca-se ainda no 1º trimestre de 2018 o estado de Minas Gerais como o maior produtor leiteiro, seguido dos estados do Rio Grande do Sul e Goiás (IBGE, 2018).

O estado líder na produção nacional, Minas Gerais, abriga um parque industrial com grandes empresas como Nestlé, Danone, Itambé e Vigor. Além disso, encontram-se instaladas

no estado inúmeras outras empresas de pequeno porte. A diversificação e aumento da produção da indústria de laticínios viabiliza a abertura da economia brasileira (CASTRO, 2007). Nesse aspecto, o consumo de produtos alimentícios industrializados tem crescido sistematicamente. Neste sentido, a indústria alimentícia preocupa-se com a qualidade do produto final e sua preservação após o processamento (BANSAL e CHEN, 2006).

O leite pode conter micro-organismos patogênicos e também outras substâncias que podem comprometer o sabor e reduzir a vida útil de vários produtos lácteos. O propósito da aplicação de calor no tratamento térmico é destruir os micro-organismos patogênicos e reduzir os alteradores a níveis considerados seguros, além de promover a inativação de algumas enzimas presentes no alimento (ANDRADE, 2008).

2.2. INCRUSTAÇÃO

O processamento dos produtos lácteos é realizado normalmente em superfícies de aço inoxidável, a qual apresenta boas características de transferência de energia na forma de calor, além de ser um material inerte e apropriado para as condições de uso na indústria de alimentos. Uma das etapas do processamento é o tratamento térmico, o qual consome muita energia nos laticínios. Esta etapa é recorrente na indústria, principalmente nos laticínios, em que se destacam os tratamentos térmicos de pasteurização e tratamento UHT do leite, sendo esses processos importantes para a qualidade microbiológica do produto final (BANSAL e CHEN, 2006; BYLUND, 2003).

Como consequência do tratamento térmico tem-se o fenômeno da incrustação que se caracteriza como um problema significativo nas indústrias de alimentos. Os depósitos se formam devido à adesão de espécies à superfície, como resíduos orgânicos de alimentos, proteínas, sais minerais e micro-organismos, seguido da coesão entre esses elementos de forma resistente à remoção (FRYER *et al.*, 2011).

De acordo com Georgiadis (1998) e Bansal (2006) a interrupção da produção nos laticínios é necessária para garantir a qualidade microbiológica do produto e reduzir o risco de contaminação. O custo destas paradas periódicas é responsável pela maior parte do custo operacional, comparativamente, ao custo em função da diminuição da produtividade devido à redução da eficiência dos equipamentos. Cerca de 80 % dos custos de produção na indústria de laticínios podem ser atribuídos às incrustações e a limpeza dos equipamentos (BANSAL e

CHEN, 2006). Os rigorosos requisitos de qualidade e higiene nos processos lácteos exigem etapas de limpeza eficazes. Nesse processo, os custos são despesas incorridas com detergentes, água de enxágue, descarte de efluentes e energia (BODE, *et al.*, 2005).

Os produtos lácteos são sensíveis ao aquecimento, o que exige cuidados para evitar alterações nos produtos. Algumas proteínas podem desnaturar e incrustar no interior das superfícies do equipamento ou tubulação quente, usados para aquecer o leite (BYLUND, 2003).

As condições hidráulicas, térmicas, características da superfície, tipo de leite, tempo de contato e presença de microorganismos são fatores importantes em relação a quantidade de incrustação gerada. As sujidades provenientes do processamento de alimentos em uma planta industrial podem ser solúveis ou insolúveis em água. Aquelas sujidades solúveis em água como alguns açúcares e minerais monovalentes raramente são problemáticos e são facilmente removidos. No entanto, sólidos insolúveis representam um problema para a limpeza nas indústrias alimentícias que operam com superfície aquecida. Na indústria láctea, destacam-se as reações de desnaturação da proteína e agregação, precipitação de minerais como fosfato de cálcio (PAK, 2016).

As incrustações causadas pelo leite podem ser classificadas em duas categorias Tipo A e Tipo B. As incrustações do tipo A são compostas, principalmente, por proteínas e acontecem na faixa de temperatura de 75 a 110 °C. Os depósitos são brancos, macios e aspecto esponjoso, com uma composição de 50 a 70 % da incrustação sendo proteínas, 30 % a 40 % minerais e 4 % a 8 % gordura. A incrustação mineral, conhecida como Tipo B, é formada por minerais do leite, sendo o componente majoritário o fosfato de cálcio. Esse fenômeno ocorre em temperaturas acima de 110 °C. Estes depósitos têm como características, estrutura granular, compacto, duro e de coloração acinzentada (BANSAL *et al.*, 2005).

A proteína presente no soro do leite, composta por β -Lactoglobulina e α -Lactalbumina, contribui majoritariamente na formação de incrustação do tipo A, sendo a β -lactoglobulina a disponível em maior quantidade e também a responsável de forma dominante no fenômeno da incrustação, pois essa é mais sensível ao calor (BANSAL e CHEN, 2006). A β -lactoglobulina é a fração protéica mais abundante no soro e apresentar quase 50% de sua estrutura em uma conformação desorganizada, conferindo caráter mais sensível e reativo da proteína às alterações do meio (MODLER, 2000). A formação de incrustações pode ser ocasionada pela precipitação de proteínas agregadas ou pela deposição de proteínas desnaturadas (BANSAL *et al.*, 2005).

Diferentes métodos foram desenvolvidos para detectar incrustações como a pesagem de tubos sujos e tubos limpos e placas de trocadores de calor (BURTON, 1961; TISSIER & LALANDE, 1986; WALLHÄUßER, 2012). Outra técnica para investigar a remoção de depósitos de β -lactoglobulina de leite em pó desnatado comercial foi o uso de microbalança de cristal de quartzo (MURRAY & DESHAIRES, 2000). A microbalança de cristal de quartzo é altamente sensível ao material, as mudanças de espessura e o tipo de incrustação. No entanto, ainda é considerado um método invasivo (WALLHÄUßER, 2012).

De maneira geral, não é possível utilizar as linhas de processamento de alimentos por mais de 24 horas sem executar a etapa de limpeza. A limpeza é importante para minimizar impactos negativos no desempenho do equipamento causada por incrustação. Além disso, as sujidades podem causar danos ao produto causados pela multiplicação microbiana e também devido a necessidade de troca entre os diferentes produtos processados para evitar a contaminação cruzada quando muitos produtos são feitos na mesma linha. A limpeza pode demorar várias horas e dessa forma, grande parte do tempo, a planta não ser utilizada para produção. Nesse sentido, a limpeza é parte constante no processamento de alimentos, de forma que minimizar os custos de limpeza e os efeitos ambientais é fundamentalmente desejável (FRYER *et al.*, 2011).

A classificação dos problemas de limpeza das indústrias de alimentos é organizada pela gravidade do problema e pelos mecanismos de remoção (FRYER E ASTERIADOU, 2009). Os depósitos de incrustação mais difíceis de limpar são:

Tipo 1: limpeza de fluidos altamente viscosos ou viscoelásticos ou viscoplásticos por água.

Tipo 2: limpeza e remoção de biofilmes. Embora seja possível remover alguns biofilmes apenas com água, a prática normal é usar sanitizante (BURFOOT e MIDDLETON, 2009; BLEL *et al.*, 2009);

Tipo 3: limpeza de depósitos sólidos por ação química. Esses sólidos são formados pela deposição de componentes do fluido do processo. A natureza do depósito determinará o tipo de produto químico de limpeza utilizado; como o hidróxido de sódio para remover filmes protéicos e ácidos orgânicos para remover as escamas minerais.

Para os depósitos dos tipos 2 e 3, são necessários produtos químicos para remoção. O processo de limpeza envolverá assim a difusão do produto químico no depósito, e uma reação que o transforma em uma forma removível. Três mecanismos diferentes são observados:

- dissolução - a dissolução de sais minerais em ácido, proteínas em álcalis ou açúcares em água.
- quebra da coesão do depósito: remoção por quebra de forças coesivas entre partes do depósito;
- quebra adesiva da superfície: remoção por quebra das forças adesivas que ligam o depósito à superfície.

A maioria dos mecanismos de remoção dos depósitos em relação ao processo de difusão utilizou ensaios com leite ou derivados considerando à importância comercial do processamento do leite. A limpeza com base em depósitos de proteína de leite em aço inoxidável apresentou diferentes mecanismos sendo a remoção das últimas camadas largamente controlada pelas tensões de cisalhamento, aplicando a reversão de fluxo como uma estratégia significativamente útil na remoção dos depósitos (GILLHAN *et al.*, 2000). O comportamento protéico em pH elevado foi relacionado aos efeitos observados na limpeza por solubilização das proteínas. A dissolução depende da estrutura de agregação, ou seja, das condições de incrustação (MERCADÉ-PRIETO e CHEN, 2006).

2.3. BIOFILME

Os micro-organismos, em determinadas condições, podem se depositar e aderir às superfícies e iniciar a multiplicação celular. Além de ocorrer a multiplicação, há ainda, formação de biofilme microbiano quando a massa celular é agregada aos resíduos e às incrustações que funcionam como nutrientes. O desenvolvimento de biofilmes microbianos ocorre frequentemente nas indústrias de alimentos devido quantidade de nutrientes disponível, por exemplo, em acessórios como válvulas e partes internas de tubulações de aço inoxidável. O biofilme pode reduzir a eficiência de transferência de calor em trocadores de calor; diminuir o fluxo em tubulações; desencadear processos corrosivos; e, principalmente, contaminar os alimentos causando em sérios problemas de higiene, de saúde e também de ordem econômica (ANDRADE, 2008).

As bactérias aderem-se às superfícies e são envolvidas por uma camada de matéria orgânica, o que forma depósitos onde os micro-organismos estão fortemente aderidos por meio de filamentos (CRIADO *et al.*, 1994). Os biofilmes são compostos por micro-organismos, proteínas, lipídios, fosfolipídios, carboidratos, sais minerais e vitaminas. Neste ambiente, os microrganismos são mais resistentes aos agentes químicos e físicos de limpeza (LE CLERCQ-PERLAT; LALANDE, 1994).

A aglomeração de micro-organismos é uma forma de proteção para o desenvolvimento por meio de relações simbióticas que permite a condições para sobrevivência (IMMING, 2013). Os biofilmes são preocupantes para a segurança microbiológica e para a degradação de alimentos, de utensílios, de superfícies de processamentos. Além disso, provocam prejuízos financeiros e riscos à saúde do consumidor (KASNOWSKI *et al.*, 2010).

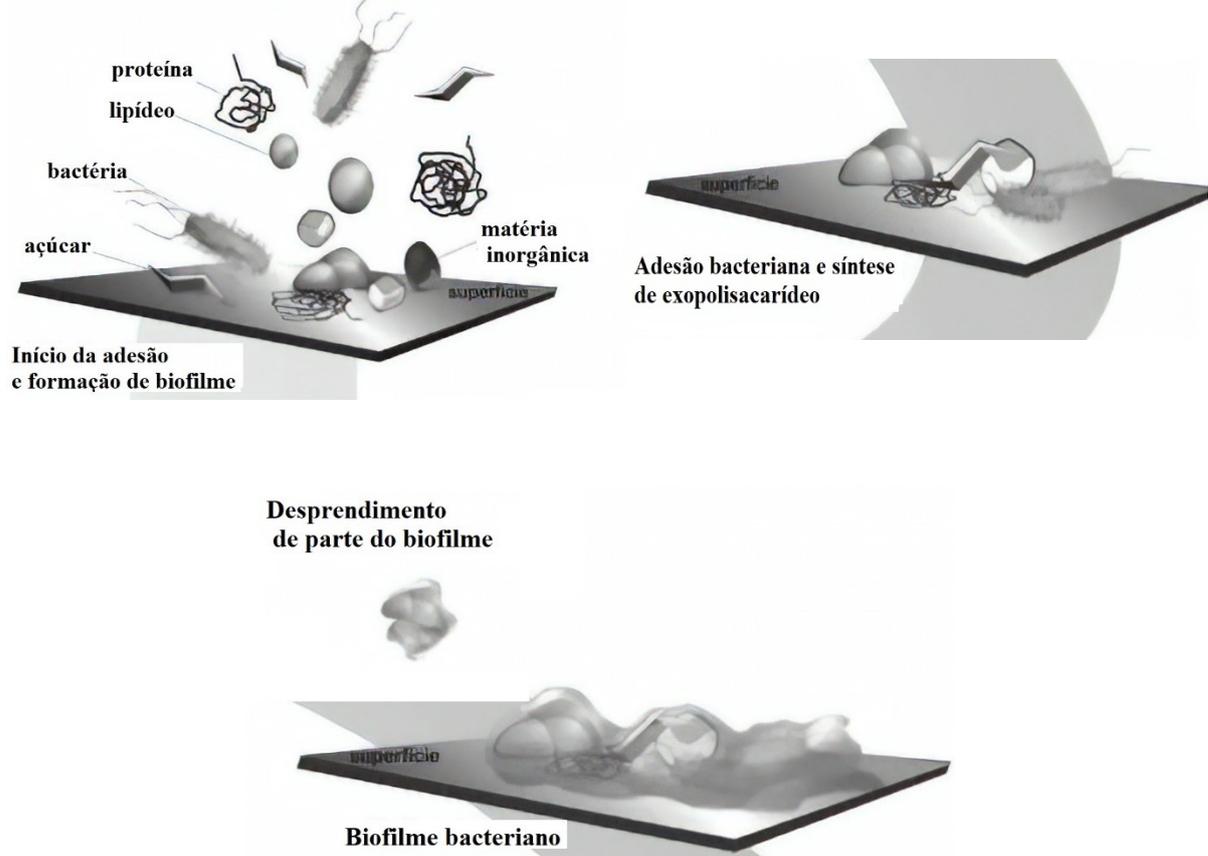
Diferentes fontes de contaminação como o solo, a água, os utensílios, o trato intestinal de homens e animais, os manipuladores, a alimentação animal e o ar de ambientes de processamento podem disseminar micro-organismos indesejáveis à qualidade do produto, provocar sua alteração e ainda veicular patógenos aos consumidores. Grande número de espécies de bactérias pode alterar alimentos, como a dos gêneros *Acetobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Alteromonas*, *Bacillus*, *Brochotrix*, *Campylobacter*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Escherichia*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Micrococcus*, *Moxarella*, *Pediococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*. Dentre as espécies bacterianas alteradoras, encontram-se *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fragi*, *Micrococcus sp.*, *Enterococcus faecium*, *Bacillus sporothermodurans*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus stearothermophilus* e *Desulfovibrio desulfuricans* (ANDRADE, 2008; FLINT *et al.*, 2001; HJELM *et al.*, 2002).

Algumas teorias descrevem o processo de adesão e formação do biofilme. Uma das teorias propõe que a adesão ocorre em duas etapas (MARSHALL, STOUT e MITCHELL, 1971). A primeira, trata-se da adesão dos micro-organismos à superfície por meio de forças de Van der Waals e atração eletrostática, de forma reversível. Na segunda etapa, ocorre interação física entre a célula e a superfície por meio do material extracelular produzido pela bactéria, denominada matriz ou glicocálix (SANTOS, 2009).

A teoria proposta por Nortermans, Dormans e Mead (1991) explica a formação de biofilme em três etapas. Primeiramente, ocorre a adesão bacteriana sobre a superfície. Em seguida, a bactéria começa a produzir material extracelular e a adesão torna-se irreversível na

etapa denominada consolidação. Por fim, ocorre a colonização e reprodução dos micro-organismos. A Figura 2-1 mostra as etapas de acordo com essa proposta.

Figura 2-1 – Esquema de adesão microbiana.



Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2008).

A *American Public Health Association*, APHA, recomenda como superfícies de aço inoxidável higienizadas adequadamente, contagem máxima de 2 UFC cm⁻² de aeróbios mesófilos. Por outro lado, a Organização Mundial de Saúde, OMS, admite contagens de até 50 UFC cm⁻² de aeróbios mesófilos na superfície.

As superfícies utilizadas para processamento de alimentos devem ser inertes, tanto para os alimentos quanto aos detergentes e sanitizantes empregados em condições normais de uso. Dessa forma, seus componentes não devem ser tóxicos, migráveis e absorvidos pelos alimentos. As superfícies com características tais como: lisas, duras, contínuas sem fendas ou fissuras são consideradas mais adequadas. As superfícies com essas configurações viabilizam a realização dos procedimentos de higienização, considerando que características microscópicas das superfícies são determinantes para maior ou menor adesão microbiana (ANDRADE, 2008). Sulcos e fissuras na superfície provocam a entrada de resíduos de alimentos o que dificulta o

processo de limpeza devido ao acúmulo de proteínas, gorduras e açúcares e micro-organismos que podem iniciar os processos de adesão e formação de biofilme (BERNARDES, 2012).

O aço inoxidável 304 é o material mais utilizado na indústria de alimentos, possui em sua composição carbono, cromo e níquel, é resistente à corrosão causada pela maioria dos alimentos, detergentes e sanitizantes. Essa resistência é consequência da película protetora de óxido de cromo que se forma na presença de oxigênio. Outra vantagem trata-se da facilidade de higienização e o custo relativamente barato. Em situações em que há possibilidade de ocorrerem processos corrosivos mais intensos, como por exemplo soluções salmouras, é recomendado o uso do aço inox 316, por conter mais níquel em sua composição e molibdênio. O acabamento do aço inoxidável pode variar de acordo com o polimento empregado (JULLIEN *et al.*, 2002). O acabamento do aço inoxidável se classifica em escala de 0 a 8, o que caracteriza uma superfície sem polimento até uma superfície espelhada, respectivamente. Geralmente as indústrias de alimentos utilizam o aço inoxidável com polimento nº 4 (ANDRADE, 2008).

A ionização de grupos da superfície ou a adsorção de íons confere carga elétrica às superfícies (HONG e BROWN, 2008). A adsorção consiste na concentração de um componente do sistema em uma determinada interface. Esse processo refere-se a difusão da molécula para interface causado pelo excesso de energia livre de Gibbs que existe. Outros aspectos, como interações energeticamente favoráveis entre sólido adsorvente e soluto, ou interações desfavoráveis entre soluto e componentes da solução também favorecem a difusão de um componente para a superfície (SOMASUNDARAN, 2003).

As interações resultantes da atmosfera iônica permitem o aparecimento de atrações entre bactérias e a superfície do substrato que pode culminar na formação de biofilme (ARAÚJO *et al.*, 2010). A adesão de micro-organismos às superfícies é um fenômeno que ocorre naturalmente em meios aquosos e depende das propriedades superficiais, como tensão superficial, composição e propriedades da superfície e das características físico-químicas da célula dos micro-organismos (CHAVES, 2004; UBBINK e SCHAR-ZAMMARETTI, 2007).

O material que compõe os equipamentos e as tubulações industriais pode apresentar íons de ferro na superfície e provocar alterações nas interações eletrostáticas entre a superfície destes objetos e as células microbianas. Tais íons apresentam carga positiva e reduzem as interações repulsivas eletrostáticas entre a célula microbiana, carregada em geral negativamente, e a superfície do sólido conduzindo a um aumento na adesão bacteriana (LI e LOGAN, 2004). Além disso, a microtopografia da superfície pode potencializar a adesão bacteriana. Acredita-

se que a maior área disponível para adesão, a proteção contra as forças de cisalhamento e a viabilização de trocas químicas que favorece as interações químicas preferências (SCHEUERMAN *et al.*, 1998).

O processo de higienização geralmente é demorado, dispendioso e os ciclos usados são raramente adaptáveis à outras condições operacionais de processamento. A incrustação é uma grande influência na indústria de laticínios e leva a pesquisa de mecanismos de incrustação e limpeza. Além disso, as condições de escoamento relacionadas a velocidade interferem na formação das incrustações. De forma que o aumento da turbulência favorece a diminuição das incrustações (BELMAR-BEINY *et al.*, 1993; SANTOS *et al.*, 2003).

2.4. HIGIENIZAÇÃO

A higienização consiste em um conjunto de práticas estruturadas para devolver as superfícies, equipamentos e utensílios condições adequadas de processamento. Essa etapa deve remover os materiais indesejados, tais como: resíduos de alimentos, corpos estranhos, resíduos de produtos químicos e micro-organismos do meio de forma que as sujidades remanescentes não ofereçam riscos à qualidade e a segurança microbiológica do produto. Para executar uma higienização adequada é fundamental conhecer as características dos resíduos, escolher o método mais apropriado ao produto processado e as condições higiênicas exigidas, assim como testes para avaliar a efetividade do método empregado (ICTA, 2010).

O acúmulo de materiais indesejados, oriundo do processamento de alimentos, são denominados resíduos ou sujidades. Esse fato pode ser consequência da operação normal, de anomalias do processo ou resultado da contaminação ambiental. Dentre os elementos indesejáveis, destacam-se sobretudo micro-organismos causadores de doenças, ditos patogênicos e causadores da deterioração do produto (ICTA, 2010). Dessa forma, a higienização deve promover a eliminação dos resíduos visíveis e invisíveis juntamente com a destruição total ou parcial dos micro-organismos para garantir a integridade do produto e da saúde do consumidor (GERMANO e GERMANO, 2008).

A higienização tem como objetivo eliminar as sujidades, tanto quanto possível. As etapas para a operação de higienização podem esquematizar-se, conforme mostrado na Tabela 2-2. (SILVA *et al.*, 2010).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2-2 – Etapas da higienização de equipamentos e tubulações.

| Etapa | Ação |
|--------------|--|
| Enxágue | Remoção das sujidades maiores com aplicação de água |
| Limpeza | Remoção de sujidades pela aplicação de detergentes básicos e/ou ácidos |
| Enxágue | Remoção do detergente com água corrente |
| Sanitização | Destruição de micro-organismos pela aplicação de agente químico sanitizante ou calor |
| Enxágue | Remoção de resíduos de sanitizante com água corrente |

Fonte: Adaptado de (ICTA, 2010).

De acordo com o processo de fabricação e as regulamentações vigentes, tipo de superfície, nível de higienização exigido, a higienização pode ser efetuada por meio apenas de limpeza, ou de limpeza seguida de sanitização. A limpeza consiste essencialmente na eliminação de alimentos remanescentes e remoção de partículas diversas. A etapa de sanitização refere-se à inativação dos micro-organismos patogênicos e redução da quantidade total de micro-organismos. A sanitização pode ser realizada mediante a agentes químicos ou por método físico, em que o calor, na forma de vapor, é aplicado para a descontaminação da superfície. Antes da sanitização é necessário realizar a limpeza de forma adequada, pois esta última pode reduzir os micro-organismos presentes superfície e assim facilitar a etapa seguinte (ICTA, 2010; PAK, 2016).

Tabela 2-3 – Remoção de diferentes tipos de sujidade na indústria dos lacticínios.

| Sujidade | Solubilidade | Eliminação | Evitar |
|------------------|--|--|----------------------|
| Lactose | Solúvel em água | Fácil | Caramelização |
| Gorduras | Pouco solúveis em água, solúvel em soluções alcalinas ou ácidas na presença de substâncias tensoativas | Fácil na presença de substâncias tensoativas | Polimerização |
| Proteínas | Pouco solúveis em água. Solúvel em soluções alcalina | Difícil | Desnaturação |
| Sais Minerais | Monovalente: solubilidade em água, Divalente: solúveis em soluções ácidas. | Relativamente fácil Difícil | Precipitação |

Fonte: Adaptado de (ICTA, 2010).

O método empregado para a remoção de sujidades é função de um conjunto de fatores como: tipo de sujidade, tipo de superfície e tipo de equipamento. O tipo de sujidade é um critério

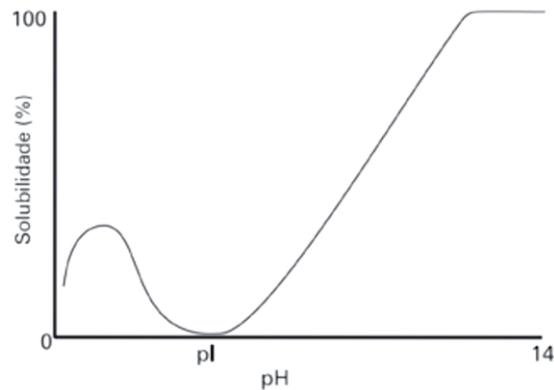
fundamental para selecionar o método de higienização e o detergente a ser aplicado. Os depósitos de sujidade são normalmente misturas complexas, algumas características como solubilidade, facilidade de remoção e tipos de sujidade nas indústrias de laticínios são apresentados na Tabela 2-3. O conhecimento da sua solubilidade é importante para selecionar o produto mais adequado, assim como o conhecimento dos aspectos que podem tornar o processo de limpeza mais viável (ICTA, 2010).

Os detergentes modificam a capacidade de penetração e remoção da sujidade pela água, por meio da transformação de gorduras, da solubilização de proteínas e da dissolução de sais minerais. O detergente deve apresentar características como saponificação, emulsificação, molhagem, solubilização de proteína, manutenção dos resíduos em suspensão, controle de minerais; não ser corrosivo e ser de baixo custo (SILVA *et al.*, 2010).

Dentre os detergentes alcalinos, destaca-se o hidróxido de sódio (NaOH) por apresentar a liberação de 100 % de alcalinidade cáustica, por isso é usado amplamente na limpeza no método de limpeza CIP. Este detergente provoca a saponificação das gorduras e a solubilização dos resíduos de proteína. O NaOH, conhecido como soda, é comercializado nas formas de escama ou perolados. É importante destacar que este composto produz soluções perigosas aos manipuladores e devem ser manipuladas com cuidado. (ANDRADE, 2008; PAK, 2016).

O hidróxido de sódio participa efetivamente da reação de saponificação, transformando os ácidos graxos insolúveis, advindos de gorduras, em sabão que é, por sua vez, solúvel em água. A reação de saponificação consiste em reagir o ácido graxo com NaOH sob aquecimento. Quanto às proteínas, sabe-se que, no ponto isoelétrico (pI) as proteínas apresentam carga elétrica livre igual a zero, nessa condição, os resíduos protéicos são insolúveis em água. O aumento do pH auxilia a remoção de resíduos protéicos já que esses são carregados negativamente. As repulsões eletrostáticas entre os resíduos carregados negativamente mantêm os resíduos suspensos em solução aquosa e assim são removidos da superfície. É mostrado na Figura 2-2 a curva de solubilidade de proteína em função do pH (ANDRADE, 2008).

Figura 2-2 – Efeito do pH na solubilidade de resíduos protéicos.



Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2008).

Os ácidos participam da limpeza para remoção de sais minerais incrustados nas superfícies de equipamentos e utensílios. Estes reagentes podem ser orgânicos, a exemplo do ácido láctico, acético e tartárico ou inorgânicos como nítrico e o fosfórico. No entanto, os ácidos inorgânicos são corrosivos e precisam ser utilizados com inibidores de corrosão, enquanto que os orgânicos são menos agressivos, porém mais caros. Geralmente, ácidos inorgânicos são empregados em limpezas com concentração de 0,5 % de acidez total, com pH de 2,0 aproximadamente. O ácido nítrico, por exemplo, transforma os sais insolúveis em água como carbonato de cálcio e carbonato de magnésio em nitrato de cálcio e de nitrato de magnésio, respectivamente e dióxido de carbono. (ANDRADE, 2008). Os detergentes ácidos quando aquecidos levam a formação de gases tóxicos e corrosivos que podem representar riscos à saúde. Além disso, soluções muito quentes podem provocar a redeposição dos minerais e formação de nova película (ICTA, 2010).

O primeiro enxágue, conhecido com pré-lavagem, pode remover cerca de 90 % dos resíduos solúveis em água. A temperatura da água de enxágue é importante, pois pode causar a desnaturação de proteínas se estiver muito quente ou provocar a solidificação de gorduras, caso esteja fria. Recomenda-se, que a temperatura do primeiro enxágue seja 5 °C acima da temperatura de solidificação da gordura presente do alimento processado (KHALDI *et al.*, 2015; FAN *et al.*, 2018).

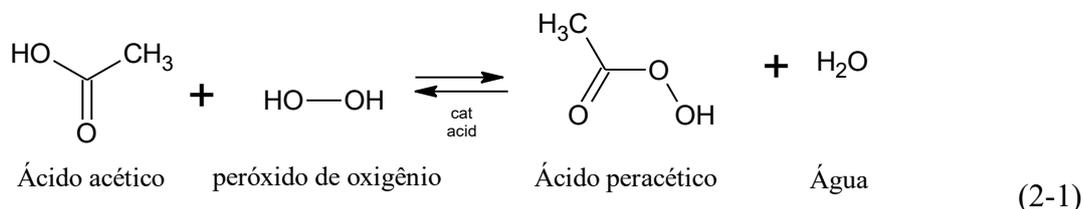
Os detergentes devem ser aplicados em temperaturas elevadas quando possível para favorecer as reações químicas e viabilizar a retirada dos resíduos incrustados na superfície. Dessa forma, recomenda-se que o detergente alcalino seja aplicado a 80 °C e o ácido a 70 °C.

A tecnologia CIP permite o uso de temperatura elevadas, no entanto, a limpeza manual não possibilita essa configuração, já que pode causar danos aos operários (ANDRADE, 2008; NIAMSUWAN *et al.*, 2011).

A etapa de limpeza com o uso de detergentes reduz a contaminação microbiana das superfícies, mas em geral, é necessário a aplicação de agentes sanitizantes para alcançar níveis de assepsia indicados ou regulamentados para determinadas aplicações. O sanitizante empregado deve ser aprovado pelo Ministério da Saúde e da Agricultura. Além disso, é conveniente escolher um sanitizante que apresente um amplo espectro, uma ação rápida, baixa toxicidade e estabilidade. Conjuguar todas essas características exige conhecer as propriedades, vantagens e desvantagens dos sanitizantes físicos e químicos disponíveis (ANDRADE, 2008).

O hipoclorito de sódio é um sanitizante muito utilizado na indústria de alimentos. Apresenta diversas vantagens como: relativamente barato, ação rápida, não afetado pela dureza da água, efetivo contra grande espectro microbiológico em baixas concentrações, os equipamentos não necessitam ser enxaguados após a sanitização, não tóxico nas condições de uso se a concentração for controlada adequadamente. Geralmente, é comercializado na forma líquida em concentrações que variam entre 2 % e 10 % de cloro residual total, expresso em Cl₂. No entanto, apresenta desvantagens como: instabilidade ao armazenamento, inativação pela matéria orgânica, corrosão, irritação da pele, menor eficiência em pH elevados, precipitação em água contendo ferro e oxidação da borracha, que geralmente é parte integrante de equipamentos e acessórios como gaxeta (ANDRADE, 2008).

Outro agente sanitizante muito empregado é o ácido peracético. Esse composto pode ser produzido a partir da reação entre ácido acético e peróxido de oxigênio na presença de catalisador (ácido sulfúrico), conforme mostrado na equação química 2-1.



O ácido peracético foi considerado um agente de desinfecção de alto nível, segundo a Proposta de Classificação dos Esterilizantes e Líquidos Químicos e Desinfetantes pela *Food and Drug Administration* (SILVA, 2010). Além disso, possui largo espectro de atividade, mesmo na presença de matéria orgânica (NASCIMENTO *et al.*, 2003).

De acordo com Schmidell (2007), os mecanismos de ação do ácido peracético, sanitizante de alto nível, no interior da célula são:

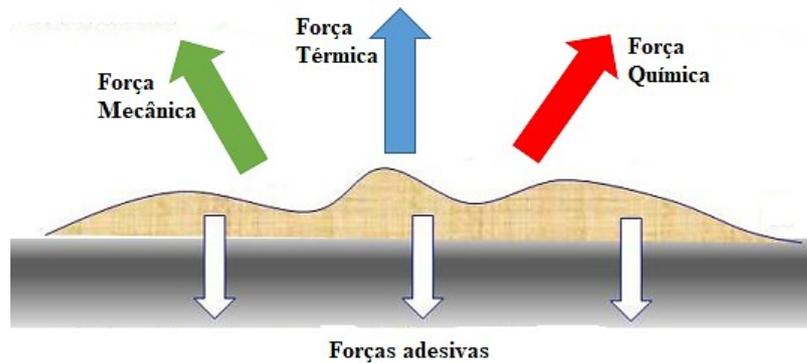
- i) nas enzimas do processo metabólico do micro-organismo;
- ii) na membrana citoplasmática;
- iii) na parede celular, que proporciona rigidez e resistência mecânica aos micro-organismos e participa de alguns processos fisiológicos.

O ácido peracético é considerado atóxico e não possui efeito residual, já que se decompõe em água, oxigênio e dióxido de carbono (GEHR E COCHRANE, 2002). Dessa forma, seu descarte no meio ambiente não necessita de tratamentos especiais pois é biodegradável (SILVA, 2010). Além disso, apresenta outras vantagens como: esporicida em baixas temperaturas e não é afetado pela presença de matéria orgânica, excelente efeito sanitizante contra bactérias Gram-positivas, Gram-negativas, fungos filamentosos e leveduras, vírus e esporos bacterianos e ainda não é afetado pela dureza da água (ANDRADE, 2008).

2.4.1. Fatores associados à higienização

A higienização eficiente é associada à fatores como: detergente utilizado, sanitizante, concentração de uso, o tempo de contato, a temperatura e a vazão. As sujidades são mantidas nas superfícies de equipamentos e tubulações por forças adesivas. A remoção dessas incrustações está condicionada a superação da força adesivas pelas forças mecânicas, térmicas e químicas (Figura 2-3). Além disso, o tempo de contato em que as forças atuam nas sujidades é outro fator determinante. Dessa forma, a energia necessária para remover as sujidades, manter as mesmas em solução e ainda arrastá-las para fora do sistema é ofertada pela energia cinética, química e térmica (PAK, 2016). Selecionar a combinação adequada destes fatores fornece o resultado adequado para higienização (ICTA, 2010).

Figura 2-3 – Esquema de forças envolvidas na limpeza de uma sujidade.



Fonte: Adaptado de (PAK, 2016).

2.4.1.1. Agentes químicos

A força química está relacionada aos detergentes químicos utilizados para remover as sujidades. Primeiramente, utiliza-se alcalino para retirar proteínas, gorduras e açúcares. Em seguida, ácido para dissolver minerais incrustados. Pesquisas mostram que concentrações 0,5 % a 1 % (m/m) de NaOH são tipicamente empregadas para remover incrustações de uma superfície (PAK, 2016).

Depois da limpeza alcalina, normalmente ocorre aplicação de detergente ácido. Ácidos dissolvem minerais, ou seja, depósitos inorgânicos (ICTA, 2010). Os ácidos comumente usados são ácido nítrico ou ácido fosfórico. O ácido nítrico, por exemplo, é tipicamente usado na faixa de concentração de 0,5 % a 1,5 % em massa (PAK, 2016).

2.4.1.2. Temperatura

A força térmica, atua por meio do calor, onde as moléculas possuem maior energia e se movem mais rapidamente a medida em que a temperatura aumenta. Dessa forma, a eficácia dos detergentes é aumentada com aumento de temperatura. Recomenda-se que a limpeza da planta seja realizada na mesma temperatura de operação. Essa medida é tomada para evitar desnaturação e reticulação com aumento da temperatura do meio com a inserção de produtos mais quentes (PAK, 2016). Na Tabela 2-4 são apresentadas faixas de temperaturas recomendadas para aplicação do detergente alcalino para diferentes objetos de limpeza.

Tabela 2-4 – Faixa de temperatura para aplicação do detergente alcalino NaOH.

| Detergente | Faixa de temperatura | Objeto de limpeza |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| NaOH | 60-80 °C | Tanques e tubulações |
| | 70-90 °C | Pasteurizadores |
| | 90-140 °C | Plantas de UHT |

Fonte: (PAK, 2016).

2.4.1.3. Vazão

Em combinação com a química e a força térmica, a força mecânica refere-se às tensões de cisalhamento criadas pelo escoamento. Em uma planta, a velocidade de fluxo dos líquidos de limpeza pode ser aumentada bombeando-a mais rapidamente. Como regra geral do CIP, diz-se que o fluxo deve ser turbulento e que a velocidade do fluxo deve ser de pelo menos 1,5 m/s para ter uma força mecânica adequada (ANDRADE, 2008).

A finalidade do escoamento é transportar os detergentes, promover o contato com a superfície e arrastar as sujidades para fora do equipamento. O *design* dos equipamentos e tubulações deve permitir pleno efeito das forças de cisalhamento, evitando zonas mortas e regiões de difícil acesso e irregularidades. Nesses locais, as tensões na parede podem não serem suficientes mesmo que a velocidade média esteja de acordo com a recomendação, devido às restrições dos acidentes e acessórios (PAK, 2016).

Vazões pulsadas foram empregadas no estudo de limpeza realizado por Bradley *et al.*, (1989) para remoção de sujidades em superfícies quentes onde ocorria desnaturação e agregação das proteínas. Os autores observaram que, com essa alternativa, foi possível minimizar a incrustação de proteínas por promover maior grau de mistura perto da parede.

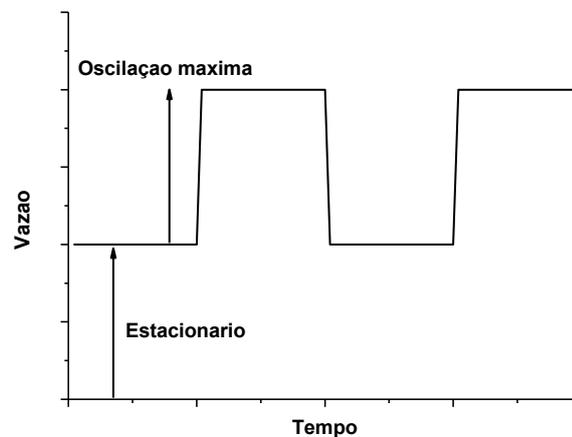
Gillham *et al.* (2000) investigaram a remoção de incrustações de proteína utilizando vazão pulsada na limpeza CIP. Os pesquisadores observaram um significativo aumento das taxas de limpeza em função da pulsação empregada no fluxo. O aumento na taxa de limpeza foi sensível a variação de velocidades, relacionadas a amplitude do pulso, devido à inversão do escoamento e consequente mecanismo de fadiga do depósito. O uso de fluxo pulsante apresentou sucesso e desempenho superior na limpeza de trechos de geometria complexa em comparação ao fluxo constante em estudos desenvolvidos por Schöler *et al.* (2009).

Augustin *et al.*, (2010) observaram em sua pesquisa que o uso de fluxo pulsado de líquido, em baixas frequências, mostrou aumentar o cisalhamento tensões impostas a uma superfície e atenuar a incrustação e assim melhorar o processo de limpeza. Nesse sentido, destacou que o fluxo pulsado mostrou um aumento da eficiência de limpeza em locais de difícil acesso em comparação a operação convencional com vazão estacionária.

Para explicar a melhoria na limpeza, utilizando fluxo pulsado, Augustin *et al.* (2010) supuseram que a magnitude de tensão de cisalhamento e processos de difusão do agente de limpeza na subcamada viscosa e no depósito influenciam positivamente a limpeza. Além disso, a aplicação de medidas transitórias ou regimes de fluxo turbulento têm o potencial de apoiar processos de difusão devido à boa mistura e troca de líquido entre as regiões próxima à parede.

A vazão pulsada é caracterizada por um fluxo estacionário, no qual um fluxo oscilante é superposto. A Figura 2-4 mostra uma onda de pulso quadrado e seus principais componentes.

Figura 2-4 – Componentes da vazão pulsada.



Fonte: Do autor (2019).

Em geral, a intensidade da pulsação sobreposta é quantificada usando o adimensional, W . Esse adimensional relaciona o máximo da oscilação ($w_{os,max}$) e a velocidade de fluxo estacionária ou média \bar{w} (Augustin *et al.*, 2010).

A Equação 2-2 mostra o cálculo para determinação do adimensional W .

$$W = \frac{w_{os,max}}{\bar{w}} \quad (2-2)$$

onde a velocidade média \bar{w} de uma oscilação no intervalo de tempo t é definida como Eq. 2-3.

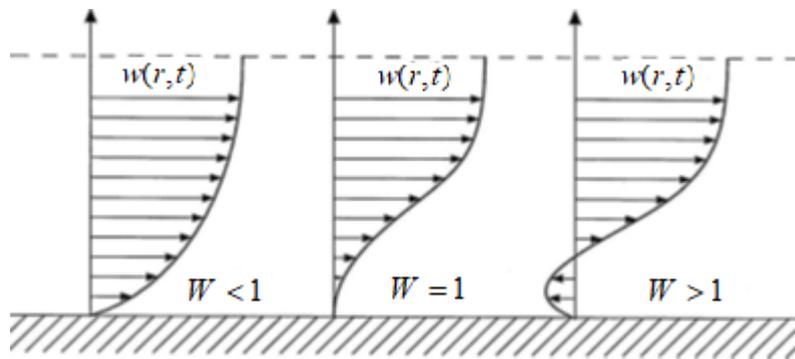
$$\bar{w} = \frac{1}{t_{os}} \int_0^{t_{os}} w(t) dt \quad (2-3)$$

sendo $w(t) = w_{stat} + w_{os,max}$.

em que w_{stat} velocidade estacionária.

Segundo a teoria Schlichting e Gersten (2006), uma ondulação com adimensional $W > 1$ leva a uma inversão temporária no sentido do fluxo nas proximidades da parede, com fenômeno conhecido com efeito anular, conforme mostrado na Fig 2-5.

Figura 2-5 – Perfil de velocidade de vazão pulsada para diferentes ondulações.



Fonte: Adaptado de Augustin *et al.* (2010).

Acredita-se que nesses casos em que $W > 1$ ocorra, próximo à parede, uma separação da subcamada viscosa e na formação de redemoinhos. Esse fenômeno pode diminuir a espessura da subcamada laminar na superfície ao aplicar um fluxo turbulento. Além disso, o máximo de velocidade não ocorre necessariamente no centro do tubo, mas perto da parede, devido à variável relação de forças inerciais e de atrito, característico do efeito anular. Tudo isso contribui para que ocorra grandes taxas de cisalhamento (Gillham *et al.*, 2000; Schöeler *et al.*, 2009; Augustin *et al.*, 2010).

Nesse cenário, velocidades mais altas e grandes tensões cisalhantes tendem a quebrar a camada de incrustação mais rapidamente e assim diminuem a deposição presente na superfície. A vazão pulsada cria altas acelerações periódicas do fluxo de líquido que afetam a superfície da camada de incrustação, podendo assim resultar diminuição do tempo de remoção. A mudança direcional observada na direção de escoamento do líquido contribui para maiores taxas de transferência de massa (AUGUSTIN *et al.*, 2010) e conseqüentemente favorece transporte do agente sanitizante até superfície.

Gillham *et al.* (2000) relataram ainda que a eficiência da limpeza com fluxo em pulsos aumentou com o aumento da frequência e exibiu um valor limite acima do qual tornou-se insignificante.

2.4.2. Métodos de Higienização

A seleção do método de limpeza deve considerar o nível de higienização exigido, o resíduo a ser removido, a conveniência na execução e os custos. São métodos de limpeza: manual, imersão, limpeza de equipamentos e circuitos fechados e pulverização (CARLOTTI, 2008). A higienização realizada manualmente é denominada *cleaning-out-of-place* (COP) ao passo que a higienização automatizada e no local, é conhecida como *clean-in-place* (CIP) (CARNEIRO, 2017).

A limpeza manual é realizada por meio trabalhadores usando água, detergentes e utensílios básicos como escovas, raspadores e materiais abrasivos como palha de aço. O COP é possível para equipamentos de tamanho compatível de acesso ao operador ou ainda quando planta/aparato está parcial ou totalmente desmontado. Esta forma de limpeza é pouco sofisticada, exige muita mão de obra e pode produzir resultados variáveis em relação aos níveis de limpeza (ICTA, 2010; CARLOTTI, 2008).

A tecnologia CIP permite a remoção das sujidades com circulação de soluções detergentes, com vazão, tempo definidos para atingir o objetivo desejado e enxágues (FRYER e ASTERIADOU, 2009; CARNEIRO, 2017). A produção industrial em larga escala demandou sistema de higienização automáticos de limpeza no local (CIP) (FRYER *et al.*, 2006).

2.5. **CLEAN IN PLACE (CIP)**

O método CIP consiste na higienização por sistemas mecânicos e químicos utilizados para preparar equipamentos e tubulações para o processamento de alimentos. Esse recurso é utilizado sem desmontagem do sistema e pode ser feito para remover incrustações ou para preparar a linha para processamento de outro produto ou lote (ICTA, 2010; PAK, 2016).

A implementação de higienização CIP apresenta custos superiores em relação aos métodos manuais de limpeza. No entanto, torna-se vantajoso a longo prazo pois exige menos mão de obra, permite o reaproveitamento das soluções detergentes, controle e qualidades da higienização, segurança alimentar, menor tempo de parada, aumento da produtividade, menor

desgaste de equipamentos e despesa desmontagem das unidades de processamento (CARLOTTI, 2008; PAK, 2016).

Os sistemas CIP podem ser de uso único, de recuperação parcial ou de recuperação completa. A diferença entre esses arranjos está na recuperação dos insumos e utilidades empregados em outras limpezas. No entanto, eles apresentam aspectos em comum, como instrumentos para medir variáveis do processo, como: sensores de vazão, sensores de condutividade, sensores de temperatura, sensores de nível, válvulas e bombas (CARRERA, 2015; CARNEIRO, 2017).

Nos sistemas de uso único as soluções de limpeza são usadas apenas uma vez e em seguida são descartadas. Dessa forma, utilizam apenas um tanque para acondicionar e preparar as soluções de detergentes e sanitizantes para enviar para o sistema a ser higienizado. Essa configuração é bastante adequada para aplicações que exigem alto nível de assepsia. Outra característica do uso único é que são mais simples e mais baratos em relação aos demais sistemas de uso CIP (CARRERA, 2015).

Além disso, os sistemas CIP podem ser de recuperação parcial, no qual as soluções de limpezas são recuperadas para uso subsequente. Esse recurso é aplicável em processos que apresentem poucos resíduos ou enquanto os detergentes apresentem ação esperada. O pré-enxágue viabiliza essa alternativa pois remove significativa parcela das sujidades e assim os detergentes podem ser reaproveitados (CARREIRA, 2015).

Outro sistema de recuperação, é o sistema de recuperação total onde é recuperado as soluções dos detergentes e a água empregada no enxágue. A água recuperada é utilizada como água de pré-enxágue na limpeza CIP posterior. Em geral, essa configuração utiliza três tanques sendo: um para reserva e preparo dos detergentes, o segundo para armazenamento das soluções detergentes diluídas e o terceiro para reservar as águas de enxágue (MOERMAN *et al.*, 2014).

A limpeza CIP é uma tecnologia complexa constituída basicamente por bomba, tanques com soluções químicas e um conjunto de tubulações para distribuição das soluções dentro da indústria. Para operar esse sistema de forma automática são necessários: i) sistemas para coleta de dados como vazão, temperatura e concentração; ii) modelos do processo; iii) instrumentação e sistema de controle, tudo acoplado a um computador capaz de executar a limpeza de forma adequada (ANDRADE, 2008; MENGYUAN FAN, 2014; CARNEIRO, 2017).

2.6. MODELAGEM E FILTROS

O comportamento temporal de sistemas técnicos na área de engenharia é importante e pode ser descrito por modelos matemáticos (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011). Um modelo trata-se de um conjunto de equações que permite prever respostas sobre um sistema (BEQUETTE, 2013).

Os modelos matemáticos podem ser teóricos ou experimentais, sendo o primeiro caracterizado por formular-se com base em equações de balanço de momento, energia ou massa; em equações de estado e equações fenomenológicas. O desenvolvimento de modelos teóricos rigorosos pode não ser viável para representação de processos complexos pois essa abordagem pode exigir um grande número de equações e variáveis de processo e parâmetros de propriedades químicas e físicas desconhecidos (SEBORG *et al.*, 2011; ISERMANN e MUNCHHOF, 2011).

O uso dessas equações produz um modelo expresso por meio de equações diferenciais com estrutura e parâmetros definidos. Em muitos casos, a solução destas equações é muito complicada, sendo então necessário fazer aproximações e simplificações para viabilizar a aplicação do modelo obtido (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011).

Alternativamente, modelos empíricos utilizam apenas informações de entrada e saída para representar o processo. São denominados modelos caixa preta, pois o funcionamento interno da caixa não é conhecido. Geralmente, os modelos dinâmicos empíricos são mais simples do que teóricos e podem ser resolvidos de forma mais rápida, ou seja, menor tempo computacional para a solução do modelo com resposta transitória (SEBORG *et al.*, 2011).

2.6.1. Identificação de sistemas

A investigação experimental é denominada de identificação de sistemas e consiste em um modelo formulado com base em medições. As medições são realizadas na variável de entrada bem como os sinais de saída são coletados, com objetivo de encontrar um modelo matemático que descreva a relação entre a entrada e a saída. Os sinais de entrada podem ser introduzidos artificialmente com certas condições pré-especificadas (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011).

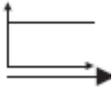
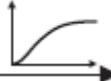
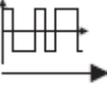
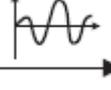
A determinação do modelo utiliza uma função para estimar os parâmetros necessários. Essa função trata a variável de ruído como um erro de predição. Entende-se como erro de predição a parcela residual da saída que não pode ser atribuída às entradas medidas. Os

algoritmos de estimação buscam minimizar uma norma ponderada do erro de predição ao longo da amostragem disponível (LJUNG, 2015).

Segundo (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011) a parametrização refere-se à forma do modelo matemático, o qual pode ser explicitado de diferentes maneiras. Nesse sentido, a representação pode ser dita paramétrica ou não paramétrica. Se a estrutura for assumida corretamente os resultados podem ser bastante precisos. Os modelos paramétricos são equações que representam a relação entre entrada e saída, contem número finito de parâmetros de forma explícita e apresentam estrutura definida. Exemplos são equações diferenciais e função de transferência. Modelos não paramétricos representam a relação entrada/saída no entanto, não apresentam estrutura específica.

Além disso, ambos os modelos, paramétricos e não paramétricos, podem ser classificados de acordo com sinal de entrada e saída em modelos contínuos no tempo ou modelos discretos no tempo. Outra classificação refere-se aos sinais de teste aplicados na entrada, os quais podem ser determinísticos, que são aqueles analiticamente descritíveis ou serem estocástico, aleatório (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011). Na Tabela 2-5 são apresentados dois métodos diferentes de identificação de sistemas.

Tabela 2-5 – Métodos de identificação de modelos e aplicabilidade.

| Método | Entrada | Modelo | Saída | Fidelidade do Modelo | Escopo de aplicação |
|--|---|---------------------------|---|----------------------|---|
| Determinação de Valores Característicos |  | $\frac{K}{(1+Ts)^n}$ |  | Médio | Modelo robusto. Sintonia de controladores. |
| Ajuste de modelo / Estimação de parâmetros |  | $\frac{b_0+b_1s}{1+a_1s}$ |  | Bom | Design de controladores adaptativos. Detecção de falhas. |

Fonte: Adaptado de (ISERMANN e MUNCHHOF, 2011).

A representação de um sistema através da identificação é um processo iterativo, no qual é possível identificar modelos com diferentes estruturas e comparar o desempenho de cada um. É recomendado que se inicie estimando modelos simples, e de acordo com o desempenho e finalidade do modelo, o nível de complexidade seja aumentado gradualmente. Dessa forma,

escolhe-se o modelo mais simples para descrever o sistema em estudo. Outra razão para selecionar estruturas mais simples é que os modelos de ordem superior nem sempre são os mais precisos (LJUNG, 2015).

A dinâmica do sistema, em termos de dados de entrada e saída, pode ser estimada através de entradas testes como pulsos, impulsos e sinais periódicos no domínio da frequência para obter informações sobre o sistema e avaliar a adequabilidade de um modelo linear. Dessa forma, recomenda-se iniciar a investigação com modelos paramétricos na seguinte ordem: função de transferência, modelos ARX e representação de espaço de estado, que são as alternativas que fornecem estruturas mais simples (LJUNG, 2015).

Um modelo matemático busca representar o comportamento real de um sistema, no entanto, a forma de representá-lo não é único. Essa representação pode ser feita de diversas formas, dependendo da perspectiva considerada. Para a análise da resposta transiente de um sistema, de única entrada e única saída - *single input single output* (SISO) a representação pela função de transferência pode ser mais conveniente que qualquer outra forma (OGATA,2010).

De acordo com Smith e Corripio (2008), a função de transferência é uma equação algébrica característica do processo, a qual consiste na conversão de equações diferenciais por meio da transformada de Laplace. Essas equações diferenciais representam o comportamento dinâmico de variáveis de saída em decorrência das funções forçadas na entrada.

Os parâmetros de um bom modelo devem minimizar o erro quadrático médio (MSE), dada por uma soma de erro sistemático e da variância. Um modelo flexível, de alta ordem, produz um pequeno erro sistemático e grande variância, enquanto um modelo mais simples, com baixa ordem, gera maiores erros sistemáticos e menor variância. Normalmente, investiga-se essa compensação entre erros de viés e variância por testes de validação (LJUNG, 2015).

A determinação dos modelos, por meio de identificação de sistemas, está condicionada a alimentação de informações de dados referentes à entrada e à saída do sistema. No entanto, a amostragem do sinal pode estar sujeita a ruídos decorrentes de diversos fatores. Nesse sentido, é importante avaliar a amostragem do sinal e utilizar técnicas de suavização para minimizar os impactos de perturbações externas.

2.6.2. Filtros

O ruído associado as medições pode surgir a partir do próprio dispositivo, de equipamentos elétricos ou em consequência do processo em si. Os ruídos decorrentes de efeitos

elétricos podem ser minimizados com blindagem de cabos e aterramento adequado. Outra alternativa é o condicionamento do sinal ou conhecido também como filtragem (MCCONNELL e JERNIGAN, 2005).

Os efeitos dos ruídos podem ser minimizados com essa técnica o que aumenta a vida útil do elemento final de controle, porque as intervenções e movimentos como em válvulas são reduzidos. É interessante utilizar um filtro para condicionar os dados do processo antes da amostragem a fim de remover os ruídos. Filtros analógicos são usados para suavizar o ruído experimental. Seu funcionamento é descrito por uma função de transferência de primeira ordem. No entanto, para tratar sinais variados, a filtragem pode ser feita com modelos digitais como: filtro exponencial e filtro para picos de ruído - *spike* (SEBORG *et al*, 2011).

Filtro *spike*

A medida amostrada por um instrumento de aferição pode mudar repentinamente, em um valor de grande magnitude, e em seguida retornar ao valor original. Nesse caso, diz-se que ocorreu um ruído de pico (*spike*).

Os picos instantâneos podem ser causados por sinais elétricos adulterados por fontes externas presentes no ambiente do sensor. Caso estes picos não forem removidos por um sistema de filtragem, a medição ruidosa é enviada ao controlador, o qual produzirá grandes e repentinas mudanças na variável manipulada e ação abrupta do controlador (LEVINE, 1999).

O filtro de pico – *spike*, é usado para limitar o quanto a saída filtrada pode mudar de um instante de amostragem para o seguinte. Nesse recurso, permite-se uma mudança máxima, de forma que, caso ocorra uma grande mudança na medição, o filtro substitui a medida aferida pela saída do filtro anterior mais ou menos a alteração máxima permitida (SEBORG *et al.*, 2011).

Filtro Exponencial

Um dos filtros aplicáveis a suavização de sinais e medidas é o filtro exponencial, no qual a derivada dy/dt pode ser aproximado por diferença finita, como mostrado na Equação 2-4.

$$\frac{dy_F}{dt} = \frac{y_F(k) - y_F(k-1)}{\Delta t} \quad (2-4)$$

A medida filtrada é uma soma ponderada da medição atual $y_m(k)$ e o valor filtrado na amostragem anterior $y_F(k-1)$. Destaca-se que quando alfa tende a um o sinal de saída torna-

se não filtrado, de forma que a saída é a própria medida bruta aferida. Por outro lado, alfa tendendo a zero a medição atual bruta é desprezada (SEBORG *et al.*, 2011).

O uso do filtro exponencial exibe vantagens em relação tratamento de dados, tais como: método simples de implementação, acurácia nas medidas e ser auto-adaptável às mudanças do sistema (NOVAES *et al.* 2008). Com esta técnica de suavização ocorre a interpolação entre o valor suavizado e a observação atual, onde a constante de suavização exponencial controla o peso atribuído a medida atual corrente e a medida anterior filtrada. (NOVAES, 2007).

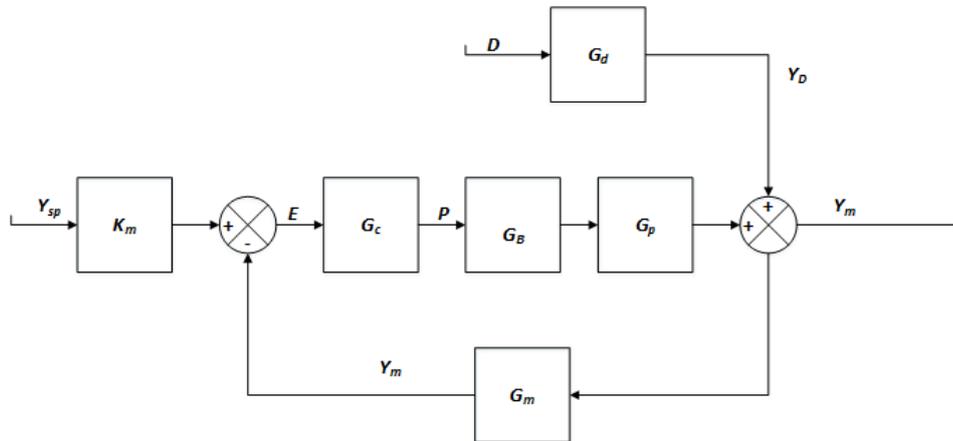
A constante alfa no filtro Exponencial deve ser escolhida de forma apropriada já que, quanto menor o valor atribuído, maior o peso atribuído às últimas observações, o que confere uma dinâmica mais lenta as respostas do sistema. Dessa forma, constantes altas produzem maior variabilidade dos resultados. Alguns valores da Constante de Suavização Exponencial devem ser testados, a fim de que se determine a sensibilidade do sinal filtrado comparada aos valores reais (MCCLAVE *et al.*, 2004).

2.7. PROJETO DE CONTROLADORES

De acordo com Bega *et al.* (2011), é fundamental controlar para garantir a qualidade do produto nas condições especificadas, manter a segurança das condições operacionais da indústria ou ainda para controlar as propriedades dos resíduos gerados e dispensa-los em conformidade com a legislação. No cenário deste trabalho, é necessário obter um sistema de controle capaz de produzir as dinâmicas desejadas para execução da limpeza CIP.

Dessa forma, é importante encontrar valores para os parâmetros do controlador PID (proporcional, integral e derivativo) a fim de produzir a performance desejada na malha de controle. A Figura 2-6 mostra o diagrama de blocos genérico com a dinâmica dos instrumentos presente na malha de controle através das funções de transferências G_i .

Figura 2-6 – Diagrama de blocos para malha de controle *feedback*.



Fonte: Adaptado de (SEBORG *et al.*, 2011).

onde, a dinâmica do medidor é representada por G_m , da bomba G_B , do controlador G_c e da planta G_p . O bloco indicado com K_m trata-se do ganho do medidor e G_d perturbações externas de forma não controlável.

Em malhas de controle *feedback*, com controladores do tipo PID, a parcela proporcional atua com uma ação $p(t)$ proporcional ao erro $e(t)$ – Equação 2-5.

$$p(t) = \bar{p} + K_C \cdot e(t) \quad (2-5)$$

onde o erro é definido como a diferença entre o valor do *set point* (y_{sp}) e o valor medido em determinado instante ($y_m(t)$).

Utilizando o conceito de variável desvio e aplicando a transformada de Laplace tem-se a Equação 2-6 que expressa a função de transferência do controlador proporcional.

$$G_C = \frac{P(s)}{E(s)} = K_C \quad (2-6)$$

Os valores da constante proporcional do controle podem ser determinados para que a saída produzida pelo controlador seja mais sensível em relação ao desvio do *set point*.

No entanto, uma desvantagem está no uso do controlador proporcional de forma isolada. Nessa condição, caso a diferença entre o valor medido e o desejado fique constante, conseqüentemente o erro se torna constante, o que gera um sinal de saída constante e a variável manipulada não altera o valor. Esse fenômeno é conhecido como *offset*.

Nesse sentido, a ação integral responde a fim de eliminar esse inconveniente, fazendo o sinal $p(t)$ variar com a integral do erro, conforme apresenta a Equação 2-7.

$$p(t) = \bar{p} + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2-7)$$

O sinal $p(t)$ produzido pela ação integral corrige o fenômeno de *offset* pois um erro constante ainda gera um sinal diferente de zero. Em termos de variável desvio e com base na relação algébrica de entradas e saídas- Equação 2-8.

$$G_C(s) = \frac{P(s)}{E(s)} = \frac{1}{\tau_I s} \quad (2-8)$$

O controlador integral não é usado sozinho, já que uma ação de controle será pequena até que o sinal de erro tenha persistido, em contraste com a ação proporcional que promove uma ação corretiva imediatamente que o erro é detectado. Dessa forma, utiliza-se normalmente o conjunto proporcional e integral (PI).

Uma desvantagem da parcela integral trata-se das respostas oscilatórias na variável controlada. Uma quantidade limitada de oscilação geralmente pode ser tolerada, porque esse comportamento pode estar associado a uma resposta mais rápida e enérgica. O efeito oscilatório indesejável da ação integral pode ser evitado pelo uso adequado da ação derivativa.

A ação derivativa do controlador PID toma ação de forma proporcional à derivada do erro instantâneo- Equação 2-9. A introdução deste parâmetro busca amenizar o comportamento oscilatório causado pela ação integral, com uma espécie de predição ao comportamento futuro do sistema.

$$p(t) = \bar{p} + \tau_D \frac{de}{dt} \quad (2-9)$$

Analogamente ao tratamento feito para ação proporcional e integral, utiliza-se a Equação 2-10 em variável desvio e aplica-se transformada Laplace.

$$G_C(s) = \frac{P(s)}{E(s)} = \tau_D s \quad (2-10)$$

A ação conjunta das parcelas proporcional, integral e derivativa no controlador pode ser escrito de acordo com a Equação 2-11:

$$p = \bar{p} + K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de}{dt} \right] \quad (2-11)$$

A equação do controlador PID em variável desvio no domínio de Laplace é dada pela Equação 2-12.

$$G_C = \frac{P(s)}{E(s)} = K_C \left[1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right] \quad (2-12)$$

A Equação 2-13 pode ser escrita na forma expandida, na forma de ganhos, conforme equação apresentada no MATLAB® (CARNEIRO, 2017).

$$G_C = K_C + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2-13)$$

sendo: $K_I = \frac{K_C}{\tau_I}$; $K_D = K_C \tau_D$.

Diversas metodologias de projeto de controladores PID estão disponíveis na literatura. São exemplos: Síntese Direta (SD), Modelo Interno de Controle (IMC), ITAE Servo e Hagglund e Astrom.

2.7.1. Síntese Direta (SD)

O método Síntese Direta (SD) para projeto dos parâmetros do controlador PID busca impor uma dinâmica ao processo controlado através de uma função de transferência desejada ao laço fechado. Considerando $G=G_p G_B$, sem perda de generalidade, a função de transferência para laço fechado – Equação 2-14.

$$\frac{Y}{Y_{sp}} = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_C s + 1} \quad (2-14)$$

τ_c é conhecido como constante do tempo desejado de laço fechado. Essa abordagem da função de transferência desejada com tempo morto é muito pertinente, visto que do ponto de vista físico e industrial é impossível que as variáveis controladas respondam as mudanças no *set point* imediatamente no momento da alteração.

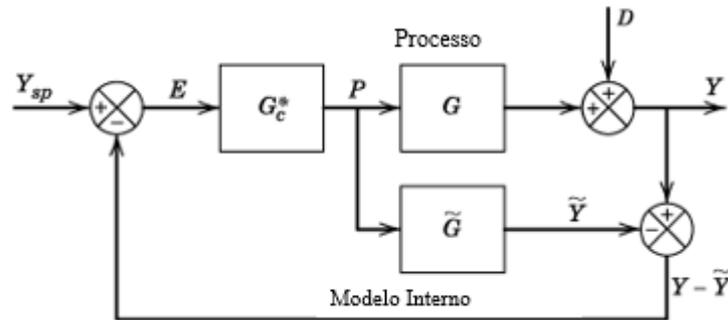
O valor da constante τ_C permite ajustar o controlador para que ele seja mais enérgico, para valores menores de τ_C . Por outro lado, valores maiores de τ_C confere um caráter mais conservador ao controlador. Nesse sentido, segundo Chien e Fruehauf (1990) recomenda-se estabelecer valores de τ_C entre o valor da constante de tempo da planta τ e o valor de θ .

2.7.2. Controle por Modelo Interno (IMC)

O projeto de controladores pelo método de Modelo Interno baseia-se em um modelo analítico mais abrangente. Assim como o método de Síntese Direta, o Modelo Interno assume um modelo de processo para configuração do controlador. Dessa forma, as considerações sobre a constante de tempo τ_c do modelo imposto são igualmente adequadas.

A abordagem IMC tem a vantagem de permitir que as incertezas do modelo serem considerados de forma mais sistemática. Nesse sentido, é apreciável por confrontar as incertezas do modelo com o processo real. O sinal de resposta enviado ao controlador é resultado da diferença entre o valor do processo e o valor estimado pelo modelo, conforme mostra a Figura 2-7.

Figura 2-7 – Diagrama de blocos para controlador de Modelo Interno.



Fonte: Adaptado de Seborg *et al.*, (2011).

2.7.3. ITAE Servo

Projeto de controladores podem ser estimados em busca de configurações que minimizam um critério de erro integral. A Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (ITAE) penaliza erros que persistem ao longo do tempo. A formulação das equações de projeto segundo este método assume que a perturbação (G_d) é idêntica ao modelo de processo.

2.7.4. Hagglund Astrom

Hagglund e Astrom (2002) desenvolveram relações para projeto de controladores PI baseado em critérios para minimização da integral do erro. Além disso, definiram uma função objetivo que maximiza o índice de performance impondo determinado grau de robustez ao controlador (PANAGOPOULOS *et al.*, 2002)

2.8. PLANEJAMENTO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

O processo de higienização CIP envolve diversas variáveis. Neste estudo, investiga-se se o efeito periódico de pulsação com as variáveis ondulação e período é significativo. Assim, a análise e planejamento de experimentos faz-se necessária utilizando técnicas estatísticas.

A técnica de superfície de resposta baseia-se em planejamento fatorial e permite avaliar os efeitos individuais de cada variável e suas possíveis interações assim como equacionar um modelo empírico dos resultados em função das variáveis estudadas. (BOX *et al.*, 2005).

O planejamento composto central (PCC) é uma das configurações mais utilizadas para o *design* de superfícies de resposta, visto que é capaz de gerar funções objetivo não linear como modelos quadráticos completos. Esse planejamento é formado por três grupos de pontos: i) combinação fatorial das variáveis com 2^k experimentos, adicionadas a $2k$ pontos axiais e n pontos centrais, sendo k o número de variáveis controladas investigadas no estudo. (MONTGOMERY, 2009; LI *et al.*, 2015; NAVES *et al.*, 2017).

2.9. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Até o momento há poucas simulações numéricas do processo de limpeza, que considera a camada limite para o fluxo pulsado. As seções de teste que são usadas para os experimentos exigem uma discretização altamente detalhada, já que os efeitos de separação nas camadas devem ser levados em consideração (AUGUSTIN *et al.*, 2010; SCHÖLER *et al.*, 2009).

Além disso, é possível investigar informações sobre regiões de difícil acesso. Para representar escoamentos turbulentos, Augustin *et al.* (2010) utilizaram o modelo $k-\varepsilon$. Yang *et al.* (2018) também empregou o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ para estudar o processo de enxágue de sistemas CIP.

A turbulência na entrada é definida pela intensidade de turbulência (T_i) e o comprimento de turbulência escala (T_l) (WILCOX, 2006). Estudos da influência da intensidade de turbulência foram estudados por Jensen (2007) e Yang *et al.* (2018). Baseado nos resultados de intensidade de turbulência nas simulações de estado estacionário, as condições de limite de entrada selecionadas foram T_i 5% e T_l 10% do diâmetro do tubo.

2.10. CONSUMO ENERGÉTICO

Os custos de operação do processo CIP incidem sobre detergentes, água e energia (DIF *et al.*, 2013). Yang *et al.*, (2018) relatou que a maior parte do tempo de limpeza e os custos são relacionados aos tratamentos alcalinos, ácidos, sanitização e enxágue. Dessa forma, aprimorar a técnica CIP é necessária tanto em termos de minimizar o custo da água como energia devido aos aspectos ambientais (WILSON, 2005).

A energia consumida pode ser expressa com relação a potência consumida pelo equipamento durante determinado intervalo de tempo. A potência total pode ser calculada em termos dos valores eficazes da tensão e corrente da linha. Além disso, para a potência total fornecida, a carga considera o ângulo de fase entre a tensão da fase e a corrente (NILSSON e RIEDEL, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. UNIDADE EXPERIMENTAL

A planta utilizada para realizar este estudo foi um simulado de linha de circulação de leite com características semelhantes as observadas nos laticínios. Essa linha foi instalada no Laboratório de Bioprocessos, localizado no Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). O material utilizado na produção da planta foi o aço inoxidável AISI 304, polimento nº 4, sendo atendidas as mesmas condições de superfície para o uso na indústria de alimentos. A planta de linha de circulação de leite pode ser observada na Figura 3-1.

Figura 3-1 – Protótipo simulador de linha de circulação de leite



Fonte: Do autor (2019).

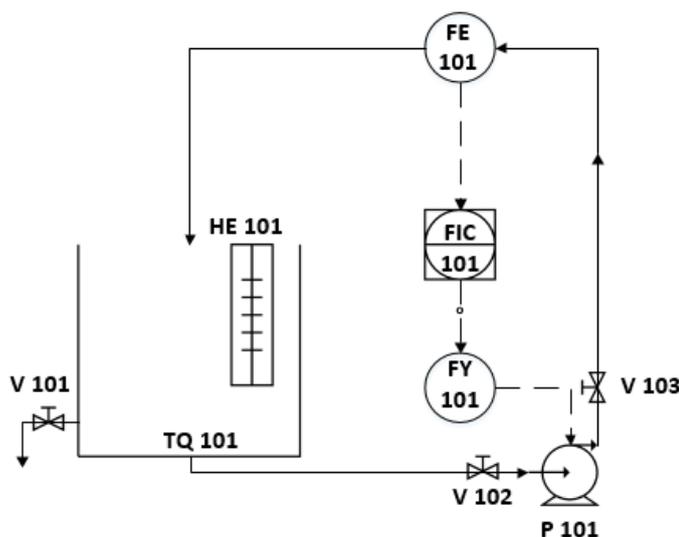
Os equipamentos e instrumentos que compõem a planta são:

- Tanque (TQ 101) para armazenamento de leite, soluções de detergentes e solução de sanitizantes para serem empregadas na limpeza CIP com capacidade para 25 litros.
- Resistência elétrica (HE 101) com potência de 1000W para aquecimento da solução de detergente alcalino posicionada no interior do tanque.
- Válvulas de bloqueio tipo esfera tripartida (V 101; V 102 e V 103) de ½” de passagem plena com conexão do tipo rosca. A esfera construída em aço inoxidável 304.
- Bomba centrífuga (P 101) de ½ HP para promover a circulação das soluções de limpeza e água no sistema em estudo.
- Sensor de vazão (FE 101) do tipo turbina de ½” modelo YF-S201.

- Inversor de frequência (FY) instalado para manipular a bomba e alterar a vazão do fluido no processo de limpeza.
- Sensor de temperatura digital (TT) para aferição e controle da temperatura da solução detergente.
- Sistema de controle: Placa Arduino Nano, processador ATmega328P (FIC 101).
- Cupons de prova em aço inoxidável 304, polimento nº 4 de ½" de diâmetro na forma de: i) Tubo reto horizontal com aprox. 20 cm de comprimento (TR I) posicionado após o medidor de vazão (FE 101); ii) cotovelo 90° após o cupom TR I e iii) Tubo reto vertical com aprox. 20 cm de comprimento (TR II) instalado após o acessório cotovelo.

A Figura 3-2 mostra esquematicamente o protótipo de sistema CIP de uso único e sua respectiva instrumentação para o sistema de vazão.

Figura 3-2 – Representação esquemática da bancada com instrumentação.



Fonte: Do autor (2019).

Instrumentou-se a planta com o sensor de vazão do tipo turbina (Figura 3-2) que envia informação ao controlador e esse por sua vez responde ao inversor que atua na bomba para manipulação da vazão. Realizou-se a calibração desse instrumento relacionando o número de rotações com o fluxo de matéria passante. Em seguida, determinou-se os modelos empíricos para representar a vazão em função da potência da bomba.

3.2. FILTROS

Os recursos usados para suavizar os ruídos das medidas experimentais foram os filtros *spike* e exponencial. Esses filtros foram implementados na plataforma Arduino em série de forma que o valor filtrado pelo filtro *spike* era enviado ao filtro exponencial.

O equacionamento do filtro *spike* implementado segue o condicionamento, conforme mostrado a Equação 3-1.

$$y_F(k) = \begin{cases} y_m(k) & \text{se } y_m(k) - y_F(k-1) \leq \Delta y \\ y_F(k-1) - \Delta y & \text{se } y_F(k-1) - y_m(k) > \Delta y \\ y_F(k-1) + \Delta y & \text{se } y_m(k) - y_F(k-1) > \Delta y \end{cases} \quad (3-1)$$

O filtro exponencial, útil para amortecer oscilações de alta frequência decorrente de ruídos elétricos, foi implementado conforme mostrado na Equação 3-2.

$$y_F(k) = \alpha \cdot y_m(k) + (1 - \alpha) \cdot y_F(k-1) \quad (3-2)$$

O valor de Δy foi definido como valor da imprecisão do instrumento de medida em relação ao fundo de escala. Neste caso, a imprecisão de 3% com fundo de escala de aproximadamente 33L/min. Dessa forma, definiu-se a variação máxima como mais ou menos 1 L/min.

O parâmetro α mais adequado para implementação do filtro foi determinado por meio de testes preliminares, na busca de um valor intermediário que fosse capaz de filtrar o sinal e que não atrasasse de forma muito expressiva a dinâmica da planta.

3.3. DETERMINAÇÃO DE MODELOS

O reservatório TQ 101 foi preenchido com água. Em seguida, as válvulas V101 e V102 foram completamente abertas de modo a circulação configurava um circuito fechado. Os resultados de vazão foram aferidos pelo sensor YF101 e registrados em um computador.

Para promover a circulação de água e identificação de modelos, desenvolveu-se um código na plataforma Arduino para operação manual do sistema. Dessa forma, entradas aleatórias de potência provocaram resposta em termos de amplitude e período na vazão medida. Além disso, o sistema foi submetido a outra perturbação do tipo degrau, de forma manual, e coletou-se as medidas de vazão. Ambos os resultados foram registrados para ajuste de modelos.

A equação genérica para função de transferência de primeira ordem é apresentada na Equação (3-3), sendo K o ganho, τ constante de tempo e θ o tempo morto.

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3-3)$$

Aplicando a inversa de Laplace na Equação 3-3, é possível avaliar a resposta temporal para perturbação do tipo degrau de amplitude M conforme mostrado na Equação 3-4.

$$y(t) = KM \left(1 - e^{-\frac{(t-\theta)}{\tau}} \right) \quad (3-4)$$

De acordo com Seborg *et. al* (2011) algumas técnicas para desenvolvimento de modelos empíricos através de dados do processo são regressão linear, regressão não linear e ajuste gráfico. Um modelo não linear geral pode ser escrito como mostra Equação 3-5.

$$y = f(u_1, u_2, u_3, \dots, \beta_1, \beta_2, \beta_3) \quad (3-5)$$

Sendo y a variável de saída, u_i as entradas e β_i os parâmetros estimados, com i sendo o número de entradas. A regressão pode ser feita definindo a Equação 3-6 como a soma dos quadrados dos erros (S) o valor a ser minimizado.

$$S = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3-6)$$

onde \hat{y}_i valor predito pelo modelo e y_i é o valor medido.

Os parâmetros de um bom modelo devem minimizar a raiz do erro quadrático médio (RMSE), dado pela soma de erro sistemático e erro aleatório relacionado à variância (LJUNG, 2015), o recurso utilizado para determinação dos parâmetros foi ajuste não linear no Excel[®]. Dessa forma, avaliou-se a qualidade do ajuste por meio do valor de RMSE dado pela Eq. 3-7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (3-7)$$

em que N é o tamanho da amostra.

Posteriormente, com o uso dos métodos apropriados de projeto, utilizou-se os parâmetros do modelo identificado para determinação dos parâmetros do controlador.

3.4. PROJETO E ANÁLISE DOS CONTROLADORES

Para diversas aplicações do controle automático existe uma larga faixa de valores para os parâmetros para o controlador. Dessa forma, é importante encontrar os valores para os parâmetros do controlador PID a fim de adequar a performance da malha de controle. De acordo com as equações da Tabela 3-1, determinou-se os parâmetros dos controladores clássicos para o controle da vazão.

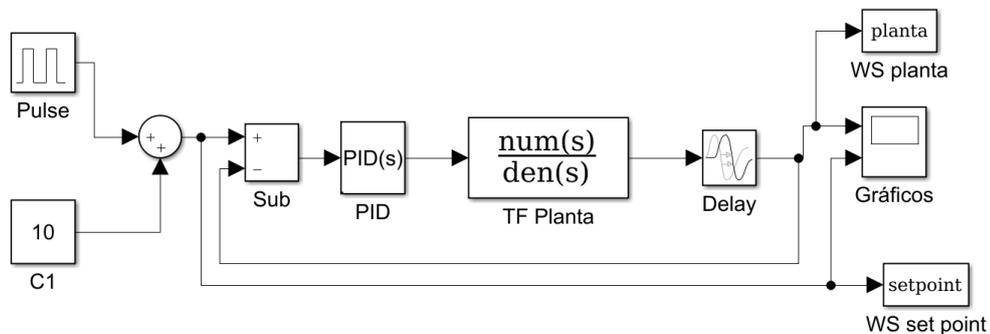
Tabela 3-1 – Equações de projeto para controladores PID.

| | Síntese Direta | Modelo Interno | ITAE Servo | Hagglund e Astrom |
|----------|--|---|--|--|
| K_C | $\frac{\tau}{\tau_c + \theta} \frac{1}{K}$ | $\frac{\tau + \frac{\theta}{2}}{\tau_c + \frac{\theta}{2}} \frac{1}{K}$ | $\frac{0,965}{K} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,85}$ | $\frac{0,14}{K} + \frac{0,28\tau}{K\theta}$ |
| τ_I | τ | $\tau + \frac{\theta}{2}$ | $\frac{\tau}{\left(0,796 - 0,1465\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$ | $0,33\theta + \frac{6,8\tau}{10\theta + \tau}$ |
| τ_D | 0 | $\frac{\tau\theta}{2\tau + \theta}$ | $\tau \left[0,308\left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{0,929}\right]$ | 0 |

Fonte: Adaptado de Seborg *et al.*, (2011).

Em seguida, estes parâmetros obtidos foram implementados para investigar o comportamento do sistema no controle de vazão para ondas quadradas via simulação utilizando a ferramenta *Simulink* do MATLAB®, conforme mostrado na Figura 3-3, com o arranjo montando no *software*.

Figura 3-3 – Arranjo para simulação do desempenho dos controladores projetados.



Fonte: Do autor (2019).

De posse dos resultados obtidos, realizou-se a verificação do desempenho dos controladores experimentalmente. Para tanto, ligou-se a planta com tanque TQ 101 abastecido com água e inseriu-se no supervisor os parâmetros K_C , K_I e K_D e monitorou-se a dinâmica da vazão no tempo para todos os métodos propostos. Esse procedimento foi feito para todos os cinco projetos realizados e construiu-se os respectivos gráficos juntamente confrontados com os perfis simulados.

3.5. SINTONIA

A sintonia fina buscou a melhor performance do controlador através do ajuste dos parâmetros. Dessa forma, selecionou-se a faixa de valores, dos controladores projetados, que ofereceu melhor desempenho ao sistema em relação ao *set point* desejado.

Sabe-se que o parâmetro K_C toma uma ação proporcional ao desvio do *setpoint*. Nesse sentido, quanto maior o valor deste parâmetro, mais “vigorosa” é a ação do controlador, ao contrário, quanto menor o valor mais “suave” é a ação do controlador. Assim, procurou-se preservar os valores de K_C menores dentre os produzidos, para evitar *overshoots* na vazão.

O outro parâmetro K_I está relacionado ao tempo de resposta frente as perturbações e a energia da ação frente a erros acumulados no decorrer do tempo. Dessa forma, buscou-se conservar os menores valores de K_I visto que, nas mudanças de *set point*, o valor do erro acumulado já é um valor significativamente pronunciado. Sabe-se os maiores valores de K_I produzem um comportamento oscilatório no sistema.

Além disso, considerou-se preservar a parcela derivativa no controlador a fim de minimizar o caráter oscilatório causada pela ação integral.

3.6. ADESÃO MICROBIANA

No estudo da limpeza CIP, na linha de circulação de leite, foram utilizados cupons de prova nos formatos: tubos retos e cotovelo 90° de forma a representar trechos e acessórios comumente encontrados na indústria láctea e as diferentes intensidades de força de cisalhamento no interior da linha de circulação.

Previamente, todos os cupons usados neste estudo da limpeza CIP foram higienizados por meio de escovação com uso de água e detergente neutro líquido e enxaguados com água

destilada. Em seguida, foram autoclavados por 30 min a 121°C e 11 bar para garantir a descontaminação microbiana.

Os cupons após a higienização foram preenchidos com leite cru adquirido do comércio local, logo após a ordenha. O leite foi transportado para o laboratório sob refrigeração. Os cupons foram submetidos em incubadora tipo BOD (TECNAL) à 37 °C por um período de 2 horas, em condição estática, a fim de se obter uma adesão microbiana nas superfícies a partir da contaminação natural presente no leite.

As condições estáticas de incubação foram escolhidas para obter homogeneidade nos níveis de sujidade na superfície dos cupons, a fim de isolar efeito da hidrodinâmica durante a adesão e formação de biofilme. Após o período de adesão, o leite inserido foi drenado e os cupons foram secos à temperatura de 25°C e instalados na planta para serem submetidos ao processo CIP. Os procedimentos de higienização foram realizados em duplicata para cada condição proposta.

A adesão e contagem foi realizada também antes do processo CIP, a fim de determinar a contagem das células aderidas inicialmente. Dessa forma, os cupons foram incubados à 37 °C por 2 horas, em condição estática, para promoção da adesão, e em seguida, foram submetidos a rinsagem para liberação das células microbianas, conforme descrito na seção 3.9 Coleta e Contagem Microbiana.

3.7. PROCESSO CIP CONVENCIONAL

Neste trabalho avaliou-se a higienização com uma configuração convencional, com as seguintes etapas do processo CIP: enxágue inicial, uso do detergente alcalino, enxágue, aplicação do sanitizante e enxágue, com velocidade constante de 1,5m/s. Essas etapas estão descritas a seguir.

3.7.1. Enxágue Inicial

Inicialmente o tanque foi preenchido com água potável obtida da rede de distribuição. Depois disso, a planta foi ligada de forma a acionar a bomba e as válvulas foram completamente abertas. Esse procedimento foi realizado por um período de aproximadamente 5 min com água a 30 °C.

3.7.2. Detergente Alcalino

Posteriormente, realizou-se a limpeza com uso de detergente alcalino NaOH na concentração de 1% (m/m). Para o preparo desta solução, a quantidade de líquido dentro do tanque era estimada por meio do nível. Esse patamar de água foi adotado com referencial de forma em todas as corridas foram realizadas com mesmo nível de líquido no tanque. A concentração em título massa é expresso pela fórmula 3-8.

$$\tau = \frac{m_1}{m} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (3-8)$$

Considerando que o hidróxido de sódio empregado nas rotinas de limpeza de processo CIP são produtos com uma fração de impurezas. Dessa forma, é necessário contabilizar a pureza do produto utilizado. Neste trabalho foram utilizadas sodas comerciais da marca Politriz com pureza média de 98% de acordo com fornecedor.

Assim, a quantidade mássica em gramas utilizada em cada corrida de limpeza do detergente alcalino era calculada conforme equação 3-9.

$$m_1 = \frac{m_2 \cdot \tau}{P \cdot (1 - \tau)} \quad (3-9)$$

em que: m_1 : massa de soluto NaOH [g];

m_2 : massa de solvente água [g];

τ : concentração título massa/massa [%];

P : pureza do agente químico [%]

Preparada a solução, o detergente circulou pelo sistema, em circuito fechado, durante 15 minutos a temperatura de 70°C.

3.7.3. Enxágue

Em seguida, realizou-se o enxágue do detergente alcalino com a passagem de água potável a temperatura de 25°C durante 4 minutos. Este tempo foi determinado, previamente, a partir de medidas de pH e indicador fenolftaleína que avaliaram o fluido que saía do sistema.

3.7.4. Sanitização

A próxima etapa, contemplava a sanitização das superfícies em estudo. Nesta etapa, utilizou-se uma solução de ácido peracético com concentração de 100 ppm, preparada a partir

do mesmo reagente com concentração inicial de 15 % (v/v). Preparada a solução, o sanitizante era circulado pela tubulação por 15 minutos a temperatura ambiente.

3.7.5. Enxágue

Após a etapa de sanitização, realizou-se o enxágue do agente sanitizante remanescente no sistema com água potável a temperatura ambiente durante aproximadamente 3 minutos.

3.8. PROCESSO CIP ALTERNATIVO

A proposta do CIP alternativo é variar a vazão na forma de pulsos e assim provocar um aumento na tensão de cisalhamento na parede que apresenta a presença de adesão microbiana/biofilme. Dessa forma, buscou-se variar a vazão na forma de um fenômeno periódico, com pulsos simétricos. As variáveis como concentração e temperatura permaneceram iguais a proposta convencional.

A ideia da perturbação na amplitude é provocar incrementos e decréscimos na vazão na etapa de sanitização em relação ao CIP tradicional, de forma que a média da vazão durante toda sanitização seja igual ao CIP tradicional. Nesse sentido, a amplitude da vazão e a duração de cada pulso foram sujeitos a perturbações de forma a produzir diferentes ondulações, valores de W , para avaliar o efeito deste parâmetro e do efeito anular. O tempo da etapa de sanitização alternativo foi avaliado em aproximadamente 5 minutos. A redução do tempo baseou-se nos relatos da literatura de que a limpeza com a vazão pulsada torna-se mais curta (GILLHAM, 1997; BODE *et al.*, 2007).

Para analisar e planejar o cenário experimental utilizou-se o planejamento composto central.

3.8.1. Planejamento Experimental

Nesse estudo experimental foram realizados experimentos para analisar o efeito de duas variáveis no processo de sanitização CIP, sendo representados como: X_1 : ondulação [-] e X_2 : Período [s]. Os níveis das variáveis X_1 e X_2 foram utilizados na forma adimensional, utilizando a seguinte codificação – Equação 3-10.

$$X_i = \frac{\varepsilon - \varepsilon(0)}{\frac{\varepsilon(+1) - \varepsilon(-1)}{2}} \quad (3-10)$$

MATERIAL E MÉTODOS

em que: i : número de variáveis estudadas;

X_i : é o valor da variável i na forma codificada;

ε : é o valor real da variável;

$\varepsilon(0)$: é o valor real da variável no ponto central;

$\varepsilon(+1)$: é o valor real da variável no ponto superior;

$\varepsilon(-1)$: é o valor real da variável no ponto inferior;

O valor de α foi determinado igual a 1,414. Em planejamentos onde $k=2$, este valor de α configura um planejamento de rotabilidade. A seguir são mostrados na Tabela 3-2 os níveis codificados e o valor real.

Tabela 3-2 – Níveis codificados e reais das variáveis estudadas.

| Níveis | -1,4142 | -1 | 0 | +1 | +1,4142 |
|-------------------------------------|---------|------|------|------|---------|
| Ondulação (X_1) | 0,32 | 0,47 | 0,82 | 1,18 | 1,32 |
| Período (X_2) | 50 | 65 | 100 | 135 | 150 |

Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 3-3 é apresentado o planejamento experimental com níveis de cada variável utilizada no experimento CIP.

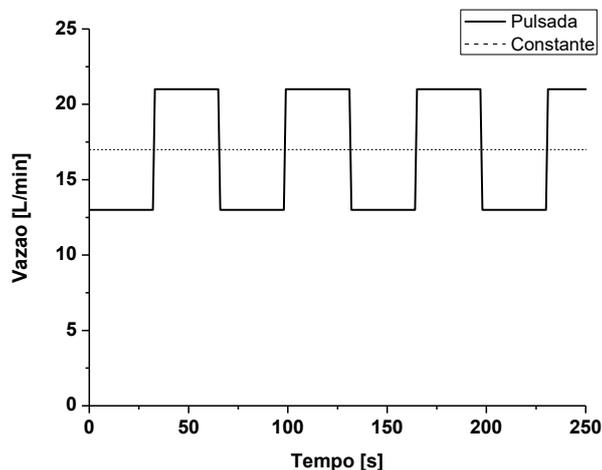
Tabela 3-3 – Matriz de planejamento em variáveis reais e codificadas.

| Corrida | Variáveis codificadas | | Variáveis Reais | |
|---------|-----------------------|-------|-----------------|------------|
| | X_1 | X_2 | Vazão [L/min] | Período[s] |
| 1 | -1 | -1 | 13→21 | 65 |
| 2 | +1 | -1 | 7→27 | 65 |
| 3 | -1 | +1 | 13→21 | 135 |
| 4 | +1 | +1 | 7→27 | 135 |
| 5 | -1,41 | 0 | 14,25→19,75 | 100 |
| 6 | +1,41 | 0 | 5,75→28,25 | 100 |
| 7 | 0 | -1,41 | 10→24 | 50 |
| 8 | 0 | +1,41 | 10→24 | 150 |
| 9 | 0 | 0 | 10→24 | 100 |
| 10 | 0 | 0 | 10→24 | 100 |

Fonte: Do autor (2019).

A Figura 3-4 mostra o comportamento proposto para corrida 1, com amplitude de 8 L/min, sendo a vazão estacionária 13 L/min e consequentemente com adimensional de ondulação W de aproximadamente 0,47.

Figura 3-4 – Representação da proposta de vazão pulsada.

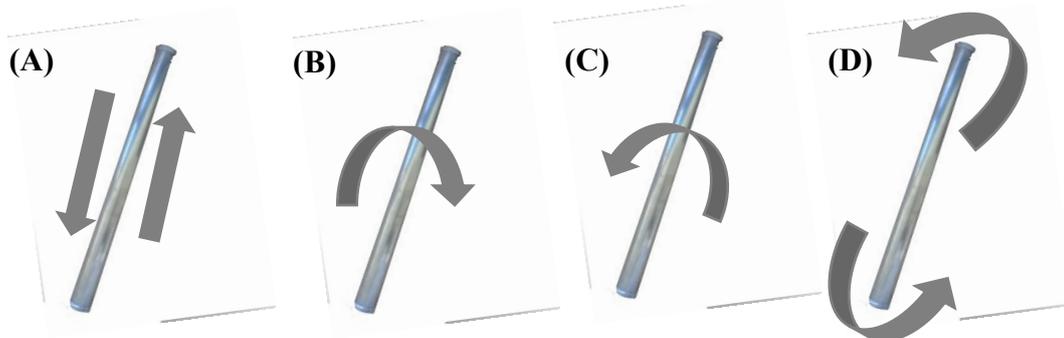


Fonte: Do autor (2019).

3.9. COLETA E CONTAGEM MICROBIANA

Após o processo CIP ser realizado em cada configuração proposta, os cupons foram submetidos a rinsagem para liberação das células microbianas que permaneceram aderidas às superfícies. Os tubos retos foram preenchidos com diluente água peptonada 0,1 % (m/v) e submetidos a dez movimentos longitudinais para cima e para baixo, seguido de dez movimentos circulares no sentido horário e dez rotações no sentido anti-horário. E por fim, dez movimentos tipo baliza, feitos manualmente, durante dois minutos (Fig. 3-5) para remoção das células.

Figura 3-5 – Rinsagem do cupom com movimentos longitudinais (A), circulares (B e C) e baliza (D).



Fonte: Do autor (2019).

O cupom cotovelo foi acondicionado em um saco plástico estéril, com a mesmo diluente. A embalagem foi fechada e este conjunto foi agitado vigorosamente para a liberação as células aderidas com os mesmos movimentos do tubo reto – Figura 3-6.

Figura 3-6 – Método de rinsagem para o acessório cotovelo.



Fonte: Do autor (2019).

Em seguida, uma alíquota da solução de rinsagem foi coletada e diluições seriadas foram preparadas para a realização da contagem microbiana nos cupons. O plaqueamento foi realizado em ágar padrão para contagem (PCA, Kasvi) e a contagem realizada em placas que continham de 25 a 250 colônias. O número de unidades formadoras de colônia (UFC) por cm² determinado de acordo com Equação 3-11.

$$\frac{UFC}{cm^2} = \frac{C \cdot V_R}{V_A \cdot A} \quad (3-11)$$

em que: C: contagem média do número de colônias após incubação [UFC];

V_R: Volume usado na *rinsagem* [mL];

V_A: Volume usado para plaqueamento da amostra [mL];

A: área do cupom [cm²].

Após a coleta dos microorganismos aderidos após a limpeza CIP, por meio da rinsagem, calculou-se a redução logarítmica (RD) de células dos cupons de aço inox pela Equação 3-12.

$$RD = \log N - \log n \quad (3-12)$$

em que: N: é o número de unidades formadoras de colônia/cm² (UFC) antes do CIP;

n: é o número de unidades formadoras de colônia/cm² (UFC) após cada configuração CIP proposta.

3.10. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Neste estudo, aplicou-se as técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), as quais permitiram detalhar em minúcias particularidades presente no sistema como escoamento dentro da tubulação a ser higienizada pelo processo CIP. Dessa forma, foi possível conhecer perfis de velocidade e tensão ao longo da tubulação, grandezas que foram extremamente relevantes para o estudo da higienização CIP.

A malha computacional criada para representar o trecho de tubulação em estudo foi confeccionada no *software* GAMBIT 2.4.6 estruturada em duas dimensões e posteriormente exportada para o resolvidor numérico FLUENT 19.1 versão *Student*.

Um teste de independência de malha foi realizado com três malhas com diferentes números de células para minimizar os erros associados ao tamanho da malha. A malha utilizada neste estudo foi refinada na direção radial, visto a particularidades investigadas próximo à parede. A primeira malha era composta por 6.098 elementos (Caso 1), a segunda malha 8.048 células (Caso 2) e a última era formada por 10.170 unidades (Caso 3).

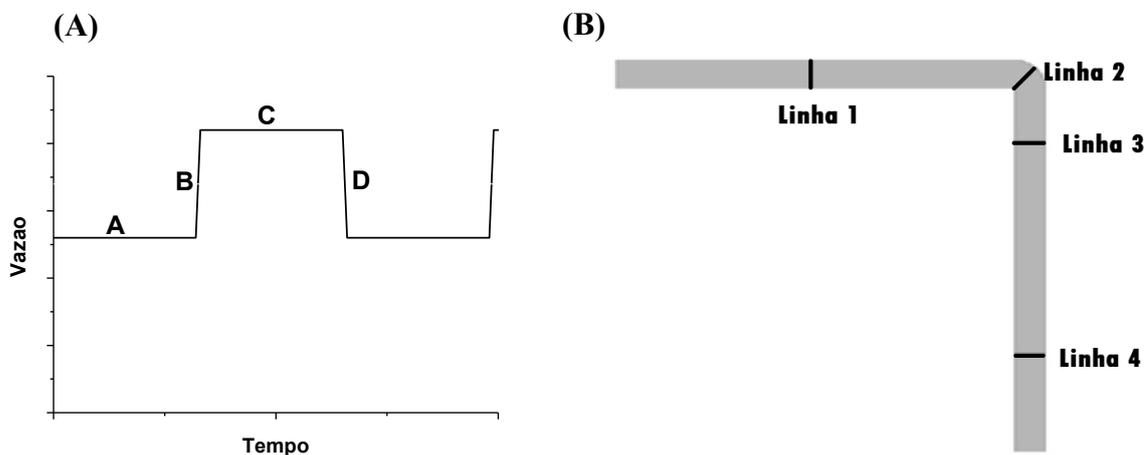
Na extremidade lateral esquerda do tubo disposto na posição horizontal foi definida com entrada do tipo *velocity inlet*. Nessa condição de contorno foi informado o valor de 1,5 m/s para simulação do CIP convencional. A simulação com fluxo pulsado foi introduzida pelo recurso *User Defined Functions* (UDF) gerando a oscilação investigada. A saída do material, no final do trecho reto vertical, foi especificada com *pressure outlet* de forma que a pressão na saída era a pressão atmosférica. Dessa forma, em relação a pressão relativa *pressure gauge* foi inserido valor nulo para as simulações.

O fluido utilizado no processo CIP foi a água e soluções aquosas de agentes químicos de limpeza como NaOH e ácido peracético que são miscíveis em água. Dessa forma, as propriedades da solução dos agentes de limpeza foram assumidas como mesmo da água. Os escoamentos analisados neste foram totalmente turbulentos. O modelo de turbulência empregado na simulação *k-ε startand* (YANG *et al.*, 2017).

Para examinar a ocorrência do efeito anular investigou-se os perfis de velocidade e tensão sobre as linhas destacadas na geometria (Fig. 437 B), assim como durante momentos

característicos da vazão pulsada: (A) vazão estacionária, (B) transição entre vazão estacionária e o pulso, (C) pulso, (D) retorno à vazão estacionária -Figura 3-7 A.

Figura 3-7 –Momentos característicos (A) e posições para investigação dos perfis (B).



Fonte: Do autor (2019).

3.11. CONSUMO ENERGÉTICO

A potência ativa total para carga trifásica equilibrada pode ser determinada conforme mostrado na Equação 3-13.

$$P_T = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (3-13)$$

A energia consumida (E) é expressa em função do tempo de operação do equipamento pelo produto da potência pelo tempo – Equação 3-14. A corrente da linha foi coletada através de um alicate amperimétrico ET-3200 Minipa.

$$E = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \theta \cdot \int_0^t I_L(t) dt \quad (3-14)$$

em que: P_T : Potência ativa total [W];

V_L : tensão de linha [V];

I_L : corrente de linha [A];

Θ : ângulo de fase.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS

Utilizando a metodologia proposta, estimou-se modelos paramétricos na forma de funções de transferências de primeira ordem com tempo de atraso (FOPDT) para as perturbações aleatória e degrau conforme mostrado na Tabela 4.1.

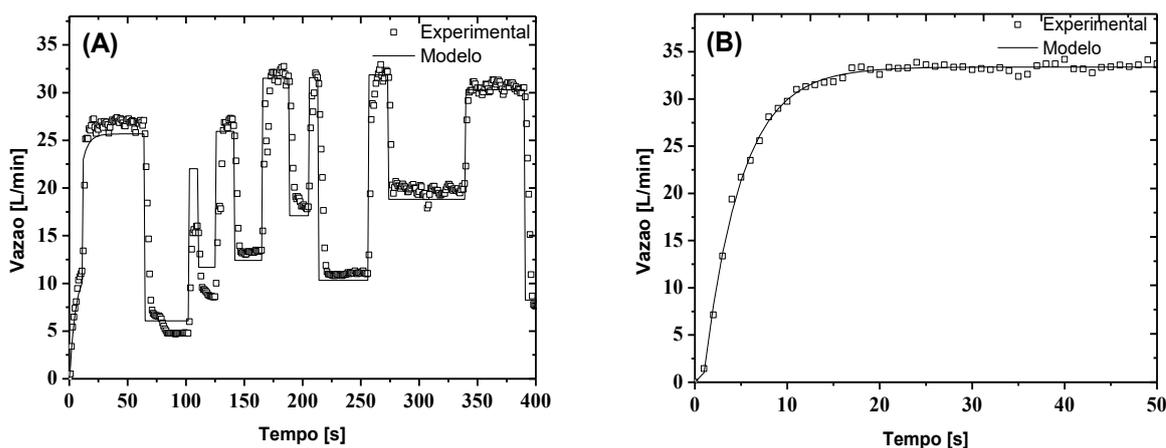
Tabela 4-1 – Modelos identificados para o sistema.

| Perturbação | Modelo | RMSE |
|-------------|---|--------|
| Aleatória | $G(s) = \frac{35,3043}{5,1214s + 1} e^{-0,3422s}$ | 4,2827 |
| Degrau | $G(s) = \frac{37,4089}{4,0286s + 1} e^{-0,8758s}$ | 0,4522 |

Fonte: Do autor (2019).

A diferença entre a constante de tempo entre os modelos está associada as dinâmicas de descida da vazão presente na perturbação aleatória ao passo que a função identificada com a perturbação degrau mapeia apenas a dinâmica da subida da vazão. Os perfis experimentais e dos modelos identificados para perturbação aleatória (A) e para entrada degrau (B) são apresentados na Figura 4-1.

Figura 4-1 – Dinâmica de vazão para perturbação aleatória(A) e degrau(B).



Fonte: Do autor (2019).

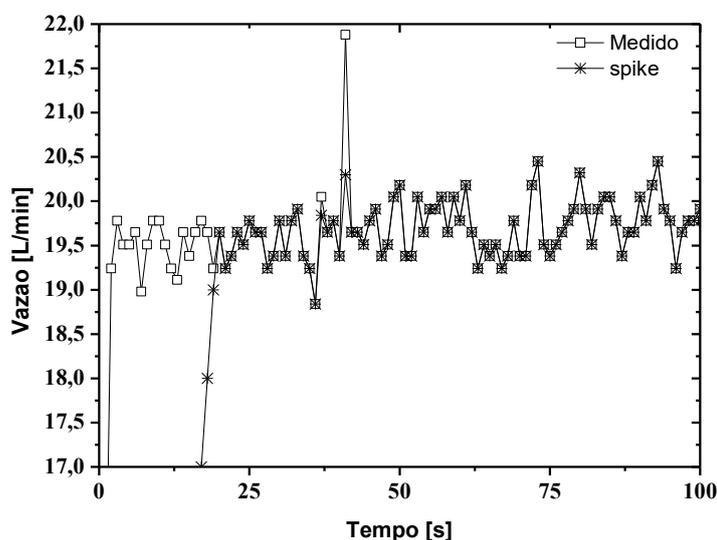
A FOPDT adequa-se melhor a perturbações do tipo degrau, o que justifica o menor valor de RMSE para o modelo estimado pela excitação degrau. Ao passo que, o comportamento

dinâmico frente às perturbações persistentemente excitantes exigir-se-ia modelos mais elaborados para melhor aderência dos pontos experimentais.

4.2. FILTROS

A Figura 4-2 mostra a medida de vazão sem filtro e o resultado das medidas quando aplicado apenas o filtro do tipo *spike*. Destaca-se dois aspectos em relação ao comportamento dos valores em relação a este filtro: i) retirada de ruídos de grandes magnitudes como é caso do valor medido no instante de 44s. ii) recurso pode retardar a dinâmica uma vez que não permite grandes aumentos, assim aumenta gradativamente os valores de uma forma mais suave.

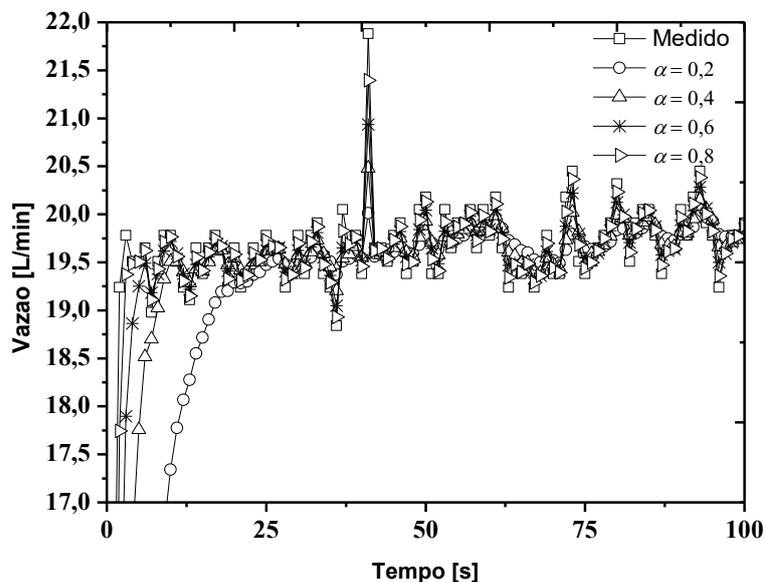
Figura 4-2 – Dinâmica da vazão corrente e da vazão com filtro *spike*.



Fonte: Do autor (2019).

Outra alternativa para condicionamento do sinal é o uso do filtro exponencial. Neste caso, é apresentado as medidas de vazão quando aplicado apenas o filtro exponencial (Figura 4-3). Nota-se que ruídos de altas magnitudes não são eliminados, mas são minimizados com uso deste recurso que é capaz de suavizar os ruídos de alta frequência. Além disso, percebe-se que menores valores do parâmetro α produzem uma dinâmica mais lenta, a qual avança em busca do *set point* de forma gradativa, sendo capaz de minimizar de forma mais efetiva os ruídos. Por outro lado, os maiores valores de α atrasam menos a dinâmica de vazão, no entanto, reduzem de forma menos efetiva as oscilações ruidosas.

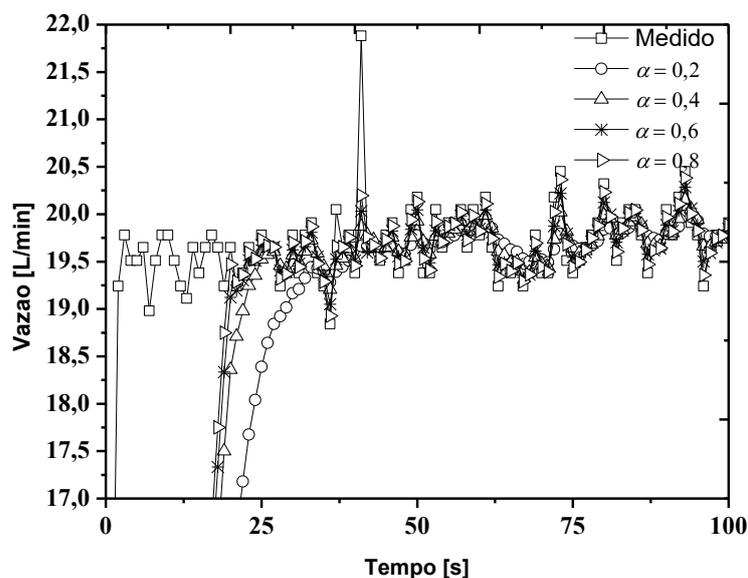
Figura 4-3 – Dinâmica da vazão para filtro exponencial.



Fonte: Do autor (2019).

Maiores valores de α priorizam a medida corrente atual em detrimento aos valores filtrados pregressos. Da mesma forma em que alfa tendendo a zero ignora a medida coletada considerando assim os valores passados o que confere a morosidade a dinâmica. Nesse sentido, selecionou-se valor de alfa igual a 0,6 pois foi capaz de suavizar os ruídos e conferiu menos atraso a planta entre os valores estudados. O uso conjunto dos filtros do tipo *spike* e exponencial, em série, pode ser adequado para minorar os ruídos conforme mostrado na Figura 4-4.

Figura 4-4 – Dinâmica da vazão com associação dos filtros *spike* e exponencial.



Fonte: Do autor (2019).

4.3. PROJETO E AVALIAÇÃO DE CONTROLADORES

A partir das equações de projeto apresentadas na metodologia, utilizando o modelo identificado com perturbação aleatória, foram projetados os parâmetros para controlador de vazão do sistema CIP conforme mostrado na Tabela 4-2.

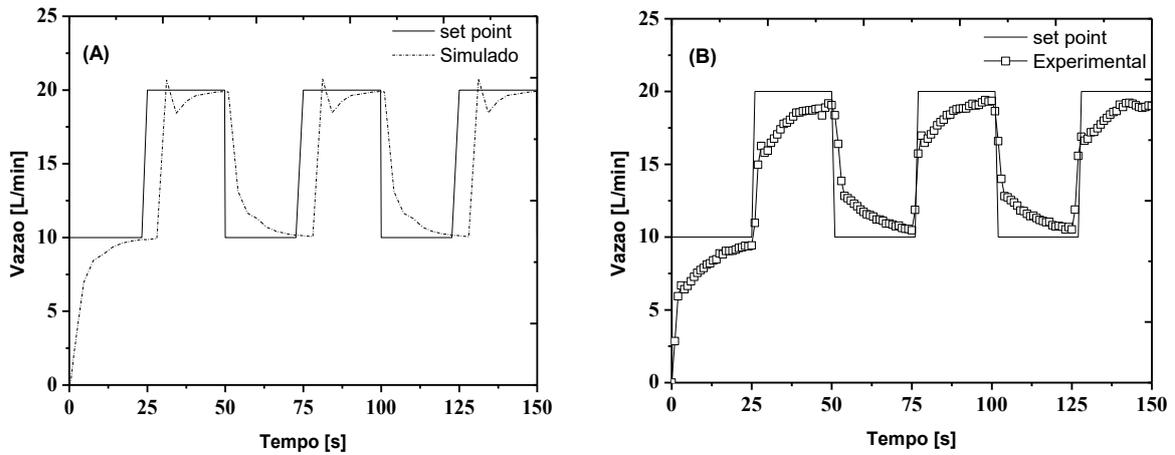
Tabela 4-2 – Parâmetros projetados pelo modelo de perturbação aleatória.

| Modelo FOPDT - Entrada Aleatória | | | |
|---|-----------------------------------|--------------|--------------|
| | $K_c [min \cdot \% \cdot L^{-1}]$ | $\tau_I [s]$ | $\tau_D [s]$ |
| Síntese Direta (SD) | 0,0266 | 5,1214 | 0,0000 |
| Modelo Interno (IMC) | 0,0283 | 5,2925 | 0,1656 |
| ITAE Servo | 0,2726 | 6,5157 | 0,1277 |
| Hagglund Astrom | 0,1227 | 1,5078 | 0,0000 |

Fonte: Do autor (2019).

O comportamento simulado apresentado na Fig. 4-5 (A) com controlador projetado pelo método de síntese direta sugere que o sistema apresenta uma dinâmica progressiva ao *set point* inicialmente. Esse comportamento pode estar associado ao valor de K_c e K_I que contribui para uma ação mais conservadora. Em seguida, na mudança de *set point*, a simulação prevê um aumento da vazão mais agressivo com *overshoot* seguido de um decréscimo e logo um aumento para o alcance do novo *set point*. O pico na mudança de *set point* é consequência do erro e da integral do erro ocasionados nos instantes iniciais da mudança. Isso confere ao controlador uma ação mais vigorosa. Por fim, a mudança para o *set point* menor é feita de maneira progressiva. Na prática (Fig 4-5 (B)) observa-se que o comportamento similar ao previsto pela simulação para a dinâmica para o *set point* menor.

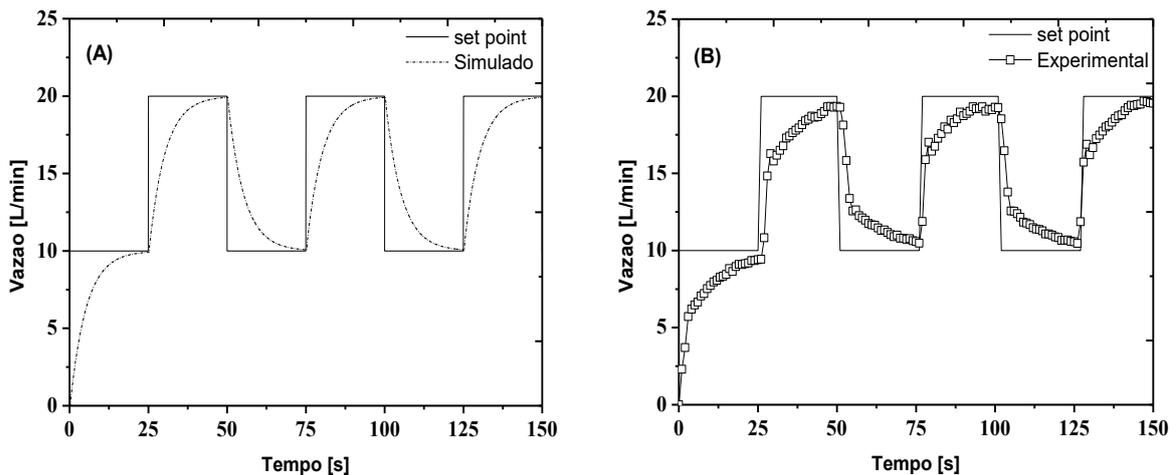
Figura 4-5 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Síntese Direta para modelo aleatório.



Fonte: Do autor (2019).

O projeto de controle para vazão em função da potência da bomba segundo a proposta do modelo interno (IMC) apresenta o seguinte comportamento em um sistema simulado (Figura 4-6 (A)). O perfil do projeto IMC na prática (Figura 4-6 (B)) apresenta-se num formato bastante similar ao simulado. Da mesma forma apresenta-se semelhante ao desempenho do projeto de síntese direta. Essa semelhança está relacionada aos resultados dos parâmetros que são bastante próximos. Nota-se uma dinâmica conservadora nas mudanças de *set point*, a qual está relacionada ao valor dos parâmetros projetados.

Figura 4-6 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por IMC para o modelo aleatório.

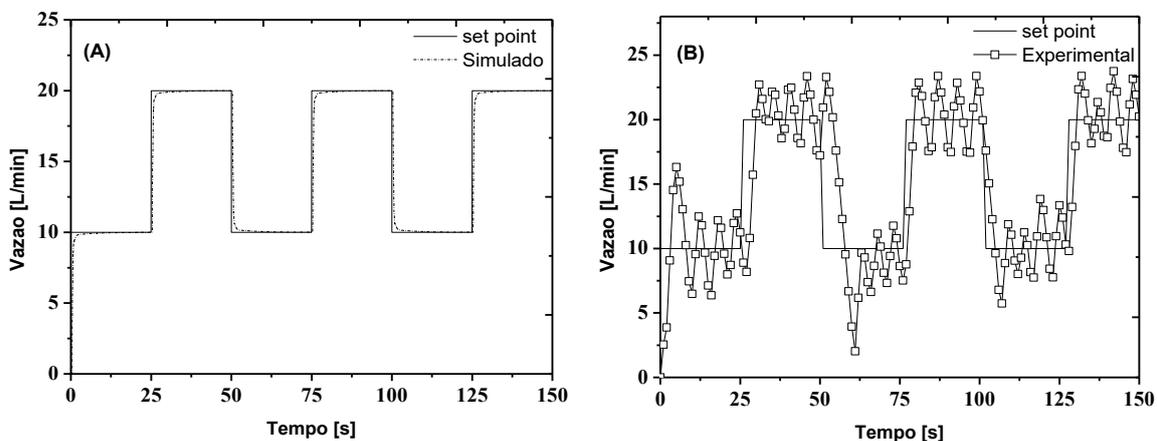


Fonte: Do autor (2019).

O comportamento previsto pela simulação para projeto ITAE (Fig. 4.7 (A)) mostrou uma boa adequação ao *set point*. O valor dos parâmetros indica um controlador bastante agressivo e de resposta rápida. Experimentalmente (Fig 4-7 (B)), percebe-se oscilações como consequência

do maior valor de K_I . Na mudança de *set point* o erro aumenta assim como a integral do erro o que imprime uma reação bastante agressiva na dinâmica de vazão.

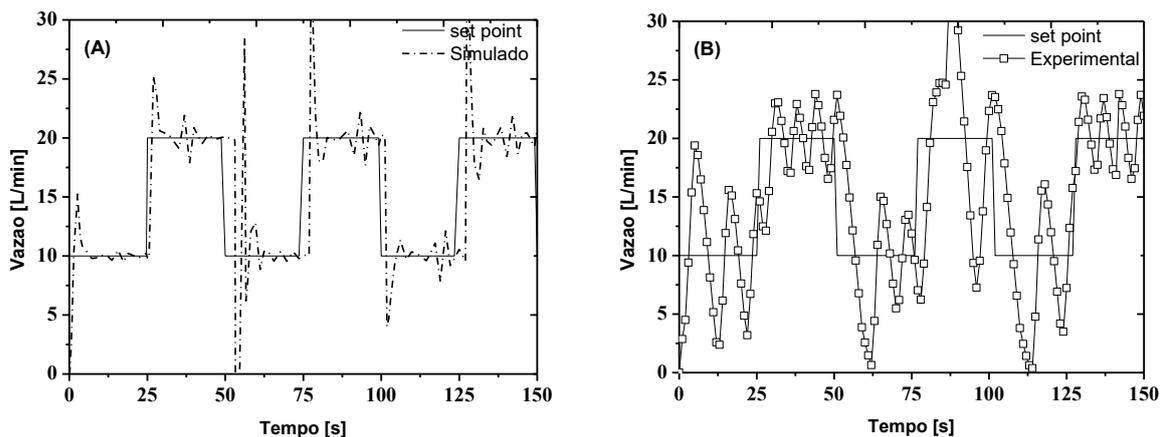
Figura 4-7 – Perfil de vazão simulado (A) e experimental (B) por ITAE para o modelo aleatório.



Fonte: Do autor (2019).

A dinâmica da vazão para Hagglund Astrom apresenta comportamento simulado mostrado na Figura 4-8 (A). Nota-se *overshoots* nas mudanças de *set point* acompanhado de oscilações. Esse controlador possui os valores dos parâmetros mais pronunciados, assim como o projeto ITAE Servo, o que confere à dinâmica do sistema uma ação agressiva e oscilatória.

Figura 4-8 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Hagglund Astrom para o modelo aleatório.



Fonte: Do autor (2019).

Analogamente a determinação feita utilizando o modelo identificado com perturbação aleatória, os parâmetros do controlador foram calculados a partir da função transferência identificada com uma perturbação degrau e apresentados na Tabela 4-3.

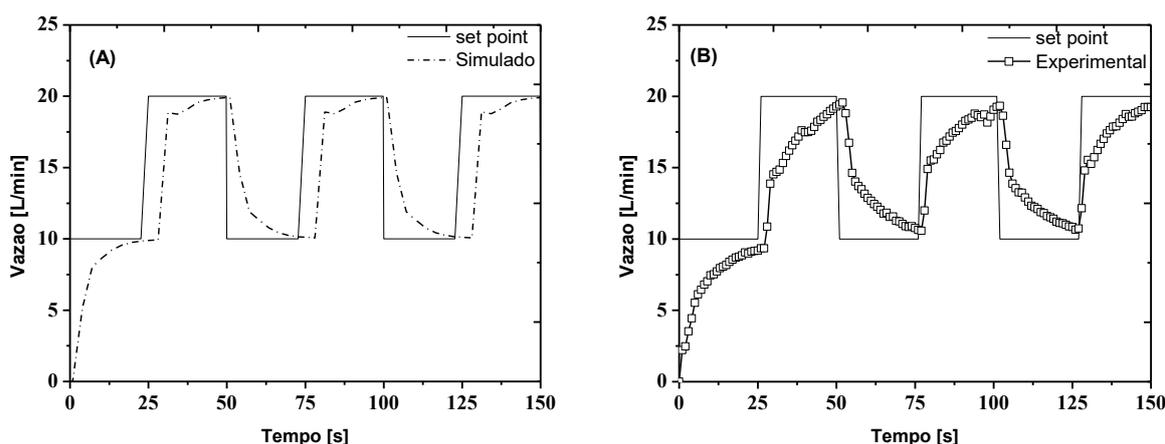
Tabela 4-3 – Parâmetros projetados pelo modelo de perturbação degrau.

| Modelo FOPDT - Entrada Degrau | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| | $K_c [min \cdot \% \cdot L^{-1}]$ | $\tau_i [s]$ | $\tau_D [s]$ |
| Síntese Direta (SD) | 0,0180 | 4,0286 | 0,0000 |
| Modelo Interno (IMC) | 0,0215 | 4,4665 | 0,3950 |
| ITAE Servo | 0,0944 | 5,2766 | 0,3006 |
| Haglund Amstron | 0,0382 | 2,1654 | 0,0000 |

Fonte: Do autor (2019).

A dinâmica simulada do sistema de vazão utilizando os parâmetros de projeto da síntese direta é apresentado na Fig. 4-9 (A). Nota-se uma dinâmica conservadora em busca do *set point*. Experimentalmente, Fig. 4-9 (B), ocorre um comportamento bastante similar ao simulado. O comportamento conservador do controle está relacionado aos pequenos valores dos parâmetros.

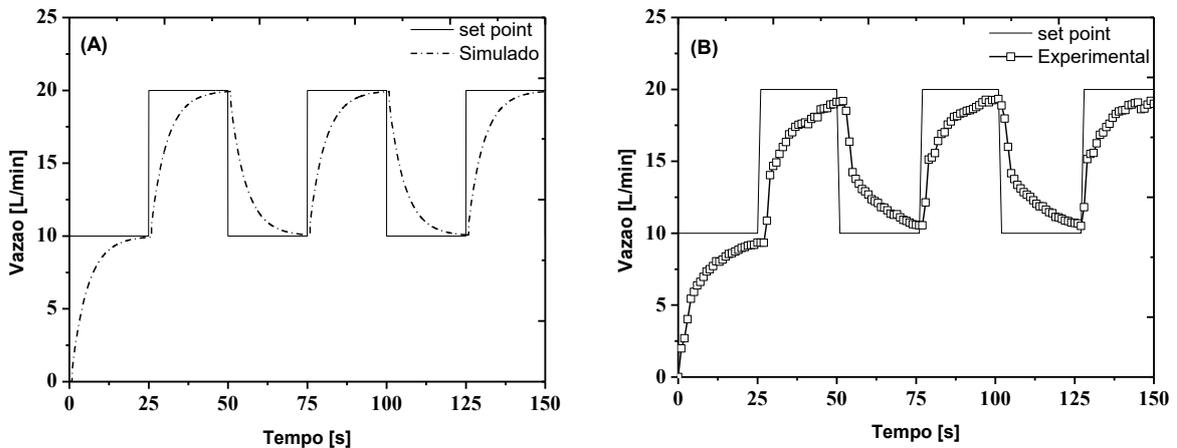
Figura 4-9 – Perfil simulado (A) e experimental (B) por Síntese Direta para modelo degrau.



Fonte: Do autor (2019).

O comportamento simulado do projeto segundo método modelo interno é apresentado na Figura 4-10 (A). Análogo ao projeto Síntese Direta, nota-se uma dinâmica progressiva nas mudanças de *set point*. Esse desempenho é consequência da magnitude dos parâmetros, relativamente, pequenos. O perfil experimental (Fig. 4-10 (B)) assemelha-se ao previsto na simulação.

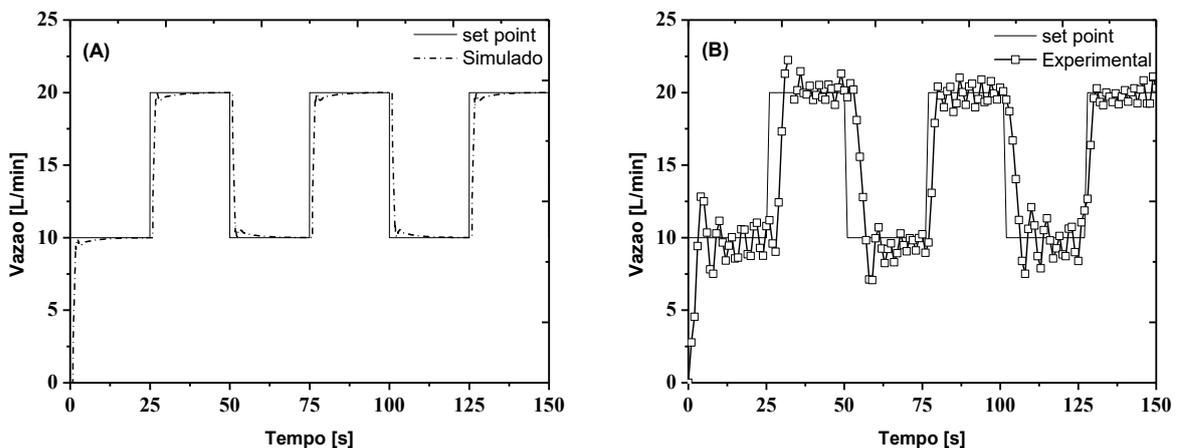
Figura 4-10 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por IMC para modelo degrau.



Fonte: Do autor (2019).

A dinâmica simulada do sistema de controle ITAE utilizando o modelo identificado com perturbação degrau é apresentado a seguir na Figura 4-11 (A). O desempenho deste controlador previsto pela simulação é bastante adequado. No entanto, na prática (Fig. 4-11 (B)) o sistema apresenta um caráter ligeiramente oscilatório. Este comportamento é característico da ação integral, o que sugere que o valor da constante K_I menor seja mais adequado.

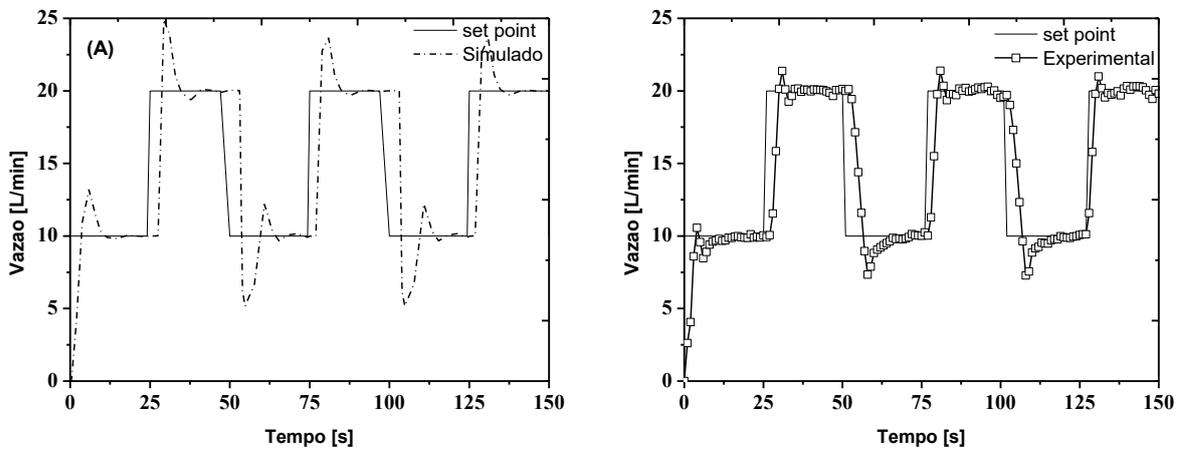
Figura 4-11 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por ITAE para modelo degrau.



Fonte: Do autor (2019).

A dinâmica simulada da vazão para controlador segundo método de Hagglund Astrom é apresentada na Figura 4-12 (A). Nota-se a ocorrência de *overshoots* nas mudanças de *set point*. Na prática esse fenômeno é menos pronunciado. Nota-se ainda que experimentalmente (Figura 4-12 (B)), o sistema não apresenta oscilações, o que sugere que a redução na constante K_I seja adequada no sentido de retirar o caráter oscilatório do controle do sistema de vazão.

Figura 4-12 – Perfil simulado(A) e experimental (B) por Hagglund Astrom para modelo degrau.

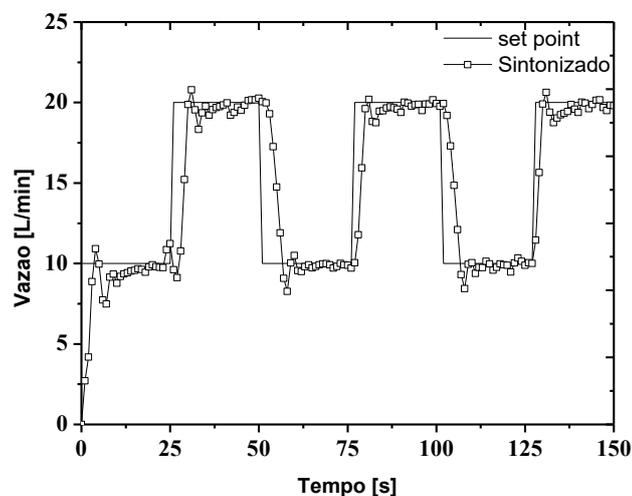


Fonte: Do autor (2019).

4.4. SINTONIA

O projeto para controle de vazão sintonizado apresenta o seguinte perfil de vazão (Figura 4-13). A dinâmica de cada projeto de controle subsidiou informação para seleção de valores que produziam as condições desejadas. Neste sentido, o projeto de Hagglund Astrom para perturbação degrau apresentou desempenho satisfatório, de forma que o valor da constante proporcional foi mantido. Por outro lado, a parcela integral foi reduzida para 0,007, um valor intermediário entre o valor do projeto Hagglund Astrom e os Projeto de Síntese Direta e Modelo Interno, visto que esses não apresentaram oscilação com menor valores de K_I .

Figura 4-13 – Perfil de vazão para controlador sintonizado.

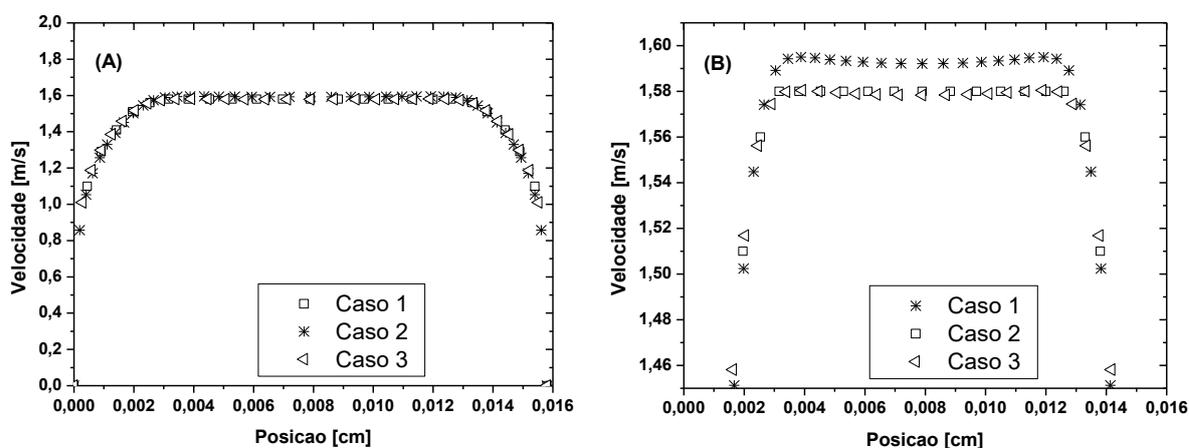


Fonte: Do autor (2019).

4.5. FLUIDODINÂMICA

A Figuras 4-14 (A) mostra a comparação da velocidade no interior da tubulação para as três malhas construídas. A malha escolhida para proceder as simulações foi o Caso 2 (8.048 células), pois apresenta uma apreciável redução no tempo de simulação quando comparado a malha do Caso 3 (10.170) e ainda assim exibiu resultados muito próximos com erro relativo inferior a 1% na previsão – Fig. 4-14 (B).

Figura 4-14 – Perfis de velocidade para estudo de malhas (A) aproximação nos perfis (B).

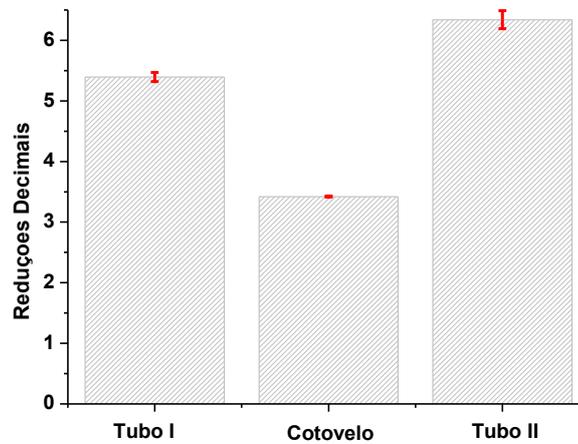


Fonte: Do Autor (2019).

4.6. CIP CONVENCIONAL

A higienização CIP, executada na forma convencional proposta, alcançou em média 5,40 reduções decimais para o tubo reto I, cerca de 3,42 reduções para o cotovelo e 6,34 para o cupom tubo reto II em relação a contagens de mesófilos aeróbios presentes naturalmente no leite cru e que permaneceram aderidos nos cupons de provas após o processo CIP (Figura 4-15). A análise da variância (Teste F) a nível de 5 % de significância mostrou que houve diferença estatística na redução de UFC/cm² entre os cupons. Nota-se que a menor redução ocorreu no acessório cotovelo, seguida do trecho reto horizontal TR I e por fim, a maior redução ocorreu em TR II.

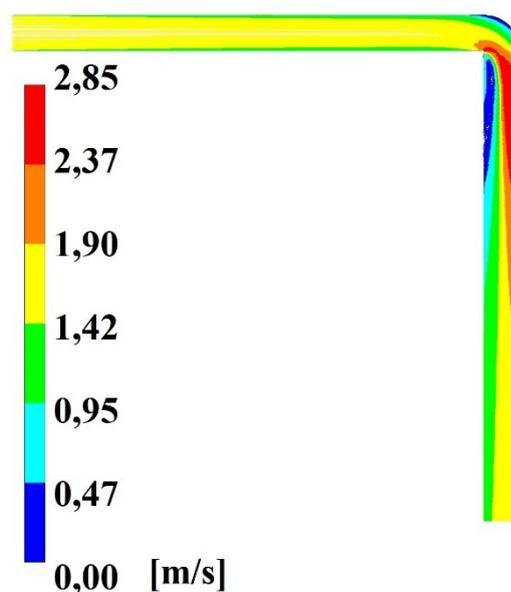
Figura 4-15 – Reduções decimais na superfícies com tratamento convencional.



Fonte: Do autor (2019).

Por meio da simulação fluidodinâmica computacional é possível avaliar a distribuição de velocidades no interior da tubulação – Figura 4-16. Pode-se observar que o trecho reto horizontal da tubulação (TR I) apresentou velocidade praticamente uniforme por todo tubo em um regime dinamicamente estabelecido – Figura 4-17 (Linha 1). Nota-se ainda que, no centro do tubo a velocidade é relativamente superior à velocidade nas proximidades da parede. Essa observação é explicada pelo princípio da aderência, onde os pontos de fluido, em contato com uma superfície sólida, aderem a essa, fato que reduz a velocidade do fluido (BRUNETTI, 2014).

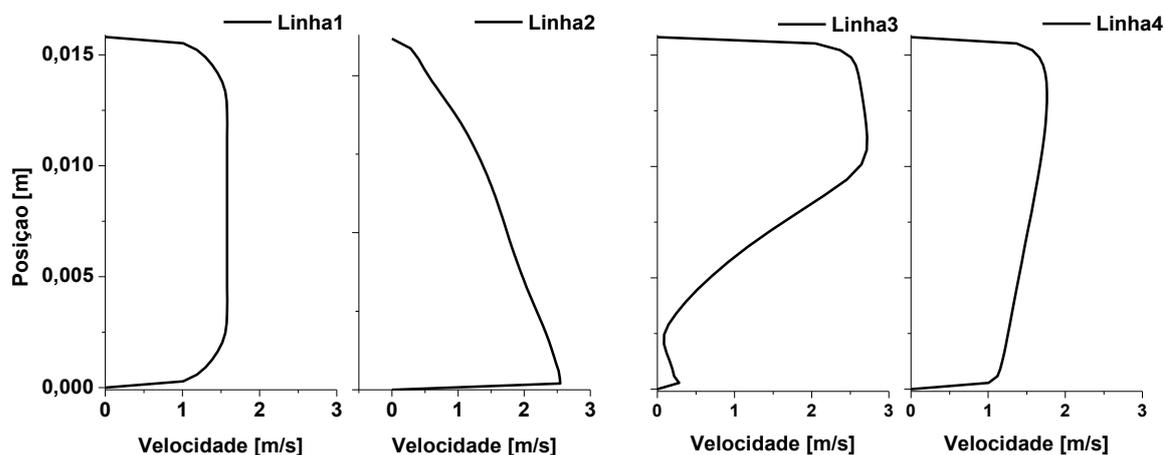
Figura 4-16 – Distribuição de velocidade para CIP convencional.



Fonte: Do autor (2019).

No cotovelo observa-se que a distribuição de velocidade é variada. Nessa posição ocorre a mudança na direção do escoamento, o que dissipa energia cinética e consequentemente reduz a velocidade de escoamento (MCDONALD *et al.*, 2014). Nesse sentido, a tensão de cisalhamento, responsável pela remoção da adesão microbiana, é afetada no sentido de decrescer sua magnitude no interior deste acessório. Na Figura 4-17 (Linha 2) nota-se que as maiores velocidades são exercidas próximo a lateral esquerda do cotovelo, o que produz maiores tensões cisalhantes, em um local de pequena área, e consequentemente menos células aderidas. O lado oposto, trata-se de uma região com maior área e prova de menores velocidades, consequentemente baixas tensões cisalhantes, o que dificulta a limpeza CIP nesta região e justifica as menores reduções decimais neste acessório.

Figura 4-17 – Perfil de velocidade para o CIP convencional.



Fonte: Do autor (2019).

No trecho reto vertical (TR II), o fluxo escoa por uma trajetória preferencial e por isso, a lateral direita experimenta maiores velocidades. Esse aspecto conferiu maior tensão de cisalhamento na região. Consequência disto, houve maior redução do biofilme aderido à superfície da tubulação devido a força mecânica aplicada.

O perfil de velocidade na Linha 3 (Fig. 4-17), localizada nesta região, mostra que na lateral direita do tubo a velocidade é significativamente superior, em detrimento a lado oposto que apresenta uma velocidade de aproximadamente 0,5 m/s próximo à parede. Salvo esta região, nota-se que o escoamento exerce maiores velocidades na parede, Linha 4, com uma notável trajetória preferencial pelo lado direito do trecho, até que nas proximidades da saída o perfil de velocidade tende ao comportamento mais uniforme. As maiores velocidades do lado direito justificam maiores reduções decimais no TR II.

4.7. CIP ALTERNATIVO

Os resultados das reduções decimais provocadas por cada condição experimental são apresentados na Tabela 4-4. Observa-se que, em geral, TR II apresentou maiores reduções decimais, seguido de TR I e por fim o acessório cotovelo, sendo esta tendência similar ao observado no CIP convencional. Dentre os cenários investigados, a configuração da corrida 6 apresentou as maiores reduções decimais de aeróbios mesófilos nos cupons.

Tabela 4-4 – Número de reduções decimais nos cupons após CIP alternativo

| Corrida | X ₁ | X ₂ | TR I | TR II | Cotovelo |
|---------|----------------|----------------|------|-------|----------|
| 1 | -1,000 | -1,000 | 3,20 | 3,56 | 2,72 |
| 2 | 1,000 | -1,000 | 4,45 | 5,70 | 3,86 |
| 3 | -1,000 | 1,000 | 2,32 | 3,20 | 1,55 |
| 4 | 1,000 | 1,000 | 4,22 | 4,43 | 3,57 |
| 5 | -1,410 | 0,000 | 2,30 | 2,56 | 1,65 |
| 6 | 1,410 | 0,000 | 5,34 | 6,25 | 4,80 |
| 7 | 0,000 | -1,410 | 4,53 | 5,08 | 4,10 |
| 8 | 0,000 | 1,410 | 2,89 | 3,32 | 2,04 |
| 9 | 0,000 | 0,000 | 4,56 | 4,82 | 1,99 |
| 10 | 0,000 | 0,000 | 4,50 | 4,65 | 2,03 |

Fonte: Do autor (2019).

Nota-se que a higienização alternativa que produziu maiores reduções decimais de biofilme foi a configuração 6. Dessa forma, a limpeza do cotovelo contendo biofilme que foi submetido à CIP otimizada foi significativamente diferente ($p = 0,0162$) da higienização convencional. Assim, a remoção do biofilme foi significativamente maior ($p < 0,05$) com a otimização do CIP, nessa região de maior de dificuldade de higienização, em relação ao CIP convencional. Os resultados da limpeza convencional e a configuração pulsada mais eficaz para o cotovelo são apresentados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Regimes de limpeza na remoção de células do biofilme do cotovelo.

| Higienização | Contagem de células no cotovelo (log UFC/cm ²) | | Redução |
|------------------|--|----------------|-------------|
| | Sem tratamento | Com tratamento | |
| CIP convencional | 5,34 ± 0,33 | 2,05 ± 0,11 | 3,26 ± 0,23 |
| CIP Otimizado | 5,53 ± 0,11 | 0,73 ± 0,04 | 4,80 ± 0,16 |

Fonte: Do autor (2019).

A seguir, avalia-se o efeito das variáveis ondulação e período na tendência geral de remoção do biofilme e a fluidodinâmica no interior dos cupons: TR I, cotovelo e TR II.

4.7.1. TR I

As variáveis ondulação e período apresentaram efeito significativo, em termos lineares, assim como os termos quadráticos a nível de significância de 5% na redução decimal do biofilme na superfície de TR I. A Tabela 4-6 mostra a avaliação dos dados do planejamento eliminando os parâmetros que não influenciam significativamente a resposta, sendo o modelo matemático da redução expresso pela Equação 4-1 que apresentou coeficiente de correlação igual a 0,9460, que indica que 94,60% da variabilidade dos dados são explicadas pela equação.

Tabela 4-6 – Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme no cupom TR I.

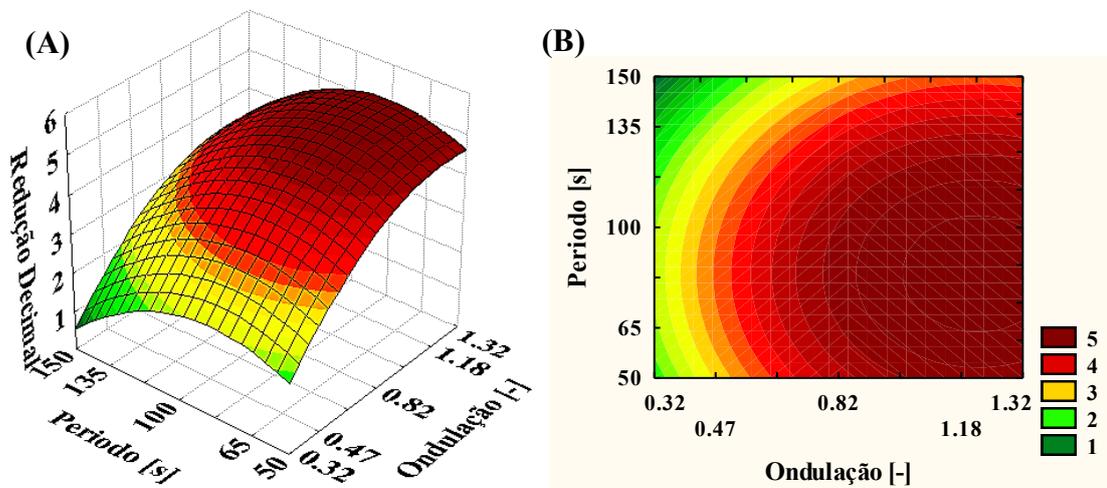
| Fator | Efeito | Desvio | p | Limite de confiança | | Coeficiente do Modelo |
|---------|---------|--------|--------|---------------------|---------|-----------------------|
| | | | | -95% | 95% | |
| Média | 4,5300 | 0,2345 | 0,0000 | 3,9272 | 5,1328 | 4,5300 |
| X_1 | 1,8623 | 0,2345 | 0,0005 | 1,2595 | 2,4651 | 0,9312 |
| X_1^2 | -0,8188 | 0,3102 | 0,0460 | -1,6162 | -0,0213 | -0,4094 |
| X_2 | -0,8573 | 0,2345 | 0,0147 | -1,4601 | -0,2545 | -0,4287 |
| X_2^2 | -0,9287 | 0,3102 | 0,0303 | -1,7262 | -0,1313 | -0,4644 |

Fonte: Do autor (2019).

$$RD = 4,53 + 0,9312X_1 - 0,4094X_1^2 - 0,4287X_2 - 0,4644X_2^2 \quad (4-1)$$

Observa-se que o cupom TR I apresentou em média 4,53 reduções decimais de aeróbios mesófilos na superfície. O aumento da ondulação do pulso favoreceu maiores reduções de biofilme. O mesmo para os ciclos de menor duração que também contribuíram para as maiores reduções. A Figura 4-18 mostra essa tendência através da superfície de resposta (A) e do contorno (B) para redução decimal do biofilme no cupom TR I.

Figura 4-18 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) da RD para o cupom TR I.



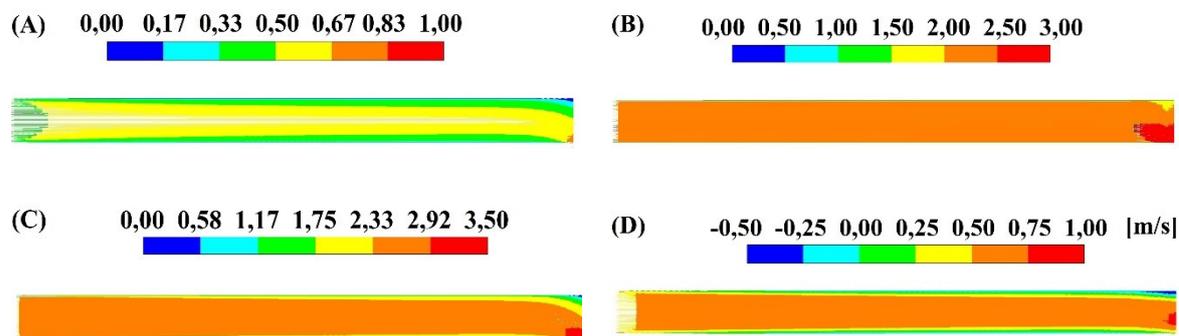
Fonte: Do autor (2019).

Observou-se que as maiores reduções decimais de aeróbios mesófilos na superfície de TR I foram relacionadas às maiores ondulações e aos menores períodos. Gillham *et al.* (2000) também relataram comportamento similar na limpeza de cupons de aço inoxidável AISI 316 utilizando vazão pulsada.

Segundo Schöler *et al.* (2009) a aplicação de fluxos transitórios tem o potencial de viabilizar o processo de difusão devido à boa mistura e troca de líquido na região próxima da parede. Dessa forma, o agente sanitizante pode ser transportado até o biofilme de forma mais efetiva. Além da ação química, uma ondulação com $W > 1$ leva a inversão temporária do fluxo nas proximidades da parede, separação da subcamada viscosa e alta tensão de cisalhamento na parede (SCHLICHTING E GERSTEN, 2006).

A Figura 4-19 mostra os contornos de velocidade para a maior ondulação, condição mais favorável (Corrida 6), em cada etapa do ciclo da pulsação (A) vazão estacionária, (B) transição entre vazão estacionária e pulso, (C) pulso máximo e (D) retorno do pulso para vazão estacionária.

Figura 4-19 – Contorno de velocidade em TR I em instantes característicos.

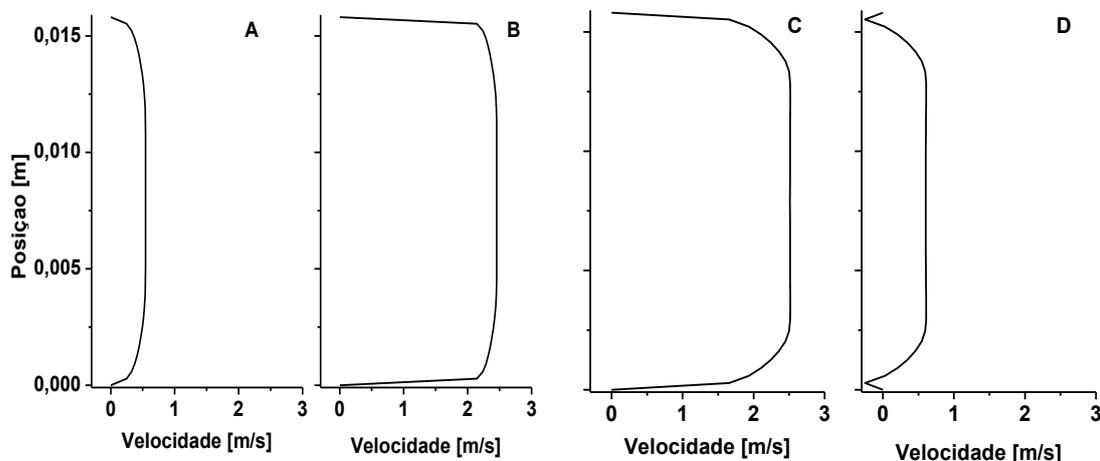


Fonte: Do autor (2019).

Dessa forma, no início do período (Fig 4-20A) a velocidade tem um perfil empistonado. Em seguida, a velocidade é aumentada, no momento em que se aplica o pulso a vazão estacionária (Fig 4-20B). O aumento na vazão torna o escoamento ainda mais turbulento. Em razão disso, ocorre a redução da camada-limite, o que resulta em elevação na taxa de transferência do fluido sanitizante até a superfície (ANDRADE, 2008). Outro fator, observado próximo da parede é a alta tensão de cisalhamento (Figura 4-21 B-C). Posteriormente, o perfil de velocidade no *set point* superior torna-se dinamicamente estabelecido (Fig4-20C). Por fim, no instante de retorno para vazão estacionária (Fig 4-20D) é notável a inversão da velocidade próximo a parede conforme teoria apresentada por Schlichting e Gersten (2006).

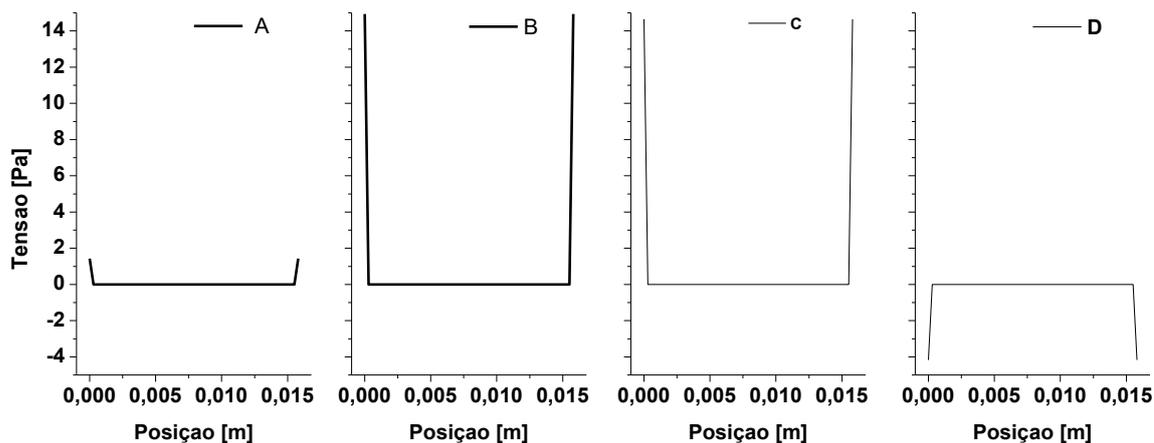
A inversão no sentido da velocidade, próximo às paredes, promove também a inversão na tensão cisalhante – Figura 4.21 C-D. A ocorrência desta inversão pode contribuir para um mecanismo de fadiga da adesão pela ação da força mecânica aplicada de forma alternada. Gillham *et al.* (2000) também apresentaram essa hipótese para limpeza de incrustação de proteínas de soro utilizando vazão pulsada. Períodos de curta duração favoreceram maiores reduções porque neste cenário é possível experimentar com mais frequência do efeito anular.

Figura 4-20 – Perfil de velocidade na Linha 1 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 4-21 – Perfil de tensão na Linha 1 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

4.7.2. Cotovelo

No cotovelo, ambas as variáveis, ondulação e período, apresentaram efeito significativo na redução de aeróbios mesófilos na superfície do acessório, a nível de significância de 5 %. A Tabela 4-7 mostra a avaliação dos dados do planejamento eliminando os parâmetros sem influência significativa na resposta. A redução decimal da adesão no cotovelo pode ser expressa pela Equação 4-2 com coeficiente de correlação igual a 0,9367.

Tabela 4-7 - Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme no cotovelo.

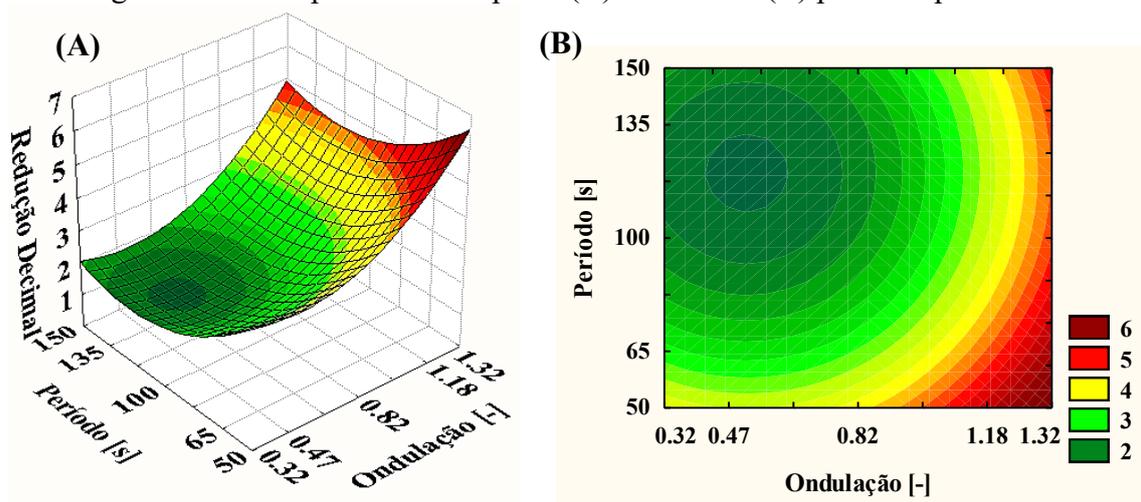
| Fator | Efeito | Desvio | p | Limite de confiança | | Coeficiente do Modelo |
|---------|---------|--------|--------|---------------------|---------|-----------------------|
| | | | | -95% | 95% | |
| Média | 2,0100 | 0,2769 | 0,0008 | 1,2981 | 2,7219 | 2,0100 |
| X_1 | 1,9037 | 0,2769 | 0,0010 | 1,1918 | 2,6156 | 0,9518 |
| X_1^2 | 1,1038 | 0,3664 | 0,0297 | 0,1620 | 2,0455 | 0,5519 |
| X_2 | -1,0933 | 0,2769 | 0,0109 | -1,8052 | -0,3814 | -0,5467 |
| X_2^2 | 0,9487 | 0,3664 | 0,0489 | 0,0070 | 1,8905 | 0,4744 |

Fonte: Do autor (2019).

$$RD = 2,010 + 0,9518X_1 + 0,5519X_1^2 - 0,5467X_2 + 0,4744X_2^2 \quad (4-2)$$

O cotovelo apresentou em média 2,01 reduções decimais de aeróbios mesófilos na superfície após processo CIP. Nota-se que, maiores ondulações favoreceram maiores reduções decimais e maiores retiradas de biofilme da superfície do acessório. A resposta da redução decimal em função da duração do período é predominantemente favorecida por períodos de curta duração. Essa tendência pode ser observada na superfície de resposta (Fig. 4-22 A) e no contorno (Fig. 4-22 B) para a redução decimal de aeróbios mesófilos no cotovelo.

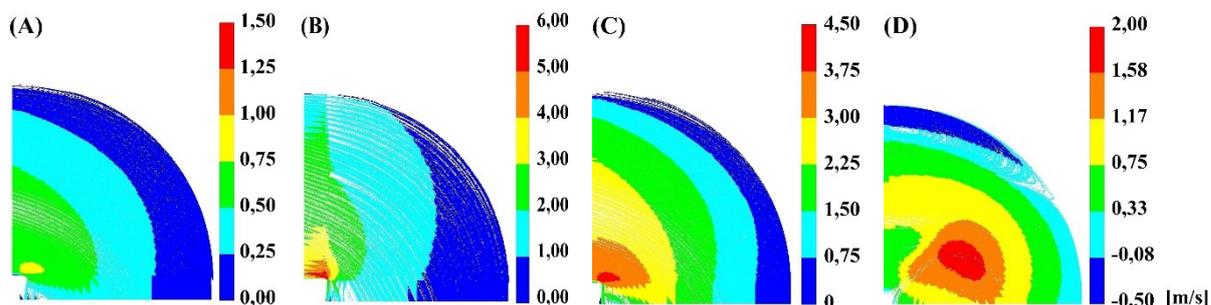
Figura 4-22 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) para o cupom cotovelo.



Fonte: Do autor (2019).

É possível conhecer a dinâmica do escoamento através dos contornos de velocidade – Figura 4-23 para condição mais favorável (Corrida 6), em cada etapa do ciclo da pulsação (A) vazão estacionária, (B) transição entre vazão estacionária e pulso, (C) pulso máximo e (D) retorno do pulso para vazão estacionária.

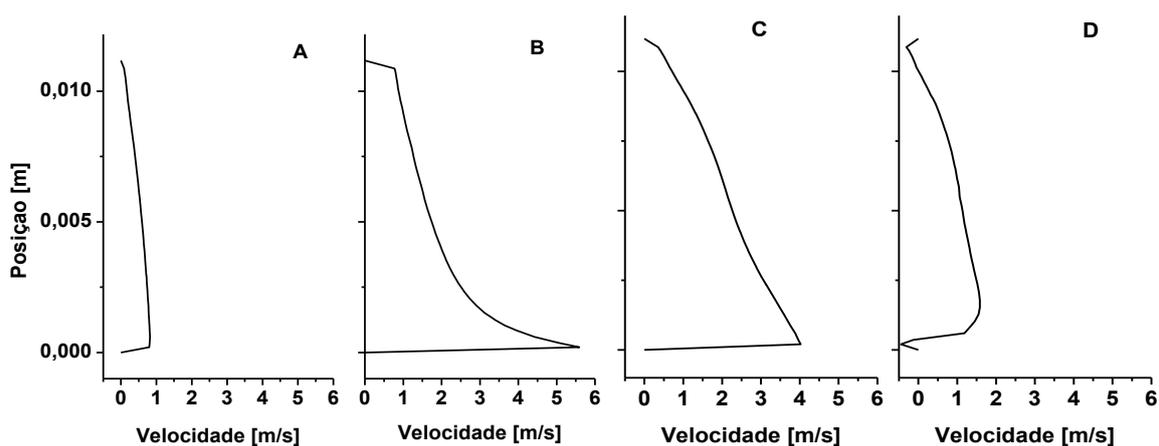
Figura 4-23 – Contorno de velocidade no cotovelo em instantes característicos.



Fonte: Do autor (2019).

Observa-se no início do período que o perfil de velocidade indica uma trajetória preferencial para o escoamento próximo a lateral esquerda do acessório – Fig. 4-23 A e Fig. 24 A. Em seguida, quando se aplicou o pulso à vazão estacionária, essa tendência de uma trajetória preferencial ainda é observada– Fig. 4.23 B, assim como durante o *set point* superior Figura 4-23 C. Essa conjuntura favoreceu, majoritariamente, a remoção das células aderidas na lateral esquerda em detrimento ao lado oposto. No entanto, pela geometria deste acessório, a região do lado direito apresenta maior área e conseqüentemente maior adesão. Em decorrência disso, a redução no cotovelo é relativamente menor quando comparado aos trechos retos.

Figura 4-24 – Perfil de velocidade na Linha 2 em momentos característicos do pulso.



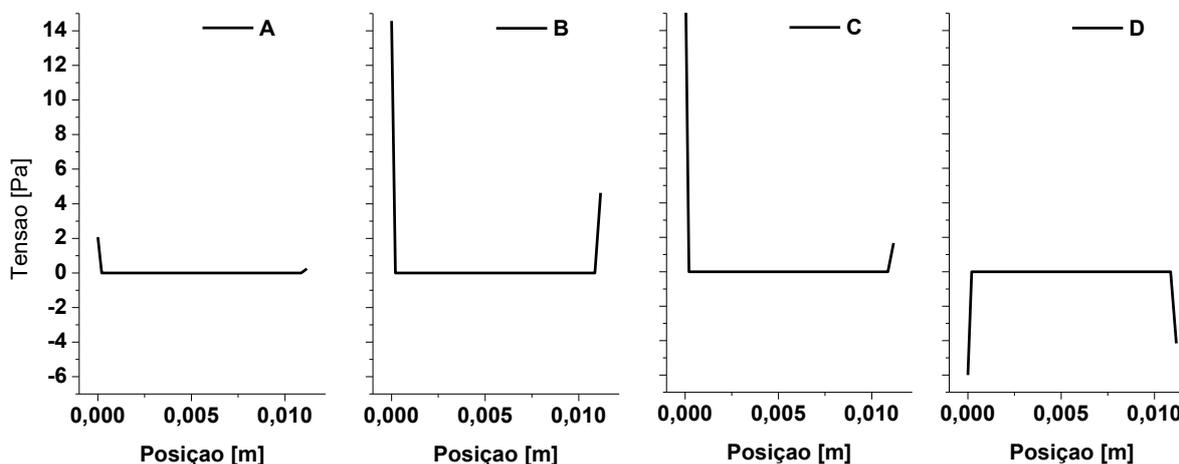
Fonte: Do autor (2019).

O fluxo pulsado produz velocidades maiores durante o *set point* superior (Fig. 4-24 C) e confere grandes tensões cisalhantes (Figura 4-25 B-C) para quebrar a adesão mais rapidamente e assim diminuem a deposição na superfície. Ao final de cada período, a mudança direcional observada no escoamento do líquido contribui para maiores taxas de transporte do sanitizante.

Além disso, a inversão do sentido da velocidade próximo à parede (Figura 4-24 D) e consequente inversão no sentido da tensão de cisalhamento (Figura 4-25 D) contribui para melhores remoções devido a fadiga causada aos depósitos e superação das forças adesivas.

De toda forma, a aplicação de pulsos apresenta desempenho superior ao processo convencional. Augustin *et al.* (2010) relataram fenômeno similar, comparando vazão constante e vazão pulsada. No estado estacionário, a remoção foi menor devido às baixas velocidades na região. No fluxo pulsado, ocorre um aumento da velocidade e o fluxo reverso nessa região. Dessa forma, melhorias mais pronunciadas, para áreas onde baixas vazões e pequenas tensões dominam, podem ser observadas.

Figura 4-25 – Perfil de tensão na Linha 2 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

4.7.3. TR II

. O trecho reto vertical (TR II) apresentou um valor de redução ligeiramente superior as demais superfícies avaliadas. As variáveis ondulação e período foram significativas na redução decimal do biofilme ao nível de significância de 5%. A Equação 4-3 expressa a redução decimal da adesão na superfície de TR II e apresentou coeficiente de correlação foi igual a 0,9077. Na Tabela 4-8 é apresentado a avaliação dos dados do planejamento eliminando os parâmetros que não influenciam significativamente a resposta.

Tabela 4-8 - Avaliação do efeito da ondulação (X_1) e duração do período (X_2) na remoção do biofilme do cupom TR II.

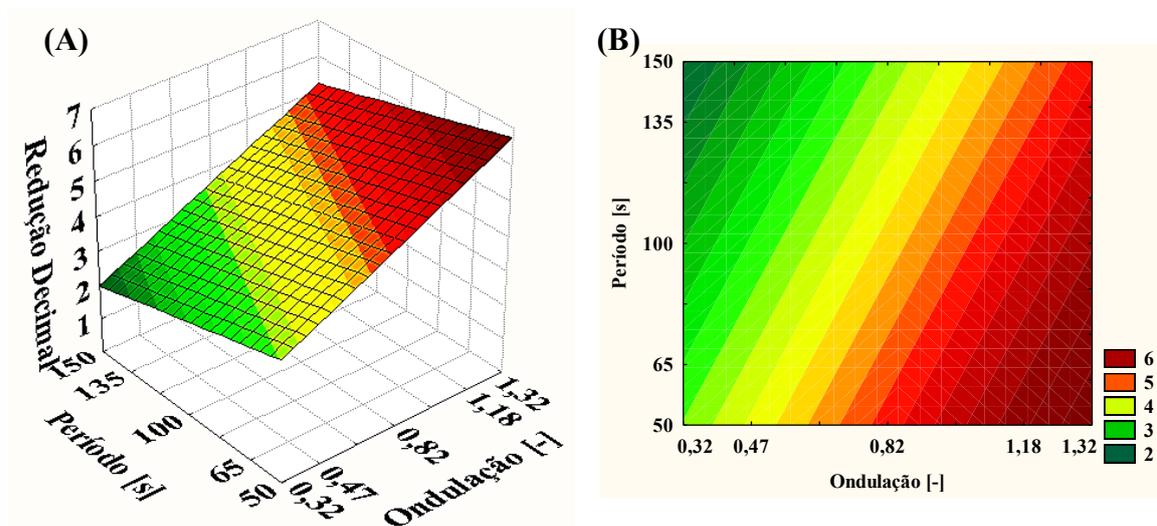
| Fator | Efeito | Desvio | p | Limite de confiança | | Coeficiente do Modelo |
|-------|---------|--------|--------|---------------------|---------|-----------------------|
| | | | | -95% | 95% | |
| Média | 4,3570 | 0,1283 | 0,0000 | 4,0535 | 4,6605 | 4,3570 |
| X_1 | 2,1471 | 0,2870 | 0,0001 | 1,4686 | 2,8257 | 1,0736 |
| X_2 | -1,0298 | 0,2870 | 0,0089 | -1,7083 | -0,3512 | -0,5149 |

Fonte: Do autor (2019).

$$RD = 4,357 + 1,0736X_1 - 0,5149X_2 \quad (4-3)$$

Observou-se que a contribuição da ondulação para remoção aconteceu para as maiores magnitudes de pulso. Similarmente as outras duas superfícies, notou-se que os menores período contribuíram para as maiores reduções. Essa tendência pode ser observada na superfície de resposta (Figura 4-26 A) e no contorno (Figura 4-26 B).

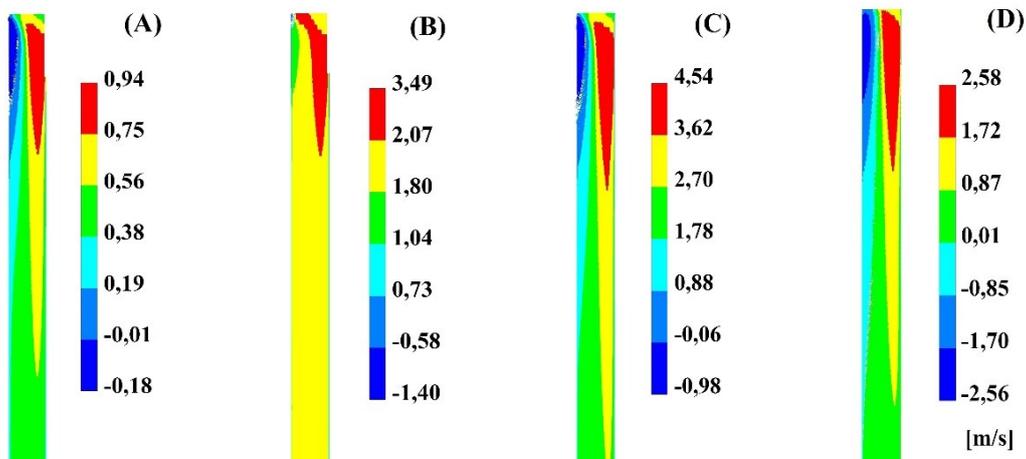
Figura 4-26 – Superfície de resposta (A) e contorno (B) da RD para o cupom TR II.



Fonte: Do autor (2019).

A Figura 4-27 mostra os contornos de velocidade para a maior ondulação, condição mais favorável (Corrida 6), em cada etapa do ciclo da pulsação (A) vazão estacionária, (B) transição entre vazão estacionária e pulso, (C) pulso máximo e (D) retorno do pulso para vazão estacionária.

Figura 4-27 – Contorno de velocidade em TR II em instantes característicos.



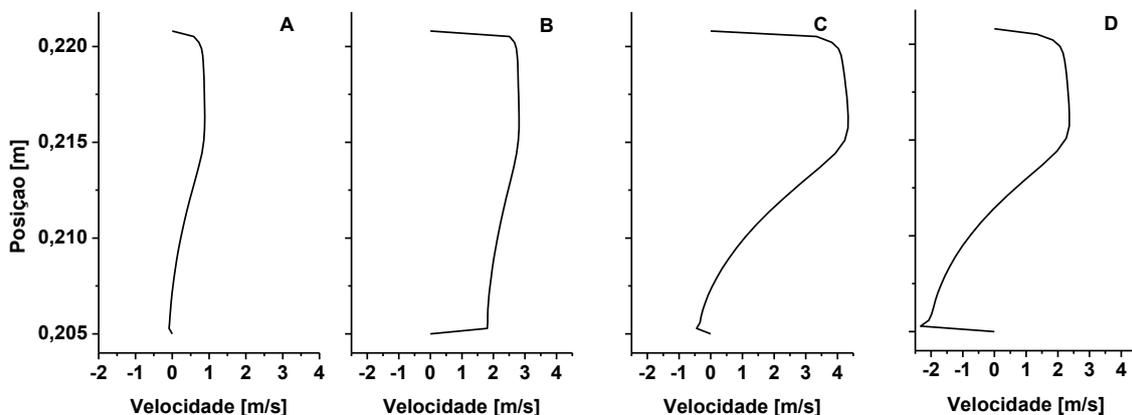
Fonte: Do autor (2019).

A maior redução observada no cupom TR II pode ser atribuída à maior velocidade e tensão de cisalhamento experimentada pela superfície da tubulação, devido ao caminho preferencial no início deste trecho, conforme apresentado na fluidodinâmica computacional (Fig. 4-27). Nota-se que no início do período (Figura 4-28A) o escoamento se dá preferencial do lado direito do tubo o que favorece maiores remoções nesta região em detrimento do lado oposto. Além disso, na região esquerda do cupom, é perceptível uma pequena inversão no sentido da velocidade. Esse comportamento é justificável pela mudança brusca na direção de escoamento e formação de redemoinhos.

No instante da mudança de *set point* (Figura 4-28 B) o perfil torna-se momentaneamente empistonado em ambas as faces do tubo, fato que confere aumento da transferência de massa, maiores tensões cisalhantes e inversão no sentido da tensão (Figura 4-29 B) o que contribuiu para maiores reduções durante a limpeza CIP neste local.

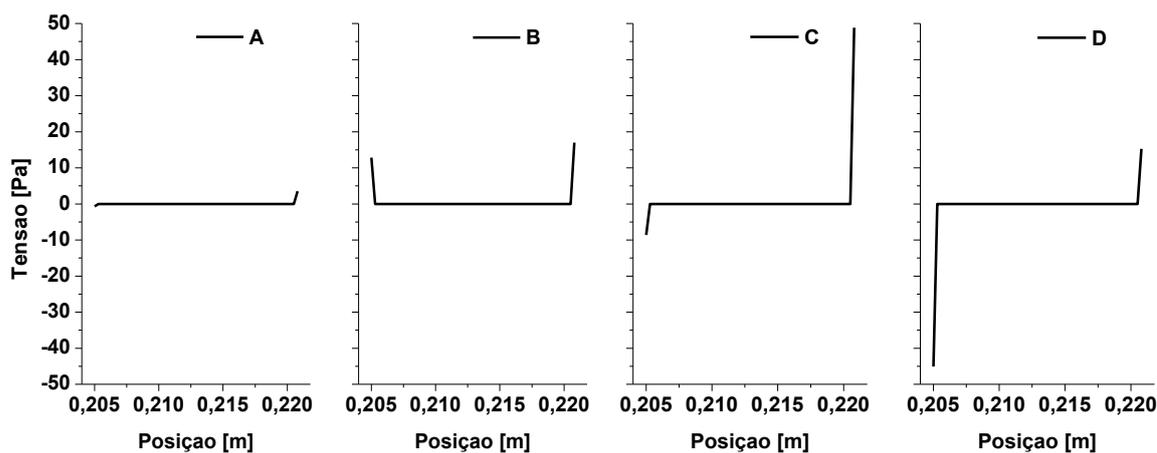
O perfil de velocidade durante o *set point* superior assume o mesmo formato inicial do período, no entanto, com valores mais pronunciados. Dessa forma, a velocidade e tensão de cisalhamento na superfície direita são superiores (Fig 4-28C e Fig 4-29 C). Por fim, no instante (Fig4-28 D) ocorre o encerramento de um período, com retorno da vazão ao *set point* menor. Neste momento, é notável uma expressiva inversão da velocidade próximo a parede esquerda do tubo. Essa combinação, de inversões e mudanças de velocidades, contribuiu para fadiga das adesões e maiores níveis de remoções.

Figura 4-28 – Perfil de velocidade na Linha 3 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

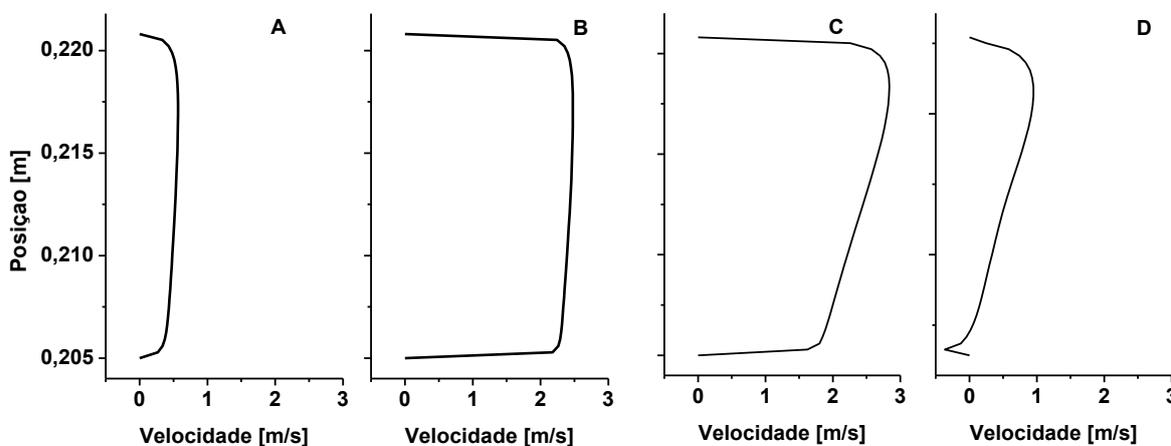
Figura 4-29 – Perfil de tensão na Linha 3 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

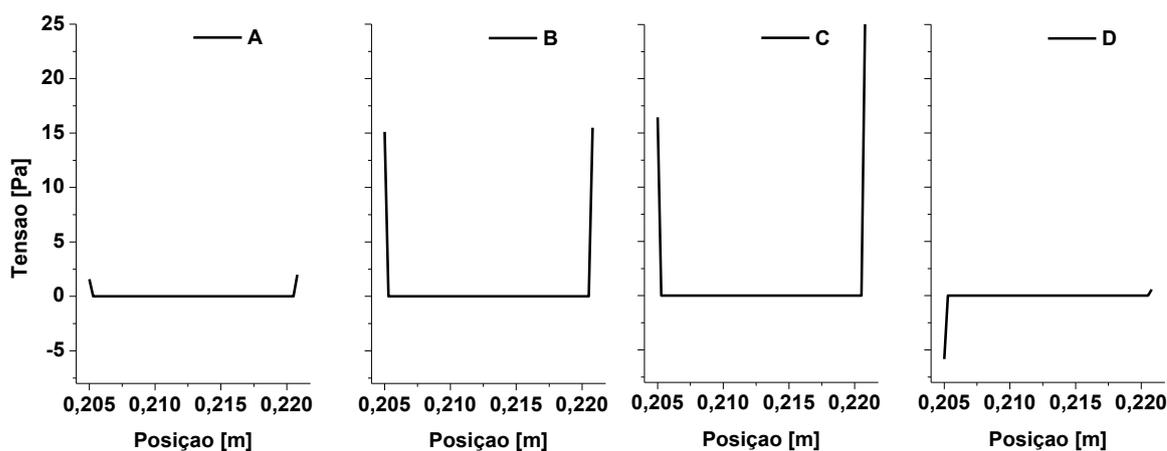
Próximo à saída de TR II, na Linha 4, no início do período, o perfil de velocidade foi aproximadamente uniforme (Fig. 4-30 A), não apresentando aspectos de um caminho preferencial. Com a entrada do pulso (Fig. 30 B) o perfil torna-se mais uniforme, fato que confere maiores tensões cisalhantes em ambas as faces (Fig. 4-31 B) e ainda uma distribuição praticamente uniforme por toda superfície.

Figura 4-30 – Perfil de velocidade na Linha 4 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 4-31 – Perfil de tensão na Linha 4 em momentos característicos do pulso.



Fonte: Do autor (2019).

Em seguida, na vazão superior, a velocidade apresenta-se com aspectos de um caminho preferencial devido ao deslocamento do perfil para o lado direito da tubulação (Fig. 4-30 C). O aumento da vazão propagou o caminho preferencial a maiores distancias no tubo. De toda forma, esse cenário confere altas taxas de cisalhamento (Fig.4-31 C) na superfície, o que justifica que maiores ondulações favorecerem maiores remoções. De acordo com Foust *et al.*, (1982) o incremento da vazão favorece a turbulência na tubulação, de forma que a turbulência se inicia num núcleo central e cresce nas direções radiais à medida em que a velocidade média é aumentada. Dessa forma, a parede do tubo experimenta uma maior tensão e redução da camada-limite, o que provoca aumento da taxa de transferência do agente químico sanitizante até a superfície (BODE *et al.*, 2007). Ao final do período, a diminuição na vazão provoca a inversão no sentido

da velocidade (Fig. 4-30 D) na face esquerda da tubulação, aquela mais prejudicada com o perfil descolocado devido a trajetória preferencial, e conseqüentemente inversão no sentido da tensão cisalhante (Fig. 4-31 C-D), o que contribui para fadiga da adesão e altas reduções em TR II. Augustin *et al.*, (2010) descreveram em seu trabalho que o fluxo pulsado também foi significativo no desempenho da limpeza CIP.

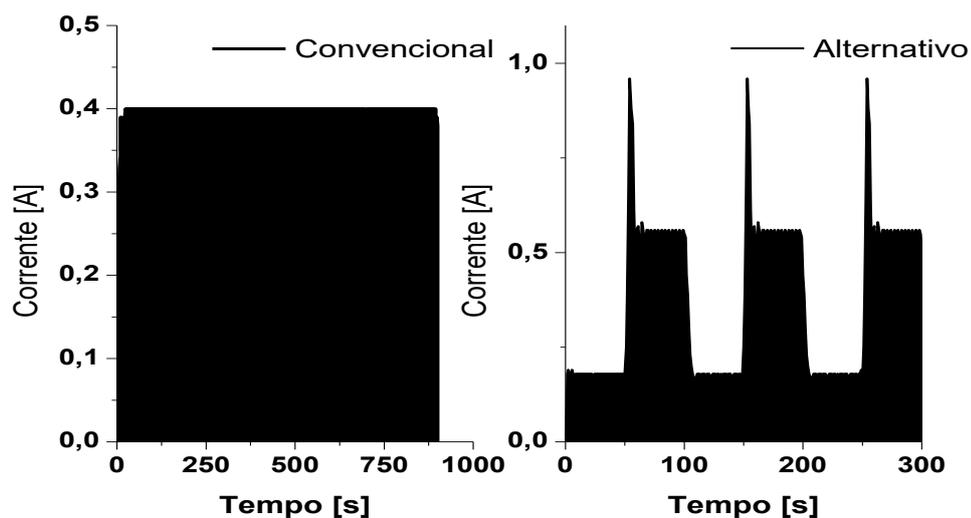
4.8. CONSUMO ENERGÉTICO

Estimou-se o consumo energético para configuração convencional e a condição alternativa que proporcionou a maior redução para ambas as superfícies utilizando a Equação 3-14. A condição da corrida 6 com vazão estacionária de 5,75 a 28,25 L/min com períodos com 100s de duração.

$$E = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,64 \cdot \int_0^t i(t) dt \quad (3-14)$$

O valor da integral é numericamente igual a área abaixo da curva, conforme mostrado na Figura 4-32. A área para operação convencional é igual a 351. A área sobre a curva alternativa é 111,88.

Figura 4-32 – Corrente extraída da rede de distribuição na etapa de sanitização.



Fonte: Do autor (2019).

Dessa forma, o consumo de energia é apresentado na Tabela 4-9.

Tabela 4-9 – Relação de consumo energético para cada tratamento.

| Tratamento | Energia consumida (J) |
|-------------------|------------------------------|
| Convencional | 85.599,34 |
| Alternativo | 27.284,24 |

Fonte: Do autor (2019).

Portanto, é expressiva a redução no consumo de energia adotando a sanitização alternativa com pulsos. Nesta configuração foi possível economizar aproximadamente 70% de energia em comparação ao processo convencional. Destacou-se também a redução de 67% no tempo de operação para execução dessa etapa. Gillham (1997) e Bode *et al.* (2007) também mostraram em suas experiências que uma limpeza até 50% mais curta é possível quando se aplica o fluxo pulsado.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs avaliar a higienização CIP convencional e uma estratégia alternativa utilizando pulsos periódicos na vazão durante a etapa de sanitização para economia de tempo e energia. Para isso empregou-se filtros para minimização de ruídos no sinal de vazão, modelou-se o sistema com função de transferência de primeira ordem com tempo de atraso, projetou-se controladores e analisou-se seus respectivos desempenhos para controle da vazão pulsada. Além disso, verificou-se o efeito dos pulsos na etapa de sanitização e a fluidodinâmica do escoamento no interior da tubulação.

O emprego de filtros de sinal foi satisfatório na remoção de ruídos tipicamente observados em plantas industriais. Os picos de ocorrência esporádica de alta magnitude causados por sinais elétricos e fatores externos foram removidos com uso do filtro *spike*. O Filtro exponencial foi adequado para suavizar os ruídos de alta frequência e apresentou-se de fácil implementação.

A representação do sistema por meio de modelos paramétricos na forma de funções de transferência de primeira ordem com tempo de atraso mostrou-se adequado para modelar a vazão do protótipo CIP quando submetido a perturbações do tipo degrau e para entradas aleatórias na aplicadas na potência da bomba.

A determinação de parâmetros para controlador PID utilizando métodos clássicos de projeto: Síntese Direta, Modelo Interno, ITAE Servo e Hagglund Astrom, subsidiou informações sobre a faixa de parâmetros mais adequada para realização da sintonia fina.

A técnica da fluidodinâmica computacional permitiu investigar informações, como perfil de velocidade e tensão em regiões de difícil acesso. Além disso, contribuiu para o estudo da sanitização utilizando vazão pulsada por permitir detalhar a dinâmica do fluido sanitizante no interior da tubulação e evidenciar a ocorrência do efeito anular e inversão de fluxo próximo a parede nas condições em que o fator W era maior que um.

As variáveis ondulação e duração do período do pulso mostraram-se estatisticamente significativas na redução dos micro-organismos aderidos na superfície da tubulação. Notou-se que em ambas as análises o conjunto de maiores ondulações e menores períodos favoreceram a sanitização. Nesse cenário, o CIP alternativo mostrou-se bastante eficiente com altas reduções decimais, de forma que as contagens de colônias foram menores que 50 UFC/cm² e atenderam as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS).

CONCLUSÃO

Além disso, destaca-se ainda que os níveis higiênicos recomendados pela OMS alcançados com a melhor configuração pulsada, a estratégia reduziu aproximadamente 67 % o tempo de parada para sanitização. Por fim, o consumo energético para processo CIP alternativo mostrou-se cerca de 70 % mais econômico em comparação com a operação convencional.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, N. J. D. Higiene na indústria de alimentos: avaliação e controle da adesão e formação de biofilmes bacterianos. São Paulo: Livraria Varela, 2008.
- ARAUJO, E. A., ANDRADE, N. J. CARVALHO, A. F., RAMOS, A. M., SILVA, C. A. S.; SILVA, L. H. M. Aspectos Coloidais da Adesão de Micro-Organismos. Química Nova. 33 (9), 1940-1948. 2010.
- AUGUSTIN, W.; FUCHS, T.; FÖSTE, H.; SCHÖLER, M.; MAJSCHAK, J. P.; SCHOLL, S. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. Food and Bioproducts Processing, 88, 384-391. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.08.007>
- BANSAL B, CHEN XD, LIN SXQ. Skim milk fouling during ohmic heating. Heat exchanger fouling and cleaning: challenges and opportunities. Engineering Conferences Intl.; Kloster Irsee, Germany. Engineering Conferences International, New York, U.S.A. 5-10. 2005
- BANSAL, B.; CHEN, X. D. A critical review of milk fouling in heat exchangers. Comprehensive reviews in food science and food safety, 5 27-33. 2006. <https://doi.org/10.1111%2Fj.1541-4337.2006.tb00080.x>
- BEGA, E. A. (Org.). Instrumentação industrial. 3. ed. Rio de Janeiro (RJ): Interciência, 2011.
- BELMAR-BEINY, M. T.; GOTHAM, S. M.; PATERSON, W. R.; FRYER, P. J.; PRITCHARD, A. M. The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. Journal of Food Engineering, 19, 119-139. 1993. <https://doi.org/10.1016%2F0260-8774%2893%2990038-1>
- BÉNEZECH', T., FAILLE, C. Two-phase kinetics of biofilm removal during CIP. Respective roles of mechanical and chemical effects on the detachment of single cells vs cell clusters from a *Pseudomonas fluorescens* biofilm (219) 121-128. 2018. <https://doi.org/10.1016%2Fj.jfoodeng.2017.09.013>
- BEQUETTE, B. W. Process control: modeling, design, and simulation. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2013.
- BERNARDES, P.C. et al. Work of adhesion of dairy products on stainless steel surface. Brazilian Journal of Microbiology, São Paulo. v. 43, n. 4, p.1261-1268, 2012. <https://doi.org/10.1590%2Fs1517-83822012000400004>
- BLEL, W., LE GENTIL-LELIEVRE, C., BENEZECH, T., LEGRAND, J., LEGENTILHOMME, P. Application of Turbulent Pulsating Flows to the Bacterial Removal During a Cleaning in Place Procedure. Part 1: Experimental Analysis of Wall Shear Stress in a Cylindrical Pipe, Journal of Food Engineering, 90(4), 422-432 and 433-440. 2009. <https://doi.org/10.1016%2Fj.jfoodeng.2008.07.008>
- BODE, K., HOOPER, R. J. AUGUSTIN, W. PATERSON, WILSON, D. I. SCHOLL, S. Pulsed flow cleaning of whey protein fouling layers. Proceedings of 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities. Germany, 2005.
- BODE, K., HOOPER, R.J., AUGUSTIN, W., PATERSON, W.R., WILSON, D.I., SCHOLL, S. Pulsed flow cleaning of whey protein fouling layers. Heat Transfer Engineering 28, 202-209. 2007. <https://doi.org/10.1080%2F01457630601064611>

- BOX, G. E. P., HUNTER, J. S. HUNTER, W. G. Statistics for Experimenters Design, Innovation and Discovery. Wiley Interscience. 2005.
- BRADLEY, S. E., FRYER, P. J., GRIFFIN, T. A., WILSON, D. I. Use of an oscillatory flow heat exchanger in food processing. In H. G. Kessler, & D. B. Lund, Fouling and cleaning in food processing. 14-24. Munich University. 1989. <https://doi.org/10.1205%2F096030899532277>
- BRASIL. Instrução Normativa Nº 62, de 29 de dezembro de 2011. ANEXO I - Regulamento Técnico De Produção, Identidade E Qualidade De Leite Tipo A. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2011.
- BRUNETTI, F. Mecânica dos fluidos. 2. ed. rev. São Paulo (SP): Pearson, 2014.
- BURFOOT, D., MIDDLETON, K. Effects of Operating Conditions of High Pressure Washing on the Removal of Biofilms from Stainless Steel Surfaces, Journal of Food Engineering, 90(3), 350-357. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.006>
- BURTON, H. A laboratory method for the investigation of milk deposits on heat exchanger surfaces. Journal of Dairy Research, 28(3), 255-263. 1961. <https://doi.org/10.1017%2Fs0022029900010852>
- BYLUND, G. Dairy processing handbook. Cornell University. Tetra Pak Processing Systems AB, 2003.
- CAMPOS, K. C. PIACENTI, C. A. Agronegócio Do Leite: Cenário Atual e Perspectivas. XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 2007
- CARLOTTI FILHO, M. A. C. *Estudo da Cinética de Remoção de Resíduos de Cálcio e de Detergente Alcalino para Otimizar as Etapas de Pré-Lavagem e de Enxágue em um Trocador de Calor de Placas*. 2008. 72 p. Dissertação de Mestrado - Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul. 2008.
- CARNEIRO, L. R. A. *Ajuste dinâmico dos parâmetros do controlador de vazão de água de enxágue aplicado à remoção da solução detergente em sistema CIP*. 2017. 81 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. 2017.
- CARRERA, S. C. *Validação do Processo CIP como Ferramenta para Melhorar a Qualidade e a Produtividade: Estudo de Caso em Microcervejaria*. 2015. 112 p. Dissertação de Mestrado - UFSC. Florianópolis. 2015.
- CASTRO, V. C. *Diagnostico do consumo de água, da geração de efluente e de resíduos sólidos em um laticínio de pequeno porte*. 2007. 67 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2007.
- CHAVES, L. C. D. *Estudo da Cinética de Formação de Biofilmes em Superfícies em Contacto com Água Potável*. 2004. 186 p. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal, 2004.
- CHIEN, I. L., FRUEHAUF. Consider IMC Tuning to Improve Controller Performance, Chem. Eng. Prog. (86) 10, 33-41. 1990.
- CRIADO, M.T., SUÁREZ, B., FERREIRÓS, C.M. The importance of bacterial adhesion in the dairy industry. Food Technology, v.48, n.2, 123-126, 1994.
- DIF, M.; BLEL, W.; TASTAYRE, G.; LENDORMI, T.; SIRE, O. Identification of transfer mechanisms involved in soiled CIP solutions regeneration at extreme pH and high temperature.

- Journal of Food Engineering, 114, 477-485. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.036>
- FAILLE, C., BÉNÉZECH, T., BLEL, W., RONSE, A., RONSE, G., CLARISSE, M., SLOMIANNY, C. Role of mechanical vs. chemical action in the removal of adherent *Bacillus* spores during CIP procedures. *Food Microbiol.* 33, 149-157. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.09.010>
- FAN, M. PHINNEY, D. M. HELDMAN, D. R. The impact of clean-in-place parameters on rinse water effectiveness and efficiency. *Journal of Food Engineering.* 222; 276-283. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.029>
- FLINT, S., PALMER, J., BLOEMEN, K., BROOKS, J., CRAWFORD, R. The growth of *Bacillus stearothermophilus* on stainless steel. *Journal of Applied Microbiology*, v. 90, p. 151-157, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01215.x>
- FOUST, A. S., WENZEL L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSON, L. B. *Princípios das operações unitárias*, 2. ed. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2011.
- FRYER, P. J.; ASTERIADOU, K. A prototype cleaning map: a classification of industrial cleaning processes. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 255-262. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.03.005>
- FRYER, P. J.; CHRISTIAN, G. K.; LIU, W. How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning. *International Journal of Dairy Technology*, 59, 76-84. 2006.
<https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2006.00249.x>
- FRYER, P. J.; ROBBINS, P. T.; ASTERIADOU, K. Current knowledge in hygienic design: can we minimize fouling and speed cleaning? *Procedia Food Science*, 1, 1753-1760. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.258>
- GEHR, R. COCHRANE, D. Peracetic Acid (PAA) as a Disinfectant for Municipal Wastewaters: Encouraging Performance Results from Physicochemical as Well as Biological Effluents. *Proceedings of the Water Environment Federation.* 182-198. 2002.
- GEORGIADIS, M. C., ROTSTEIN, G. E. & MACCHIETTO, S. Modeling and Simulation of Shell and Tube Heat Exchangers under Milk Fouling. *AIChE Journal.* (44): 959 – 971. 1998.
<https://doi.org/10.1002/aic.690440422>
- GERMANO, P.M.L.; GERMANO, M.I.S. *Higiene e vigilância sanitária de alimentos: qualidade das matérias-primas, doenças transmitidas por alimentos, treinamento de recursos humanos.* 3.ed. São Paulo: Manole. 1032p. 2008.
- GIESE, J. H. Sanitation: the key to food safety and public health. *Food Technology*, 45, 74-80. 1991.
- GILLHAM, C.R. *Enhanced Cleaning of Surfaces Fouled by Whey Proteins.* Ph.D. thesis. University of Cambridge. 1997.
- GILLHAM, C. R.; FRYER, P. J.; HASTING, A. P. M.; WILSON, D. M. Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. *Food and Bioproducts Processing*, 46, 199-209. 2000.
- HOFFMANN, F. L. et al. Avaliação da atividade antimicrobiana “in vitro” de dois agentes sanitizantes de uso industrial. *Higiene Alimentar*, São Paulo, v. 16, n. 94, p. 62-67. 2002.
- Hong, Y.; Brown, D. G.; *Langmuir.* 24, 5003. 2008.
- HJELM, M., HILBERT, L. R., MOLLER, P., GRAM, L. Comparison of adhesion of the food spoilage bacterium *Shewanella putrefaciens* to stainless steel and silver surfaces. *Journal of*

- Applied Microbiology, v. 92. 903-911, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01609.x>
- IBGE. Banco de dados [Internet]. Rio de Janeiro: IBGE; 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/leite/brasil>
- INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS (ICTA). Manual de higienização da indústria alimentar 40 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.
- IMMING, J. O., Higienização na indústria de alimentos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 50. 2013.
- ISERMANN, R., MUNCHHOF, M. Identification of Dynamic Systems. Springer, 2011. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78879-9>
- JENSEN, B.B.B. Numerical study of influence of inlet turbulence parameters on turbulence intensity in the flow domain: incompressible flow in pipe system. Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng. 221, 177-186. 2007. <https://doi.org/10.1243/09544089JPME124>
- JULLIEN, C.; BÉNÉZECH, T.; CARPENTIER, B; LEBRET, V.; FAILLE, C. Identification of surface characteristics relevant to the hygienic status of stainless steel for the food industry. Journal of Food Engineering, v.56, p.77-87, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00150-4)
- KHALDI, M., BLANPAIN-AVET, P., GUÉRIN, R., RONSE, G., BOUVIER, L., ANDRÉ, C., DELAPLACE, G. Effect of calcium content and flow regime on whey protein fouling and cleaning in a plate heat exchanger. J. Food Eng. 147, 68-78. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.020>
- KASNOWSKI, M. C. MANTILLA, S. P. S. OLIVEIRA, L. A. T. FRANCO, R. M. Formação de biofilme na indústria de alimentos e métodos de validação de superfícies. Revista científica eletrônica de medicina veterinária. Graça, n. 15, julho. 2010
- KUMARI, S. SARKAR, P. K. In vitro model study for biofilm formation by Bacillus cereus in dairy chilling tanks and optimization of clean-in-place (CIP) regimes using response surface methodology. 36, 153-158. 2014.
- LE CLERCQ-PERLAT, M. N., LALANDE, M. Cleanability in relation to surface chemical composition and surface finishing of some materials commonly used in food industries. Journal of Food Engineering, v. 23, p. 501-517, 1994. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90108-2](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90108-2)
- LEVINE, W. S. Control System Applications. CRC Press, 1999
- LI, B.; LOGAN, B.E. Bacterial adhesion to glass and metal-oxide surfaces. Colloids Surf., B 2004, 36, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.05.006>
- LI, H., LI, Y., XIANG, L., HUANG, Q., QIU, J., ZHANG, H., SIVIAIAH, M.V., BARON, F., BARRAULT, J., PETIT, S., VALANGE, S. Heterogeneous photo-Fenton decolorization of Orange II over Al-pillared Fe-smectite: response surface approach, degradation pathway, and toxicity evaluation. J. Hazard. Mater. (287): 32-41. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.023>
- LJUNG, L. System identification Toolbox User's Guide. MathWorks. 2015. 904 p.
- MERCADE-PRIETO, R., CHEN, X. D., 2006, Dissolution of Whey Protein Concentrate Gels in Alkali," Aiche Journal, 52(2), 792-803. <https://doi.org/10.1002/aic.10639>

- MARCHANT, R., BANAT, I.M. Biosurfactants: a sustainable replacement for chemical surfactants? *Biotechnol. Lett.* 34, 1597-1605. 2012. <https://doi.org/10.1007/s10529-012-0956-x>
- MARSHALL, K.C.; STOUT, R; MITCHELL, R. Mechanism of the initial events in the sorption of marine bacteria to surfaces. *Journal of General Microbiology*, Reading, v.68, 337-348. 1971. <https://doi.org/10.1099/00221287-68-3-337>
- MCCLAVE, J. T.; BENSON, P. G. & SINCICH, T. *Statistics for business and economics*. 9. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- MCCONNELL, E.; D. JERNIGAN. *The Electronics Handbook*, 2nd ed., J. C. Whitaker (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.; LEYLEGIAN, J. C. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 8. ed. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2014.
- MENGYUAN FAN, B. S. Effectiveness of Pre-Rinse During In-Place Cleaning of Stainless Steel Pipe Lines. The Ohio State University. [S.l.], p. 84. 2014.
- MODLER, H.W. Milk Processing. In: NAKAI, S.; MODLER, H.W. (Eds.), *Food Proteins Processing Applications*. Canada: Wiley-VCH, Inc. 1-88. 2000.
- MOERMAN, F.; RIZOULIÈRES, P.; MAJOOR, F. A. Cleaning in place (CIP) in food processing. In: LELIEVELD, H. L. M.; HOLAH, J. T.; NAPPER, D. *Hygiene in food processing: Principles and practice*. 2ª. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009.
- MURRAY, B. S., & DESHAIRES, C. Monitoring protein fouling of metal surfaces via a quartz crystal microbalance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 227(1),32-41. 2000. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6882>
- NASCIMENTO, M. S.; SILVA, N., CATANOZI, M.P.L.M.; SILVA, K. C. Avaliação comparativa de diferentes desinfetantes na sanitização de uva. *Brazilian Journal Food Technology*, v. 6, n. 1, 63-68. 2003
- NAVES, F. L., De Paula, T. I., BALESTRASSI, P. P., BRAGA, W. L. M.,SAWHNEY, R. S. DE PAIVA, A. P., Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for methyl orange treatment. *Journal of Cleaner Production*. (143): 413-439. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.092>
- NIAMSUWAN, S., KITTISUPAKORN, P. MUJTABA, I. M. Minimization of water and chemical usage in the cleaning in place process of a milk pasteurization plant. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 33. 431-440. 2011.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos elétricos*. 8. ed. São Paulo (SP): Pearson. 574 p. 2010.
- NORTERMANS, S.; DORMANS, J.A.M.A.; MEAD, G.C., Contribution of surface attachment to the establishment of microorganisms in food processing plants: A review. *Biofouling*, Chur, v.5, n.1-2, 21-36, 1991. <https://doi.org/10.1080/08927019109378226>
- NOVAES, M. L. O. *Modelo de previsão de demandas e redução de custos da farmácia hospitalar*. 2007. 214 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, 2007.

- NOVAES, M. L. O., GONÇALVES, A. A., GOUVÊA, D. S. A., SIMONETTI, V. M. M. Utilização dos métodos de suavização exponencial e da média móvel aritmética para a previsão de demandas na área de saúde. XXVIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção - A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. 2008.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo (SP): Pearson, 2010.
- PAK, T. Cleaning in place: A guide to cleaning technology in the food processing industry. [S.l.]: Pak, Tetra, 2016.
- PANAGOPOULOS, H., HÄGGLUND, T., & ÅSTRÖM, K. J. Design of PID controllers based on constrained optimisation. IEE Proceedings - Control Theory and Applications, 149(1), 32–40. 2002. <https://doi:10.1049/ip-cta:20020102>
- SANTOS, M. G. *Eficiência do processo clean in place (CIP) na remoção de biofilmes formados por Listeria monocytogenes simulando diferentes condições encontradas em laticínios*. 2009. 87 p. Dissertação de Mestrado – USP, Piracicaba, 2009 <https://doi.org/10.11606/D.11.2009.tde-10092009-085724>
- SCHMIDELL, Willibaldo; BORZANI, Walter; LIMA, Urgel Almeida; Aquarone, Eugênio. Biotecnologia Industrial; São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA; 2007.
- SCHEUERMAN, T. R.; CAMPER, A. K.; HAMILTON, M. A.; J. Effects of Substratum Topography on Bacterial Adhesion. Colloid Interface Sci. 208, 23-33. 1998.
- SCHLICHTING, H., GERSTEN, K. Grundzüge der Grenzschichttheorie. In: Schlichting, H., Gersten, K. (Eds.), Grenzschichttheori, 10th ed. Springer-Verlag, New York, 27–48. 2006.
- SCHÖLER, M., FUCHS, T., HELBIG, M., AUGUSTIN, W., SCHOLL, S., MAJSCHAK, J.-P. Monitoring of the local cleaning efficiency of pulsed flow cleaning procedures. In: Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, Schladming, Austria. 455–463. 2009.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; FRANCIS, J. D. III. Process Dynamics and Control. 3ª. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- SILVA, S. M. *Estudo da Cinética de decomposição de soluções de ácido peracético contaminadas com material orgânico*. 2010. 82 p. Dissertação de Mestrado - Instituto Mauá de Tecnologia São Caetano do Sul, 2010.
- SILVA, G.; DUTRA, P.R.S.; CADIMA, I.M. Higiene na indústria de alimentos. Recife: EDUFRPE, 2010.
- SMITH, C. A; CORRIPIO A. Princípios e Prática do Controle Automático de Processo. 3 ed. Rio de Janeiro (RJ). LTC, 2008.
- SOMASUNDARAN, P.; MARKOVIC, B.; Yu, X.; KRISHNAKUMAR, S. Handbook of Surface and Colloid Chemistry; Birdi, K. S.; ed.; CRC Press: Lincoln, 2003. <http://doi:10.1201/9781420040944>
- SOUZA, E. G., GOMES, F. S. L., SILVA, G. F., BARREIRO JÚNIOR, I. S., NEVES., P. V. S., AZEVEDO, R. D. A importância do agronegócio do leite no segmento de agricultura familiar: um estudo de caso em municípios da região semiárida paraibana. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, Cooperativa Agropecuária do Cariri, 2015.
- TAMIME, A. Y. Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations. 3ª. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. <https://doi.org/10.1002/9781444302240>

REFERÊNCIAS

- TISSIER, J. P., & LALANDE, M. Experimental device and methods for studying milk deposit formation on heat exchange surfaces. *Biotechnology Progress*, 2(4), 218-229. 1986. <https://doi.org/10.1002/btpr.5420020410>
- UBBINK, J.; SCHAR-ZAMMARETTI, P.; Colloidal properties and specific interactions of bacterial surfaces. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci* 12, 263-270. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.08.004>
- WALLHÄUßER, E., HUSSEIN, M. A., BECKER, T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. *Food Control* (27) 1-10. 2012. <http://doi:10.1016/j.foodcont.2012.02.033>
- WILSON, D.I. Challenges in cleaning: recent developments and future prospects. *Heat. Transf. Eng.* 26 (1), 51-59. 2005. <https://doi.org/10.1080/01457630590890175>
- WILCOX, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, third ed. DCW Industries, La Canada, CA. 2006.
- YANG, J. JENSEN, B. B. B., NORDKVIST, M., RASMUSSEN, P., GERNAEY, K. V., KRÜHNE, U. CFD modelling of axial mixing in the intermediate and final rinses of cleaning-in-place procedures of straight pipes. *Journal of Food Engineering* (221) 95-105. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.017>