



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



JOÃO VÍTOR OKANO DE ALMEIDA

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE ENXÁGUE UTILIZADA EM SISTEMAS
DE LIPEZA *CLEAN-IN-PLACE***

Uberlândia, MG

2025

JOÃO VÍTOR OKANO DE ALMEIDA

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE ENXÁGUE UTILIZADA EM SISTEMAS
DE LIMPEZA *CLEAN-IN-PLACE***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Uberlândia, MG

2025

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma das etapas gerais de higienização.....	10
Figura 2.2: Círculo de Sinner.....	11
Figura 3.1: Representação esquemática do sistema estudado.....	16
Figura 4.1: Gráfico da curva do sistema x opções de curvas das bombas.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Resultados dimensionados para cada trecho a 3m/s.....	21
Tabela 4.2: Cálculos de pressão em cada trecho.....	22
Tabela 4.3: Resultados dos parâmetros em função da vazão de projeto.....	23

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIASÕES

CIP: Clean-in-Place

COP: Clean-Open-Place

D: Diâmetro

D_{nominal}: Diâmetro Nominal

D_{interno}: Diâmetro interno a tubulação

v: Velocidade

Q: Vazão Volumétrica

F: Vazão mássica

μ : Viscosidade

ρ : Densidade

Re: Número de Reynolds

L: Comprimento

e: Rugosidade absoluta

ϵ : Rugosidade relativa

f: Fator de atrito de Fanning

f_d: Fator de atrito de Darcy

g_c: Constante dimensional

g: Aceleração da gravidade

h_s: Perda de carga localizada

h_d: Perda de carga distribuída

h_{v,c}: Perda de carga em uma válvula de controle

h_t: Perda de carga total

Z_{final}: Altura final de um trecho

Z_{inicial}: Altura inicial de um trecho

P_{inicial}: Pressão no início de um trecho

P_{final}: Pressão no fim de um trecho

H: altura manométrica da bomba

RESUMO

A higienização alimentar é essencial para garantir a segurança e adequação dos alimentos em todas as etapas da cadeia produtiva. É composta por etapas como pré-lavagem, limpeza, desinfecção e enxágue, sendo influenciada por fatores como agentes químicos, mecânicos, térmicos e tempo, conforme o modelo do Círculo de Sinner. Métodos comuns incluem limpeza manual, aplicação de espuma, limpeza a seco, e sistemas automatizados como Clean-In-Place (CIP) e Clean-Open-Place (COP). O método CIP destaca-se pela eficiência, reduzindo o tempo e custos operacionais em indústrias como alimentícia, farmacêutica e de laticínios, com etapas típicas que incluem pré-lavagem, aplicação de detergentes (alcalinos e ácidos) e enxágues. A automação com sensores e controles melhora a eficácia, confiabilidade e escalabilidade do processo, permitindo o monitoramento de variáveis como fluxo, pH e temperatura. Apesar de suas vantagens, o CIP exige paradas operacionais, o que pode levar à negligência em algumas aplicações. Portanto, a otimização do processo é fundamental para balancear eficiência e custos, garantindo padrões de higiene, qualidade do produto e segurança alimentar. Tendo isso em vista, propõe-se uma análise de otimização, de um cenário industrial estudado na literatura. Nesse contexto, as tubulações foram dimensionadas para uma dada vazão de trabalho e, em seguida, analisou-se qual a vazão mínima necessária para gerar um menor custo com insumos e água sem comprometer a eficácia do processo, obtendo uma vazão de processo de $59\text{ m}^3/\text{h}$.

SUMMARY

Food hygiene is essential to ensure the safety and adequacy of food at all stages of the production chain. It consists of steps such as pre-washing, cleaning, disinfection, and rinsing, influenced by factors like chemical, mechanical, and thermal agents, as well as time, according to the Sinner's Circle model. Common methods include manual cleaning, foam application, dry cleaning, and automated systems such as Clean-In-Place (CIP) and Clean-Open-Place (COP). The CIP method stands out for its efficiency, reducing time and operational costs in industries such as food, pharmaceuticals, and dairy. Its typical stages include pre-washing, application of detergents (alkaline and acidic), and rinsing. Automation with sensors and controls enhances the process's effectiveness, reliability, and scalability, allowing the monitoring of variables such as flow rate, pH, and temperature. Despite its advantages, CIP requires operational downtimes, which may lead to neglect in some applications. Therefore, process optimization is essential to balance efficiency and costs while ensuring hygiene standards, product quality, and food safety. In this regard, an optimization analysis is proposed based on an industrial scenario studied in the literature. In this context, pipelines were sized for a given working flow rate, and subsequently, the minimum required flow rate was analyzed to achieve lower costs with inputs and water without compromising process effectiveness, resulting in a process flow rate of 59 m³/h.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5. CONCLUSÃO	25
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1. INTRODUÇÃO

Em operações industriais, especialmente na indústria alimentícia, a higienização de equipamentos se faz fundamental. Esse processo garante a remoção de sujidades e contaminações que poderiam afetar a saúde de consumidores, podendo ser realizada de forma mecânica ou química, sendo que, na prática, a combinação de métodos é a forma mais recomendada e utilizada.

Na indústria, existem diversos tipos diferentes de realização de limpeza. Um dos métodos mais comuns, com eficácia satisfatória é o método de limpeza denominado *Clean-in-Place* (CIP). Esse método é caracterizado por realizar a limpeza dos equipamentos sem a necessidade de desmontá-los, e consequentemente, sem precisar remover ou substituir nenhum componente.

Para isso, o processo de limpeza CIP geralmente conta com 5 etapas para a realização da sanitização, sendo elas a pré-lavagem, a aplicação de soluções detergentes alcalina, enxágue, aplicação de soluções detergentes ácidas e enxágue. Pode-se, então, perceber que o processo necessita de mais de uma etapa de enxágue, o que resulta em altos gastos com água e insumos detergentes.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é estudar a etapa de enxágue com água de um processo de limpeza CIP de um conjunto de tanques, utilizando informações apresentadas na literatura, de forma a economizar água sem comprometer a eficiência da limpeza.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

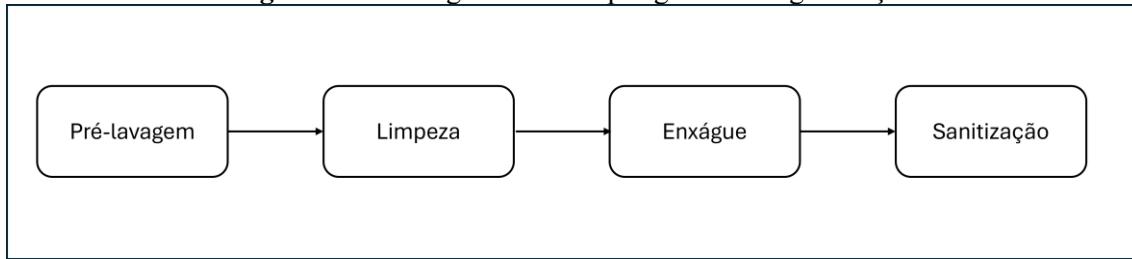
2.1. Higienização Industrial

De acordo com a *Codex Alimentarius Commission*, a higienização pode ser definida como “o conjunto de todas as condições e medidas necessárias para garantir a segurança e a adequação dos alimentos em todas as etapas da cadeia alimentar”. Dessa forma, a higiene alimentícia está ligada a todos os processos de limpeza com objetivo de desinfectar superfícies e/ou equipamentos assegurando a redução de resíduos danosos para a segurança e saúde pública, se aplicando em todas as etapas industriais e logísticas nesse ramo. (**ALCARRIA, 2021; SILVA 2023**)

O processo geral de higienização representado no diagrama de blocos da Figura 2.1 pode variar de diversas formas, de acordo com o produto que está sendo fabricado por esse processo e qual o agente infectante em questão. Uma das definições existentes é a Resolução N° 216, de 15 de setembro de 2004 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que dispõe sobre Regulamento Técnico de Boas Práticas para Serviços de Alimentação, que define o processo de higienização como uma operação que compreende duas etapas: a limpeza, que consiste na remoção física de agentes contaminantes; e a desinfecção, que conta com utilização de químicos para a limpeza.

Além dessas principais etapas de um processo de higienização também se pode incluir no ciclo de higienização as etapas de pré-lavagem, uma operação cujo objetivo é reduzir a quantidade de resíduos aderentes aos equipamentos, e o enxágue que tem a função de remover todo e qualquer resíduo de detergentes e possíveis resíduos suspensos advindos do processo de limpeza. (**SILVA, 2023**).

Figura 2.1: Fluxograma das etapas gerais de higienização



Fonte: O autor

São basicamente quatro os fatores que influenciam na higienização de um equipamento de processo, a saber:

Agentes químicos: normalmente presentes em desinfetantes, são aqueles em que o poder de desinfecção se dá pela oxidação, coagulação de proteínas, ação do pH e reações químicas.

Agentes mecânicos: são aqueles em que o mecanismo de limpeza consiste no escoamento de fluido na superfície em que o agente a ser removido está presente. Por conta disso, trata-se de uma forma em que o fluido está sob a ação de tensões de cisalhamento que atuam nas superfícies sólidas e resultam em uma força de atrito na direção do escoamento, o que tende a promover a remoção de sujidades.

Agentes térmicos: de acordo com a cinética química, temperatura é definida como o grau de agitação das moléculas, sendo que altas temperaturas implicam em um alto grau de agitação. Dessa forma, a temperatura é um dos fatores chave para as reações de limpeza, sendo em muitos casos essencial para atingir a energia de ativação para que uma determinada reação ocorra ou para que elas ocorram de forma mais rápida.

Tempo: O tempo que as partículas indesejadas ficam em contato com a superfície de interesse e que ficam expostas a produtos químicos determinam a dificuldade e a eficiência do processo de limpeza. (**Alcarria, 2021**)

Esses fatores foram determinados por Sinner, que os propôs a representação deles por meio do Círculo de Sinner, apresentado na Figura 2.2. Vale destacar que, de acordo com ele, para uma higienização efetiva, as proporções de cada quadrante do círculo devem ser ajustadas de acordo com o objetivo e as características da limpeza.

Figura 2.2: Círculo de Sinner



Fonte: <https://www.indeba.com.br/site/entenda-os-impactos-do-circulo-de-sinner-na-higienizacao-em-frigorificos/>

O principal agente de limpeza é o detergente, o qual possui diferentes tipos e utilidades. Eles possuem formulações com múltiplos componentes e, no geral, servem para solubilizar ou reagir com determinados tipos de resíduos. No geral, eles podem ser

divididos em alcalinos, ácidos ou neutros, e são utilizados de acordo com o resíduo que se deseja remover, tendo cada um dos tipos de detergente sua melhor faixa de temperatura da água e concentração de uso. (**SILVA, 2023**)

O método de limpeza *Clean-In-Place* (CIP) consiste em realizar a higienização das máquinas e equipamentos industriais sem a desmontagem dos componentes (**JEURNINK e BRINKMAN, 1994; ANDRADE e MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999**). Para isso, a limpeza ocorre através da recirculação dos fluidos detergentes e sanitizantes seguidos de água de enxágue, com objetivo de obter mais rapidez, consistência e qualidade com a aplicação dessa técnica (**ALCARRIA, 2021**).

Alternativamente, o sistema de limpeza *Clean-Open-Place* (COP), consiste na limpeza em sistemas abertos, ou seja, em superfícies externas, considerando utensílios e equipamentos abertos (**SILVA, 2023**).

Dentre todos os métodos de limpeza industrial, o método de limpeza manual por imersão e escova se destaca como um dos mais simples. Ele depende apenas de soluções detergentes, ação humana e ferramentas simples como escovas e esponjas. (**SILVA, 2023**). A desvantagem desse método é o alto risco de falta de uniformidade, uma vez que se trata de ação totalmente humana (**OLIVEIRA, 2013**).

No caso de limpeza com o emprego de pressurizadores normalmente se utilizam aspersores ou pulverizadores (**OLIVEIRA, 2013**), podendo ser operados a altas ou baixas pressões. A água é aspergida para uma pré-lavagem utilizando soluções detergentes, seguida de enxágue (**SILVA, 2023**).

No caso de limpeza com aplicação de produto formador de espuma trata-se da aplicação do agente sanitizante, que nesse caso é a espuma (ou um gel formador de espuma). Em seguida, após um suficiente tempo de contato entre o agente sanitizante e a sujidade a ser removida, é realizada a esfregaçāo e enxágue manual (**SILVA, 2023**).

O método de limpeza a seco, como o próprio nome diz, não faz uso de enxágue para retirada de resíduos ou de agente sanitizante. Consiste, basicamente, em um método totalmente físico de aspiração e escovação (**OLIVEIRA, 2013**).

2.2. Processo de Limpeza CIP

Atualmente, o processo de limpeza CIP já conta com diversas aplicações em diferentes ramos industriais. Dentre os principais, pode-se citar o ramo alimentício, que

vem de uma grande crescente. Com isso, o uso desse método se mostra também mais comum nesse setor. (**OLIVEIRA et al., 2020**)

Outra importante indústria que conta com o uso desse método de higienização é a farmacêutica. De acordo com **Aramouni et al., 2023**, garante uma performance de limpeza validada e replicável em equipamentos de processo na indústria farmacêutica, o que é valioso pensando na eficácia e escalabilidade desse método. Esse processo deve cobrir completamente as superfícies dos equipamentos e aplicar uma força de limpeza adequada.

Outro segmento que se destaca no amplo uso do método CIP é o ramo de laticínios. No trabalho de **Begnini et al., 2024**, o processo de limpeza em questão se mostra eficiente na remoção de microrganismos e resíduos de produtos indesejados, o que garante uma operação eficiente.

Ainda na literatura, é possível encontrar mais aplicações do método CIP. **Moutinho (2022)** estudou a aplicação do sistema de limpeza CIP em uma planta -piloto de processamento de *aloe vera*. Esse produto é uma matéria-prima muito utilizada no Brasil, tanto em aplicações domésticas como industriais, as quais se relacionam diretamente com os setores já mencionados.

Ao analisar as principais aplicações do processo de limpeza CIP, pode-se perceber que seu uso se verifica em indústrias não só emergentes mas, também, naquelas consideradas fundamentais para a sociedade. Com isso, pode-se dizer que esse método de limpeza tem impacto direto na economia, afetando custos operacionais de diversas empresas que fazem parte desses setores tão representativos.

Além disso, por se tratar de um método de tamanha importância em segmentos essenciais para o ser humano, o processo CIP pode ter sua importância relacionada ao bem-estar da população. O consumo crescente de produtos desses ramos levanta preocupações sobre a preservação da qualidade e higiene desses bens após a fabricação. Esse processo se destaca pela sua efetividade na remoção de diversos tipos de resíduos que contribuem para a proliferação de microrganismos e consequente contaminação alimentos que serão comercializados. (**SISLIAN, 2020**).

No entanto, esse método de limpeza requer parada nos equipamentos e, por consequência, interrupção na produção. Por conta disso, muitas vezes, esse processo é conduzido pelas empresas sem o devido rigor. Este fato reforça a importância de estudar e otimizar esse processo, visando redução de consumo sem reduzir sua eficácia.

Somando esses fatores, fica claro que a falta de higienização adequada pode aumentar a presença de microrganismos e resíduos nas superfícies, afetando a qualidade dos alimentos e causando problemas operacionais. Portanto, é essencial que esse processo seja efetivo. Esse tema é também de interesse de órgãos de vigilância sanitária, o que aumenta os esforços para que a limpeza seja feita da maneira correta (**OLIVEIRA et al., 2012**).

Em geral, um sistema CIP é composto por tanques de armazenamento, bombas e trocadores de calor. A quantidade e dimensionamento desses equipamentos (bem como suas especificações técnicas) variam em cada processo, a depender dos parâmetros do processo que se deseja higienizar.

Além dos elementos citados anteriormente, também é possível implementar a instrumentação para o controle automatizado do processo. Para isso, são empregados os seguintes componentes: sensores de vazão, de nível, de temperatura, condutivímetros, temporizadores, controladores automáticos, blocos de funções lógicas, e válvulas de controle.

Com a utilização de sistemas de controle, o sistema de limpeza CIP ganha ainda mais vantagens. Esse tipo de automatização confere mais confiabilidade na eficácia do processo, tanto no cumprimento adequado de todas as etapas quanto na duração delas. Assim, é possível estabelecer uma padronização e registro, o que permite ganhar escala, redução de mão de obra de operação (com consequente redução de custos e aumento da segurança) e melhores possibilidades de análises de melhoria. (**ALCARRIA, 2021; MEMISI et al., 2015**).

Sislán (2020) e **Alcarria (2021)** apresentam as etapas típicas de um processo de limpeza CIP, a saber:

- i) **Pré-lavagem:** etapa cujo objetivo é remover sujidades não aderidas às superfícies e diminuir o total de resíduos nas próximas etapas. Nessa etapa, cerca de 90% das impurezas podem ser removidas, a depender das condições do sistema.
- ii) **Aplicação de solução detergente alcalina:** essa etapa deve remover sujidades com maiores graus de aderência nas pãm maiores graus de aderência nas paredes e tubulações do sistema. Trata-se de uma etapa longa e que costuma contar com recirculação a fim de aumentar eficiência de custos com a solução.
- iii) **Enxágue:** nesse momento, é feito o primeiro enxágue para remover resíduos de sujidades bem como a solução alcalina da etapa anterior.

- iv) **Aplicação de solução detergente ácida:** trata-se de uma etapa opcional que consiste em solubilizar sujidades restantes e neutralizar possíveis resíduos alcalinos que possam ter ficado no processo.
- v) **Enxágue:** nessa etapa ocorre o segundo enxágue, em que normalmente se utiliza algum desinfetante e, em seguida, mais água para remover os resíduos finais.

Partindo de processos de limpeza CIP automatizados por meio da instrumentação de controle, diversos parâmetros vão influenciar na limpeza e em sua eficiência. Assim como existem várias possibilidades de adoção de variáveis de controle. Vazão e velocidade dos fluidos circulantes, tempos de circulação de cada processo, temperatura dos fluidos, condutividade elétrica, nível, fluxo, concentração do detergente, pH, pressão. Todos esses são exemplos de indicadores que podem ser medidos e controlados e que estão presentes influenciando os resultados do processo de limpeza CIP (**BEGNINI et al., 2024; ALCARRIA, 2021**).

Além disso, os fatores mencionados no círculo de Sinner (agentes químicos, agentes mecânicos, agentes térmicos e tempo) influenciam higienizações industriais como um todo e não deixam de se aplicar ao método CIP.

Ao longo do processo, é possível fazer medições por meio de sensores que monitoram tais parâmetros citados como taxas de fluxo, temperatura da solução de limpeza, pressão nas linhas, pH e condutividade, que indicam a quantidade de resíduo sendo removido. O sistema também utiliza uma bomba de sucção forte para minimizar o nível de líquido no equipamento, além de manter um fluxo turbulento para evitar zonas mortas e acúmulo de resíduos. (**ARAMOUNI et al., 2023**)

Cada um desses aspectos influencia o processo final de uma maneira diferente, podendo muitas vezes ser representados em equações e modelos matemáticos visando estudos de otimizações, a depender das características de cada processo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido por meio de simulação computacional, com utilização processos e equacionamentos disponíveis na literatura, visando analisar o efeito da variação de parâmetros no consumo final de água de enxágue utilizada no processo.

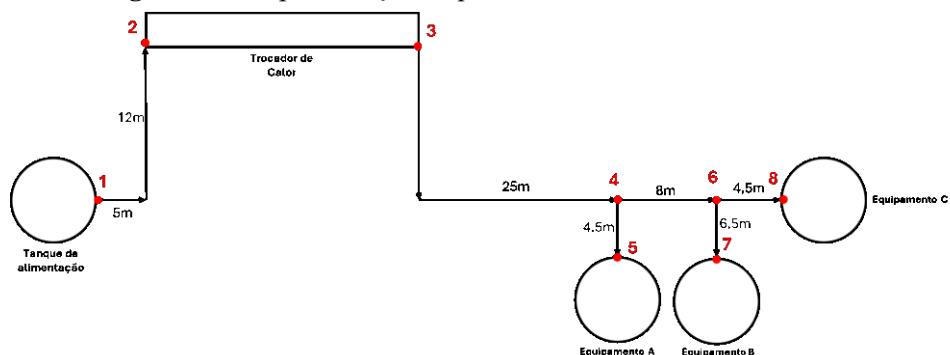
3.1. Materiais Utilizados

- Notebook I5 com licença do aplicativo do Excel, do pacote Office, habilitado para Macro
- Resultados experimentais disponíveis na literatura (**SOARES, 1999**)

3.2. Metodologia

A otimização proposta se trata do cenário estudado por **Soares (1999)** visando reduzir a quantidade de água gasta no processo de enxágue de três equipamentos (A, B e C) representados na Figura 3.1.

Figura 3.1: Representação esquemática do sistema estudado



Fonte: autoria própria (2025)

O estudo apresentado na sequência foi baseado no trabalho de **Soares (1999)**, no qual as tubulações foram dimensionadas utilizando uma vazão de $579,60 \text{ m}^3/\text{h}$, bem como temperaturas de entrada e saída no trocador de calor de 85°C e $72,2^\circ\text{C}$, respectivamente. A otimização proposta aqui, considera uma vazão de $58 \text{ m}^3/\text{h}$ e temperaturas de entrada e saída do permutador de calor de 25°C e 70°C , respectivamente.

Para realizar os cálculos necessários, foi necessário seguir os seguintes passos, em todos os trechos da representação esquemática da Figura 3.1:

- a) Calcular as vazões de água de enxágue em cada trecho, considerando os valores de temperaturas e densidades antes e depois do permutador de calor,

contemplando as variações em seu valor por conta de presença de divisores de correntes;

- b) Calcular, com base no critério da velocidade econômica de escoamento do fluido considerada, a área da seção transversal e o respectivo diâmetro da tubulação;
- c) Comparar o valor do diâmetro obtido com os valores de diâmetros nominais fornecidos em catálogo de fabricante de tubulações de aço inoxidável;
- d) Determinar o valor efetivo do diâmetro nominal e do diâmetro interno de escoamento do fluido;
- e) Calcular a velocidade real de deslocamento do fluido em cada trecho considerado no estudo;
- f) Calcular os respectivos valores de Rugosidade Relativa e do Número de Reynolds correspondente ao escoamento em cada trecho considerado no estudo;
- g) Determinar os valores do fator de atrito de Darcy, pelo Diagrama de Moody, em cada trecho considerado no estudo;;
- h) Calcular a perda de carga distribuída em cada trecho considerado no estudo;
- i) Calcular as perdas de carga localizadas em cada trecho considerado no estudo;.

De posse dos valores citados anteriormente, calculou-se as pressões em cada ponto marcado no diagrama da Figura 3 para, então, calcular a altura manométrica da bomba. Em seguida, variando valores de vazão volumétrica de água de enxágue e plotando as curvas que relacionam os valores de vazão com as perdas de carga em um único gráfico. Neste mesmo gráfico, foi representada a curva da bomba considerando as informações apresentadas no projeto.

Com isso, comparou-se essa curva da bomba do sistema com a curva de fornecimento de bombas de um fabricante para determinar qual a bomba ideal para atender os requisitos de projeto, e determinar seu rendimento e, assim, calcular os custos.

Para determinação do dimensionamento das tubulações, foi empregada a Eq. (3.1).

$$4 \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{Q}{v} \quad (3.1)$$

O regime de escoamento foi determinado considerando o adimensional de número de Reynolds, como apresentado na Eq. (3.2).

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (3.2)$$

A perda de carga distribuída por unidade de peso do fluido foi determinada, como apresentado na Eq. (3.3).

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g_c} \quad (3.3)$$

A perda de carga localizada por unidade de peso do fluido foi determinada, como apresentado na Eq. (3.4).

$$h_s = k \cdot \sqrt{\frac{v^2}{2 \cdot g_c}} \quad (3.4)$$

A perda de carga localizada por unidade de peso do fluido correspondente à válvula de controle foi assumida apresentar o valor mostrado na Eq. (3.5).

$$h_{v.c.} = 0,4 \quad (3.5)$$

A perda de carga total por unidade de peso do fluido foi determinada, como apresentado na Eq. (3.6).

$$h_t = \sum h_f + \sum h_s + h_{v.c.} \quad (3.6)$$

A equação do balanço global de energia mecânica por unidade de peso do fluido – considerando os pontos genéricos (*i*) e (*j*) adotados no diagrama da Figura 3.3 – foi determinada, como apresentado na Eq. (3.7).

$$z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} = z_j + \frac{P_j}{\gamma} + \frac{v_j^2}{2 \cdot g} + h_t \quad (3.7)$$

A equação do balanço global de energia mecânica por unidade de peso do fluido – considerando os pontos genéricos (*i*) e (*j*) e a presença de uma bomba no escoamento, adotados no diagrama da Figura 3 – foi determinada, como apresentado na Eq. (3.8).

$$z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + H_B = z_j + \frac{P_j}{\gamma} + \frac{v_j^2}{2 \cdot g} + h_t \quad (3.8)$$

Para encontrar o valor da rugosidade relativa (ε), basta realizar a divisão da rugosidade absoluta pelo valor do diâmetro interno da tubulação, como apresentado na Eq. (3.9)

$$\varepsilon = \frac{e}{D_{interno}} \quad (3.9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Memorial de cálculo

Com base nas informações e características do processo anteriormente mencionadas, pode-se agrupar as principais informações correspondentes aos cálculos realizados como apresentado a seguir.

- Parâmetros de projeto do processo:

Vazão volumétrica da bomba (Q): $58 \text{ m}^3/\text{h} = 0,016111 \text{ m}^3/\text{s}$

Temperatura de entrada no trocador de calor (T_1): 25°C

Temperatura de saída do trocador de calor (T_2): 70°C

- Propriedades aproximadas do fluido (água) (HAYNES, 2014)

Densidade na entrada do trocador de calor (ρ_1): 1000 kg/m^3

Densidade na saída do trocador de calor (ρ_2): $978,51 \text{ kg/m}^3$

Viscosidade na entrada do trocador de calor (μ_1): $0,00089 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Viscosidade na saída do trocador de calor (μ_2): $0,00036 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Considerando, inicialmente, uma velocidade de 3 m/s , calcula-se o diâmetro da tubulação entre os pontos (1) e (2) do diagrama apresentado na Figura 3.1, utilizando a Eq. (3.1). O resultado é apresentado a seguir.

$$D_{1-2} = 0,083 \text{ m} \cong 3,25 \text{ pol.}$$

Com esse valor, é possível determinar o diâmetro nominal comercial da tubulação nesse trecho. Para isso, foi empregado o catálogo da empresa “Special Tubos e Aços” (2024), tendo sido encontrado o valor apresentado na sequência.

$$D_{nominal} = 3,5 \text{ pol.}$$

Considerando que a faixa de variação da pressão da água de enxágue é relativamente baixa, optou-se por escolher o Schedule 40 para definir a espessura da parede do tubo. Assim sendo, o diâmetro interno do tubo é apresentado a seguir.

$$D_{interno} = 90,1 \text{ mm} \cong 0,0901 \text{ m}$$

Assim, utilizando a Eq. (3.1), é possível recalcular a velocidade do fluido entre os pontos (1) e (2) do diagrama apresentado na Figura 3.1. O resultado é apresentado a seguir.

$$v_{1-2} = 2,53 \text{ m/s}$$

Com esses resultados atualizados, calcula-se o número de Reynolds, utilizando a Eq. (3.2).

$$Re_{1-2} \cong 255.000$$

De acordo com **Çengel (2007)**, para esse valor de número de Reynolds, na condição de escoamento no interior de tubos cilíndricos, o escoamento é caracterizado como **escoamento turbulento**.

Uma vez definido o regime de escoamento, é possível calcular a perda de carga localizada por meio da Eq. (3.3).

$$h_s = 1,14m$$

Os tubos foram dimensionados, considerando como material de construção o aço inoxidável. De acordo com **Çengel (2007)**, esse material possui rugosidade (e) de $2 \times 10^{-6} \text{ m}$. Dessa forma, é possível calcular a rugosidade relativa (ϵ) pela Eq. (3.9).

$$\epsilon = 2,22 \times 10^{-5}$$

Assim, com os valores encontrados para o Número de Reynolds e de rugosidade relativa, é possível fazer a leitura do Diagrama de Moody (**ÇENGEL, 2007**) e obter o valor do fator de atrito de Darcy:

$$f = 0,0151$$

Assim, considerando para a aceleração de gravidade (g) o valor de $9,8 \text{ m/s}^2$, calcula-se, por fim a perda de carga distribuída pela Eq. (3.4).

$$h_d = 1,36 \text{ m}$$

Finalmente, a perda de carga total é calculada pelo emprego da Eq. (3.6).

$$h_t = 2,50 \text{ m}$$

Vale destacar que no trecho entre os pontos 1 e 2 não há válvula de controle e consequentemente, não existem perdas devida a este acessório de tubulação.

Esses mesmos cálculos foram repetidos para todos os trechos, sendo que nas ramificações de corrente (pontos 4 e 6), a vazão volumétrica foi igualmente dividida. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1: Resultados dimensionados para cada trecho da tubulação

	Trecho 1-2	Trecho 3-4	Trecho 4-5	Trecho 4-6	Trecho 6-7	Trecho 6-8
Q (m^3/s)	0,0161	0,0161	0,0081	0,0081	0,0040	0,0040
$D_{teórico}$ (m)	0,0827	0,0827	0,0585	0,0585	0,0413	0,0413
$D_{teórico}$ ($pol.$)	3,26	3,26	2,30	2,30	1,63	1,63
$D_{nomin.}$ ($pol.$)	3,5	3,5	2,5	2,5	1,5	1,5
$D_{interno}$ ($pol.$)	0,0901	0,0901	0,0627	0,0627	0,0409	0,0409
v_{trecho} (m/s)	2,526	2,526	2,611	2,611	3,060	3,060
$Re \cdot 10^5$ (-)	2,56	6,19	4,45	4,45	3,48	3,48
Escoamento	turbulento	turbulento	turbulento	turbulento	turbulento	turbulento
$e \cdot 10^{-3}$ (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
$\epsilon \cdot 10^{-5}$ (-)	2,22	2,22	3,19	3,19	4,89	4,89
f (-)	0,0151	0,013	0,0139	0,0139	0,0146	0,0146
h_f ($m.c.f.$)	1,36	1,90	0,50	0,61	1,11	1,11
h_s ($m.c.f.$)	1,14	0,63	1,33	0,62	0,97	0,63
h_t ($m.c.f.$)	2,50	2,53	1,83	1,23	1,30	0,96

Fonte: Autoria própria (2025)

Com esses resultados, calcula-se a pressão em cada trecho do sistema por meio do emprego da Eq. (3.7) aplicada em cada trecho da tubulação. Esse cálculo é fundamental para o correto dimensionamento da bomba centrífuga a ser utilizada. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4.2.

O cálculo deve ser feito do fim para o começo do *layout* do sistema hidráulico em estudo, ou seja, partindo dos valores conhecidos das pressões nos equipamentos e calcular o valor das pressões nos dois pontos de divisão de corrente, a saber: pontos (6) e (4).

A determinação da pressão no ponto (4) do circuito hidráulico é o mais relevante neste procedimento, pois será usado como a base para o dimensionamento da bomba.

Com isso, utilizou-se a Eq. (3.8) no trecho (1) a (2), onde a bomba é instalada (saída do tanque de alimentação), para calcular a **altura manométrica da bomba** (H_B), obtendo:

$$H_B = 12,38 \text{ m}$$

Tabela 4.2: Cálculos de pressão em cada trecho

Trecho	Vazão (m ³ /s)	Velocidade (m/s)	D _{int.} (m)	Z _{final} (m)	Z _{inicial} (m)	P _{final} (kgf/cm ²)	P _{inicial} (kgf/cm ²)
(6) a (8)	0,0040	1,862	0,0525	2,5	4,5	0,00	0,003
(6) a (7)	0,0040	1,862	0,0525	2,5	4,5	0,00	0,33
(4) a (6)	0,0081	2,611	0,0627	4,5	4,5	0,33	2,51
(4) a (5)	0,0081	2,611	0,0627	2,5	4,5	1,00	0,83
(3) a (4)	0,0161	2,526	0,0901	4,5	1,0	2,51	8,30
(1) a (2)	0,0161	2,526	0,0901	1,0	0,1	8,80	0,00

Fonte: Autoria própria (2025)

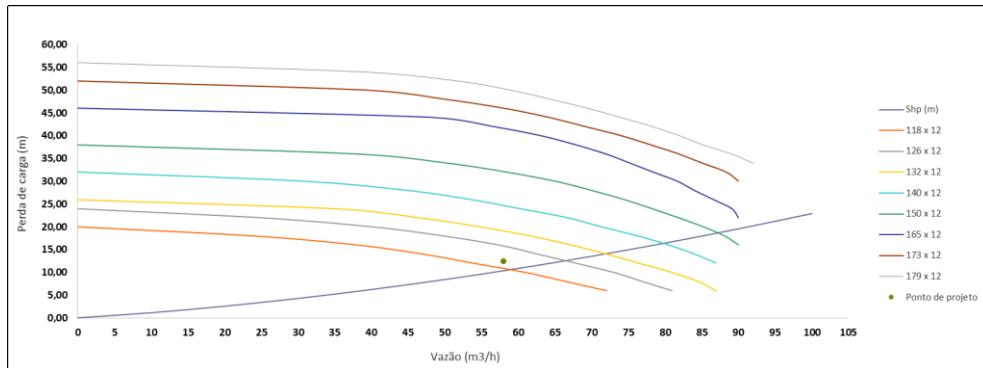
4.2. Cálculo da carga da bomba

Conhecendo a altura manométrica da bomba, escolheu-se um grupo de modelos de bombas no catálogo da empresa “Ebara Bombas” (2024), com base na capacidade de operação e na altura manométrica calculada. A família de bombas escolhida foi o “THL 18 série”.

Feita essa escolha, variou-se a vazão para construir a curva do sistema, de perda de carga em função da vazão. Ao analisar o ponto da vazão considerada no projeto versus altura manométrica da bomba. Para isso basta utilizar a linha de vazão superior mais próxima do ponto encontrado, essa linha será referente ao diâmetro do rotor da bomba. Com isso, o ponto em que a curva do sistema cruza com linha de operação da bomba no diâmetro de rotor traz informações, sendo elas vazão, altura manométrica, rendimento e, por consequência, potência. Essa nova vazão se trata da vazão de operação, que é a vazão que a bomba escolhida pode ser operada para atender as características do sistema.

Para chegar nesses resultados, utilizou-se os dados referentes a família de bombas “THL 18 série” do catálogo da empresa “Ebara Bombas” (2024) em conjunto com a curva do sistema obtido, para plotar no gráfico representado pela Figura 4:

Figura 4.1: Gráfico da curva do sistema x opções de curvas das bombas



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3. Economia de água e insumos

Dessa forma, para determinar as condições ideais de operação visando economia de água e insumos, variou-se o valor da vazão inicial de projeto para analisar o efeito na vazão de operação e potência. Com isso, repetiu-se os mesmos cálculos e análises já feitas. Vale destacar que quanto menor a vazão, menor os gastos com água e insumos e quanto menor a potência, menor o custo de operação com a bomba.

Além disso, sabe-se que para que a limpeza pelo método CIP ocorra de forma satisfatória a velocidade do fluido deve ser, no mínimo, igual a 1,5m/s. Sendo assim, calculou-se a mínima vazão necessária tal que a velocidade do fluido fosse igual a 1,5m/s em todos os trechos, obtendo uma vazão mínima de:

$$Q = 46,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Com isso, variou-se as vazões para analisar o efeito nos parâmetros, obtendo os resultados apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados dos parâmetros em função da vazão de projeto

Vazão de Projeto (m ³ /h)	Vazão de Operação (m ³ /h)	Potência (kJ/h)	Diâmetro do Rotor (mm)
46,7	59	10.426,5	118 x 12
50	59	10.426,5	118 x 12
58	66	13.346,6	126 x 12
60	66	13.346,6	126 x 12
65	72	15.680	132 x 12
70	72	15.680	132 x 12

Fonte: Autoria própria (2025)

Portanto, conclui-se que a vazão de operação que apresenta os melhores resultados de economia de água de enxágue é a vazão mínima, igual a $59\text{ m}^3/\text{h}$.

5. Conclusão

Com base nas análises e estudos desenvolvidos, foi possível perceber a forma como os gastos com insumos e água respondem as variações na vazão do processo. Na vazão de projeto em que o sistema foi dimensionado, de $58\text{ m}^3/\text{h}$, obteve-se uma vazão de operação após a análise da curva do sistema e da bomba escolhida de $66\text{ m}^3/\text{h}$. Para fins de economia de água e insumos, notou-se que quanto menor a vazão, menor o consumo de água e insumos, como consequência, e o gasto energético da bomba também é menor. No entanto, a vazão precisa ser suficiente para que o processo de limpeza ocorra de forma satisfatória em todos os equipamentos. Para isso, considerou-se uma velocidade mínima de escoamento igual a $1,5\text{m/s}$ no interior de todos os equipamentos e calculou-se a vazão de projeto necessária para isso, de $46,7\text{m}^3/\text{h}$. Ainda foram feitos cálculos considerando outros valores de vazão para analisar os gastos de insumos e de energia e concluiu-se que o cenário de maior economia realmente é o cenário de menor vazão. Sendo assim, considerando a curva do sistema e da bomba escolhida, em uma vazão de projeto de $46,7\text{m}^3/\text{h}$, a vazão de operação obtida de maior economia, com desempenho suficientemente satisfatório, foi de $59\text{m}^3/\text{h}$.

REFERÊNCIAS

ARAMOUNI, N.A.K.; STEINER-BROWNE, M.; MOURAS, R.; Application of process analytical technology (PAT) in real-time monitoring of pharmaceutical cleaning process: Unveiling the cleaning mechanisms governing the cleaning-in-place (CIP), *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 177, 2023, Pages 212-222, ISSN 0957-5820, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.010>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023006018>). Acesso em 09 de outubro de 2024

ALCARRIA, G. C. **Simulação da etapa de enxágue de um processo CIP usando modelos acoplados.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos.** São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.

BEGNINI, M. L.; SANTOS, P. M. DOS; CAPUCI, A. P. S. (2024). Processo de limpeza CIP em uma indústria de laticínios. *Revista De Engenharia, TIE Inovação*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.31496/retii.v1i1.1721>. Acesso em 09 de outubro de 2024

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M., **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações.** McGraw-Hill, 2007.

Ebara Bombas, **Catálogo Geral de Curvas 60 Hz**, 141 páginas

GIBSON, H.; TAYLOR, J. H.; HALL, K. E.; HOLAH, J.T. Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms. *Journal of Applied Microbiology*, v. 87, n. 1, p. 41-48, 1999

HAYNES, W. M. (ed.). **CRC Handbook of Chemistry and Physics: a ready-reference book of chemical and physical data.** 95. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

JEURNINK, T. J. M.; BRINKMAN, D. W. The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey. *Dairy Journal*, Ireland, v. 4, p. 347-368, 1994.

MEMISI, N.; MORACANIN, S.V.; MILIJASEVIC, M.; BABIC, J.; DJUKIC, D. CIP Cleaning Processes in the Dairy Industry. *Procedia Food Science*, v. 5, p. 184- 186, Set. 2015.

MOUTINHO, M.E. Sistema de limpeza CIP (Clean In Place) aplicado à planta-piloto de processamento de Aloe Vera. 2022. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

OLIVEIRA, L.C. **Higiene Agroindustrial.** Edição 1, Pelotas- e-Tec/MEC, 2013.

OLIVEIRA, L. R., GEDRAITE, R.; COUTINHO FILHO, U.; KUNIGK, L. **Obtenção de modelo empírico para avaliação da quantidade de insumos gastos em um sistema CIP empregado na limpeza de um sistema de pasteurização de leite.** In:

XV Encontro de Modelagem Computacional e III Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, promovidos pela UERJ, e pela UFU, Uberlândia - MG, 2012.

OLIVEIRA, T. S.; BRASILEIRO, R. G.; COSTA, M. S.; GEDRAITE, R. Economia de água em sistema de limpeza CIP aplicado a uma instalação industrial. Uberaba, 2020. Disponível em: <https://www.uniube.br/eventos/e depa/>. Acesso em: 09 de outubro de 2024.

SILVA, R.H.R.D. da. Higienização em indústrias alimentícias. 2023. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2023. Orientadora: Profª Drª Sharline Florentino de Melo Santos.

SISLIAN, R. Desenvolvimento de indicadores de desempenho para gerenciamento do consumo de água e energia em um sistema Clean In Place. Tese de Doutorado. Unicamp, 2020.

SOARES, D. M. Projeto de Tubulações Industriais. Trabalho de Conclusão de Disciplina, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul-SP, 1999.

Special Tubos e Aços, **Tabela Tubo Schedule NBR-5590 / ASTM-A106 / ASTM-A333 / API-5L**, 6 páginas