

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

NICOLE GOUVEIA ROQUE

**OTIMIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE LAVAGEM DE
REATORES INDUSTRIAIS: Implementação de uma ferramenta organizacional.**

Araraquara

2024

NICOLE GOUVEIA ROQUE

**OTIMIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE LAVAGEM DE
REATORES INDUSTRIAIS: Implementação de uma ferramenta organizacional.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química do Instituto de
Química de Araraquara, da Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do
grau de bacharelado em engenharia
química.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Angélica
Martins Costa

Araraquara

2024

R786o

Roque, Nicole Gouveia

Otimização e padronização dos processos de lavagem de reatores industriais : implementação de uma ferramenta organizacional / Nicole Gouveia Roque. -- Araraquara, 2024

64 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara
Orientadora: Maria Angélica Martins Costa

1. Engenharia industrial. 2. Limpeza. 3. Reatores químicos. 4. Revisão. 5. Lean manufacturing. I. Título.

NICOLE GOUVEIA ROQUE

**OTIMIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE LAVAGEM DE
REATORES INDUSTRIAIS: Implementação de uma ferramenta organizacional.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química do Instituto de
Química de Araraquara, da Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do
grau de bacharelado em engenharia
química.

Araraquara, 11 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARIA ANGELICA MARTINS COSTA**
Data: 19/12/2024 08:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Angélica Martins Costa
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Documento assinado digitalmente
 **ARNALDO SARTI**
Data: 19/12/2024 17:18:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arnaldo Sarti
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Documento assinado digitalmente
 **ELIAS DE SOUZA MONTEIRO FILHO**
Data: 20/12/2024 15:25:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Araraquara
2024

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora do trabalho de conclusão de curso Prof. Dra. Maria Angélica Martins, pelos conselhos e direcionamentos na elaboração do trabalho. Agradeço a UNESP e a toda comunidade acadêmica pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Em seguida, gostaria de agradecer à minha gestora na empresa em que desenvolvi esse projeto Giuliana Pedinotti. Seu apoio bem como sua experiência na área de processos foram fundamentais para enriquecer minha experiência profissional. Gostaria de fazer um agradecimento especial à Solvay e a todos da usina de Clamecy.

Gostaria também de expressar a minha gratidão à minha tutora da escola na França, Prof. Dra. Séverine Camy. Seu apoio e feedback construtivo foram importantes para refinar minhas habilidades de engenharia.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão à organização brasileira CAPES pelo projeto BRAFITEC e pela oportunidade de estudar na França. Assim como a escola ENSIACET por ter me recebido. Foi uma experiência transformadora para mim, que me permitiu descobrir uma cultura e um ambiente acadêmico únicos.

“Eu quero ser tudo que sou capaz de me tornar.”

(Katherine Mansfield, 1918)¹

¹ MANSFIELD, Katherine. *Stories*. Nova Iorque: Vintage Books, 1956. p. viii.

RESUMO

Este trabalho trata da otimização e padronização dos processos de lavagem de reatores industriais em uma indústria química, no contexto de produção multiproduto em batelada e faz uma revisão sobre procedimentos de lavagem e lavagem CIP. A limpeza dos reatores é um processo crítico para evitar contaminações e garantir a qualidade dos produtos. A metodologia utilizada consistiu na análise dos procedimentos de lavagem existentes e na identificação de redundâncias, baseada na metodologia Lean para eliminação de desperdícios. Com isso, foi desenvolvida uma ferramenta organizacional que integra os processos de lavagem em um único documento, facilitando a consulta e a atualização. Essa ferramenta utiliza matrizes de lavagem que associam o produto fabricado e o próximo a ser produzido, e assim, simplifica a identificação do procedimento adequado e reduz o tempo de inatividade. A padronização trouxe benefícios como maior uniformidade na execução das lavagens, isso melhora o desempenho operacional da planta. O trabalho contribuiu para um entendimento sobre como acontece processos de lavagem de reatores na indústria química e a importância desses procedimentos de limpeza. Além disso, o trabalho apresentou uma gestão de processos mais eficiente, alinhada aos princípios de sustentabilidade e à qualidade exigida pela indústria química.

Palavras-chave: padronização; processos de lavagem; reatores industriais; revisão; metodologia Lean.

ABSTRACT

This work is about the optimization and standardization of industrial reactor washing processes in a chemical industry, in the context of multiproduct batch production, and reviews washing procedures and (CIP). Reactor cleaning is a critical process for avoiding cross-contamination and guaranteeing product quality. The methodology used consisted of analyzing existing washing procedures and identifying redundancies, based on the Lean methodology for eliminating waste. As a result, an organizational tool was developed that integrates the washing processes into a single document, making it easier to consult and update.

This tool uses washing matrices that associate the product manufactured with the next one to be produced, thus simplifying the identification of the appropriate procedure and reducing inactivity time. Standardization has brought benefits such as greater uniformity in the execution of washes, improving the plant's operational performance. The work contributed to an understanding of how reactor washing processes take place in the chemical industry and the importance of these cleaning procedures. In addition, the work presents more efficient process management, in accordance with the principles of sustainability and the quality demanded by the chemical industry.

Keywords: standardization; washing processes; industrial reactors; review; Lean methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma do Departamento de Assistência de Processos..	10
Figura 2 - Mapa de limpeza; uma classificação de problemas de limpeza com base no tipo de resíduo e no uso de produtos químicos de limpeza.....	20
Figura 3 - Diagrama esquemático das forças que precisam ser superadas para remoção dos resíduos.....	20
Figura 4 - Os parâmetros TACT.....	23
Figura 5 - Fluxograma do processo de lavagem com IPA realizado no reator K212 após fabricação do produto PX.....	31
Figura 6 - Fluxograma do processo de lavagem com NaOH após fabricação do produto "PY".....	34
Figura 7 - Elementos do 5S.....	36
Figura 8 - Matriz da seção 100 (em detalhe) que ilustra a determinação de uma lavagem.....	41
Figura 9 - Matriz de lavagem da seção 100 - reatores K117 e K118.....	43
Figura 10 - Etapas do processo de melhoria.....	46
Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).....	46
Figura 11 - Ações do PDCA.....	49
Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).....	49
Figura 12 - Fluxograma para a parte da seção do reator K209.....	50
Figura 13 - Fluxograma para a parte da seção do reator K212.....	51
Figura 14 - Fluxograma para a parte da seção dos reatores K117 e K118....	52
Figura 15 - Código comentado sobre a parte desenvolvida para o reator K209.....	54
Figura 16 - Interface do utilizador: Inserir a lavagem anterior.....	55
Figura 17 - Interface do utilizador: visualização do procedimento de lavagem a realizar.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CIP: Clean-in-Place (Limpeza no Local).
- DQO: Demanda química de oxigênio expressa em mg/L.
- FMCG: Fast Moving Consumer Goods (Bens de Consumo de Rápido Movimento).
- IBC: Intermediate Bulk Container é um recipiente de médio porte, de 1000 litros utilizado para armazenar produtos químicos.
- IPA: Isopropanol.
- ISO: International Organization for Standardization (Organização Internacional para Normalização).
- PDCA: Plan (Planejar), Do (Executar), Check (Verificar) e Act (Agir).
- PX: Um produto da fábrica.
- TACT: Parâmetros tais como Temperatura, Ação mecânica, Química e Tempo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Contexto.....	10
1.2. A Solvay.....	11
1.3. Apresentação da fábrica de Clamecy.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. Processos de lavagem.....	13
3.1.1. Indústria química.....	15
3.1.2. Incrustação.....	17
3.1.3. Importância do processo de lavagem.....	18
3.2. Elaboração dos procedimentos de lavagem.....	19
3.2.1. Evolução dos procedimentos de limpeza.....	24
3.3. Processos de lavagem Solvay Clamecy.....	29
3.3.1. Exemplos de Processos de lavagem em Clamecy.....	29
3.4. O método Lean.....	34
3.4.1. O que é.....	34
3.4.2. Aplicação.....	35
3.4.3. Vantagens ao ser aplicado na indústria química.....	38
4. METODOLOGIA.....	39
4.1. A gestão dos processos de lavagem em clamecy.....	40
4.2. Funcionamento na área de fabricação F5.....	40
4.3. Problemas com o formato utilizado.....	44
4.4. Aplicação da metodologia para resolução dos problemas.....	46
5. RESULTADOS e DISCUSSÕES.....	50
5.1. A ferramenta.....	53
6. CONCLUSÃO.....	57
7. BIBLIOGRAFIA.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

O presente trabalho abrange um projeto realizado na Solvay, uma das principais empresas químicas do mundo. O trabalho foi realizado nas instalações da Solvay em Clamecy. Na equipe de Assistência de Processos, cuja organização é apresentada na Figura 1.

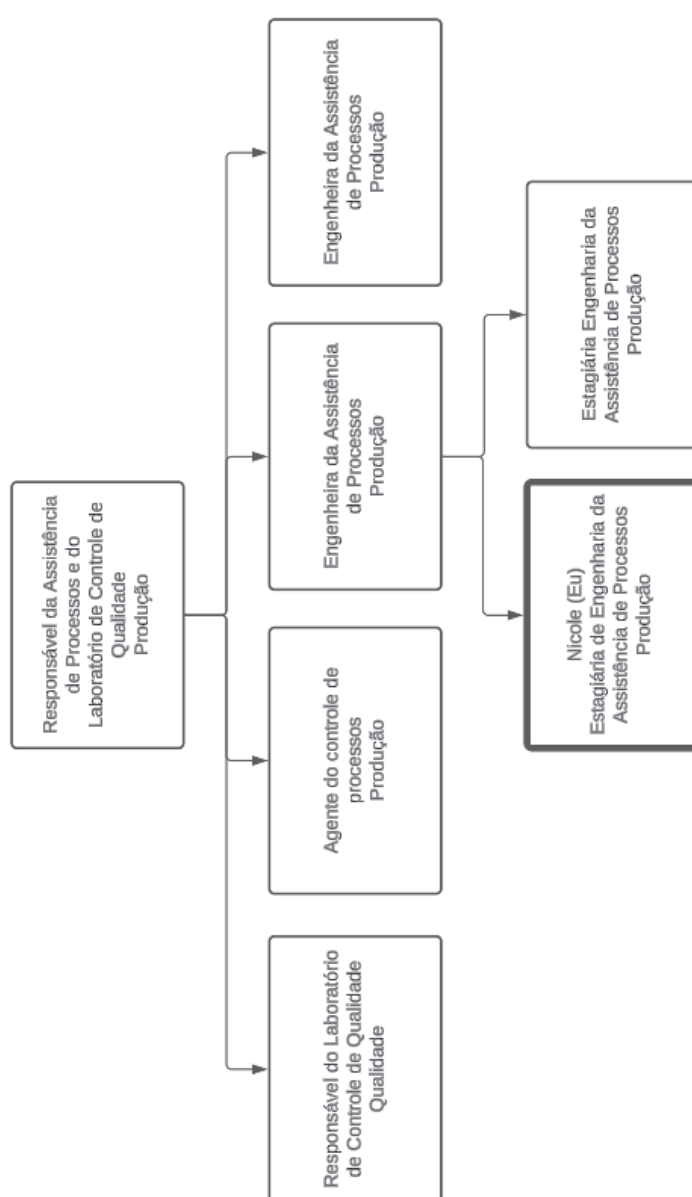


Figura 1 - Organograma do Departamento de Assistência de Processos.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

A Assistência de Processos presta apoio a área de produção. A função é ajudar a gerir e a melhorar os processos. Este Departamento presta suporte técnico e operacional para coordenar, monitorar e melhorar os processos de produção e os métodos de trabalho. O papel do assistente de processo consiste em assegurar o bom funcionamento dos processos na área de produção, elaborar procedimentos operacionais de produção, promover a melhoria contínua na fábrica, resolver problemas, etc.

A assistência de processos também trabalha em conjunto com outros departamentos. Está envolvida na industrialização de novos produtos com as equipas de Pesquisa e Desenvolvimento. Também, algumas das suas atividades implicam a colaboração com a equipa de Projetos nas Instalações. Além disso, a Assistência de Processos pode colaborar com o Laboratório de Controle de Qualidade para acompanhar os ensaios ou garantir a conformidade dos produtos, por exemplo.

1.2. A Solvay

Fundada em 1863 pelo químico belga Ernest Solvay, a empresa emergiu como um pilar da indústria química mundial. Com base nos seus muitos anos de experiência, a empresa estabeleceu uma reputação internacional como um dos principais atores na produção de materiais e produtos químicos avançados. Com presença em mais de 50 países e clientes em todo o mundo, a Solvay distingue-se pelo seu empenho na inovação, no desenvolvimento sustentável e na satisfação dos clientes (SOLVAY, 2023).

Como líder mundial em materiais, produtos químicos e soluções, a Solvay faz o desenvolvimento de produtos para aviões, automóveis, baterias, dispositivos inteligentes e médicos, tratamento de água e ar, para resolver desafios industriais, sociais e ambientais críticos (SOLVAY, 2023).

A Solvay está empenhada em contribuir para um futuro mais sustentável, implementando uma ambiciosa estratégia de desenvolvimento sustentável centrada na redução do seu impacto ambiental, promovendo uma economia circular e fomentando a inovação para responder aos desafios sociais atuais e futuros (SOLVAY, 2023). A empresa opera 10 unidades industriais na França, onde este trabalho foi realizado, com sete centros de Pesquisa e Desenvolvimento e laboratórios de aplicação. Ela emprega

3300 pessoas em todo o país. As vendas na França em 2022 foram de 1,885 milhões de euros (SOLVAY, 2023).

A empresa está atualmente dividida em quatro GBU (Global Business Units ou Unidades Globais de Negócios): "Materiais Avançados", "Químicos de Base", "Negócios e Suporte às Atividades da Empresa" e "Soluções Químicas de Especialidade" (RELATÓRIO ANUAL SOLVAY, 2022).

1.3. Apresentação da fábrica de Clamecy

A unidade de Clamecy pertence à GBU "Soluções Químicas de Especialidade" no segmento "Novecare". Este segmento inclui surfactantes, polímeros naturais e sintéticos, aminas e solventes verdes, por exemplo. Estes produtos são utilizados nos setores alimentício, doméstico, cuidados pessoais, de revestimentos e industrial (RELATÓRIO ANUAL SOLVAY, 2022).

Fundada em 1894 e adquirida pela Solvay em 2011, a unidade de Clamecy ocupa um lugar essencial na rede industrial da Solvay. Situada no coração da região de Bourgogne-Franche-Comté, na França, a unidade é um centro de produção de especialidades químicas (SOLVAY CLAMECY, 2023).

Com uma área de 50 hectares, as instalações de Clamecy possuem uma comunidade dinâmica de mais de 90 funcionários, o que ajuda a torná-lo um centro de excelência para a produção química. Anualmente, o centro produz 25000 toneladas de produtos químicos especializados (SOLVAY CLAMECY, 2023).

A diversidade de atividades no local é realçada pelo manuseio de 350 matérias-primas diferentes, que conduzem à criação de 150 produtos de alta qualidade. O reconhecimento do empenho da fábrica na qualidade e na gestão é mostrado pela sua dupla certificação EFfCI - ISO 9001 (SOLVAY CLAMECY, 2023). Estas normas exigentes atestam a preocupação da Solvay Clamecy na melhoria contínua dos seus processos. E com intuito de manter este padrão de qualidade em termos de gestão e limpeza que o presente trabalho foi realizado.

A eficácia e o rigor logístico são também preocupações fundamentais com 350 entregas e expedições por mês. Esta logística permite a expedição de produtos para diversos destinos, uma vez que mais de 80% da produção é exportada para o exterior.

A fábrica de Clamecy tem três áreas de fabricação: F2, F3 e F5. Este trabalho

centrou-se na área F5, mais especificamente nas seções 100 e 200. Elas possuem quatro reatores com mais de 6 m³, que funcionam em modo descontínuo (batch). O F5 é uma área de fabricação multiprodutos.

Durante o tempo passado na fábrica de Clamecy foi possível acompanhar as produções realizadas e os processos de lavagens após cada produção. Processos de lavagem esses que foram objeto de melhoria por parte deste trabalho. O propósito deste estudo é, primeiramente, fazer uma revisão bibliográfica de como são realizados os processos de lavagem de reatores industriais e, posteriormente, apresentar como funcionam esses processos na fábrica de Clamecy e como uma metodologia foi aplicada para melhor gerir a organização desses processos na fábrica.

2. OBJETIVOS

O objetivo foi desenvolver uma rotina para reunir todos os procedimentos operacionais de lavagem num único documento, facilitar a sua leitura, o seu acesso e a edição. Trata-se, portanto, de um trabalho de aperfeiçoamento dos métodos de trabalho com melhoria contínua. Além disso, fazer uma revisão sobre procedimentos de lavagem.

O propósito era reunir a experiência do responsável da área de fabricação e dos operadores, para resumir e corrigir as discrepâncias entre as instruções do procedimento de lavagem original sugerido pelos pesquisadores, editado pelos engenheiros da Assistência de Processos e a realidade no terreno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processos de lavagem

No meio industrial, os processos de lavagem são essenciais para garantir a segurança e a qualidade dos produtos, especialmente em setores como o alimentício e farmacêutico. Os resíduos de produção e materiais incrustantes podem comprometer o desempenho e a higienização dos equipamentos. A limpeza industrial tem como objetivo remover esses contaminantes, para assim evitar riscos à saúde e contaminações (YANG, 2018).

No projeto dos equipamentos deve-se considerar, tanto a funcionalidade do processo produtivo, quanto a facilidade de limpeza, seguindo normas e diretrizes, como as estabelecidas pela Diretiva de Máquinas 2006/42/EC e os padrões da EHEDG (European Hygienic Equipment Design Group), que fornecem recomendações para os projetos de engenharia de descontaminação de equipamentos industriais. Nos Estados Unidos, os padrões 3-A e ASME BPE orientam o design de equipamentos com exigências específicas de higiene para a indústria alimentícia e bioprocessos (YANG, 2018).

Os sistemas de limpeza automática, conhecidos como "cleaning-in-place" (CIP), são amplamente utilizados, sobretudo em setores como laticínios e cervejarias, onde a limpeza frequente dos tanques e tubulações é necessária (YANG, 2018). Foi encontrado na literatura muitas informações com relação a limpeza CIP na indústria de leite, demonstrando que é um fator crítico neste setor.

Os sistemas CIP podem ser de uso único, em que o meio de limpeza é descartado após o uso, ou de reutilização, onde o fluido de limpeza é recuperado e recirculado. Os sistemas de uso único reduzem o risco de contaminação cruzada, eles são mais caros de operar. Por outro lado, os sistemas de reutilização tendem a ser mais econômicos, mas exigem tanques de armazenamento e infraestrutura adicional. A otimização desses processos é crucial para minimizar o consumo de recursos e os tempos de parada na produção, promovendo maior eficiência e resiliência das instalações (YANG, 2018).

Manter um padrão de excelência na limpeza de reatores industriais é essencial para garantir a excelência do produto final e prolongar a vida útil dos equipamentos. A aplicação de sistemas de gestão como as normas ISO 9001, ISO 14001 e a ISO 45001 fortalece a estrutura organizacional, promovendo a confiabilidade e a eficiência dos processos (CASTILLO-MARTINEZ et al., 2021). A empresa do trabalho em questão possuía tais certificações e por isso presava-se pelo bom funcionamento das atividades de limpeza.

As certificações que garantem a limpeza adequada de fábricas e equipamentos industriais incluem normas que estabelecem padrões para a segurança, a eficiência e a higiene dos processos. Aqui está a apresentação de algumas que se mostraram mais relevantes para apresentar neste trabalho com base na experiência de campo para este estudo e na revisão da literatura:

- ISO 9001 (Sistema de Gestão da Qualidade): Ela estabelece critérios para um sistema de gestão da qualidade eficaz, que garante que os processos sejam consistentes e voltados para a satisfação do cliente. Inclui a manutenção de equipamentos e a limpeza dentro de seus requisitos gerais (CASTILLO-MARTINEZ et al., 2021).
- ISO 45001 (Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional): Procura garantir ambientes de trabalho seguros e saudáveis. Essa certificação aborda práticas que minimizem riscos, incluindo procedimentos de limpeza e descontaminação de áreas e equipamentos (AGUS, et al, 2020).
- ISO 14001 (Sistema de Gestão Ambiental): Essa ISO prioriza a gestão ambiental, e garante que os processos, como a limpeza, minimizem o impacto ambiental. Ela é importante para evitar a contaminação do meio ambiente com resíduos ou produtos de limpeza (CASTILLO-MARTINEZ et al., 2021).

Essas certificações ajudam a padronizar procedimentos de limpeza, e assegurar que eles sejam seguidos corretamente. Assim evitar contaminações, problemas de saúde e impactos ambientais negativos. As normas apresentadas ajudam na melhoria contínua, e tornam as empresas mais competitivas e sustentáveis (CASTILLO-MARTINEZ et al., 2021).

3.1.1. Indústria química

Na indústria química, a produção ocorre de forma variada dependendo do produto final e da sua demanda. No mercado de cosméticos, produtos químicos especializados e farmacêuticos, geralmente a produção ocorre na forma de batelada (GRUNDEMANN et al., 2012). Como é o caso do tipo de produção da empresa em questão, a Solvay, que faz especialidades químicas em processos em batelada e também sob demanda. Geralmente nesse tipo de indústria tem-se uma gama de produtos variados, conforme o mercado determina, o que acontece rapidamente.

O tipo de produção em batelada é comum em fábricas multiprodutos e quando se fabrica em pequenas e médias quantidades devido ao investimento e

custos de operação que tem uma dinâmica diferente de outros tipos de fábricas (GRUNDEMANN et al., 2012).

Nas fábricas de multiprodutos após cada lote o equipamento deve ser totalmente limpo e até mesmo esterilizado dependendo das necessidades de padrão da qualidade (GRUNDEMANN et al., 2012). Por exemplo, na planta de Clamecy, em um mesmo reator pode ser produzido matérias primas para fertilizantes seguido de matéria-prima para shampoo. Isso é feito tomando as devidas precauções. Mas o fato de ser necessário intercalar cada produção a limpeza do reator implica na utilização de grandes quantidades de água e produtos de limpeza, provocando impactos ambientais que devem ser considerados.

Por isso há uma preocupação maior desse tipo de indústria em otimizar essa etapa e minimizar danos ao meio ambiente, além de melhorar o desempenho da planta. Segundo Grundemann (2012), isso pode ser feito, por exemplo, melhorando a performance da solução de limpeza, mudando a matéria-prima e/ou melhorando o planejamento da produção.

O planejamento da produção em uma fábrica multiprodutos pode ser uma atividade complexa. Já que vai depender do tempo do processo, da química do produto e da prioridade das entregas dos lotes. Fabricar polímeros por exemplo pode trazer alguns desafios.

Especificamente, a produção de polímeros é uma atividade importante nas indústrias químicas. Os polímeros representam um dos principais produtos fabricados na unidade da Solvay em Clamecy. A incrustação em reatores de polimerização é um problema comum na indústria química, por exemplo, na produção de látex, tintas, revestimentos, borrachas e adesivos que são produzidos a partir de polimerização por emulsão (URRUTIA; ASUA, 2021).

O processo de polimerização por emulsão, envolve a polimerização de monômeros em um ambiente com mais de uma fase, e assim, pode ocorrer a formação de coágulos de polímero, que são aglomerados que não fazem parte do produto final desejado. Isso ocorre devido à perda de estabilidade coloidal das partículas de polímero, que pode ser influenciada por fatores como interações eletrostáticas, forças de Van der Waals e efeitos modificados por surfactantes iônicos. A presença de superfícies ásperas no reator pode favorecer a deposição

desses coágulos, que atuam como núcleos para novas formações de polímero, agravando a incrustação (URRUTIA; ASUA, 2021).

3.1.2. Incrustação

O fenômeno da incrustação ocorre quando substâncias presentes no fluido, como sais, partículas, microrganismos ou produtos de corrosão, se depositam na superfície do equipamento. Forma-se uma camada que dificulta a transferência de calor e pode causar danos estruturais ao longo do tempo. Ela é definida como o acúmulo indesejado de materiais sólidos na superfície de equipamentos, como trocadores de calor, tubulações e reatores. Ela resulta na redução de eficiência térmica e aumento de resistência ao fluxo (IBRAR et al., 2019).

Há diferentes mecanismos que formam incrustações, depende da natureza dos precursores e das condições operacionais. Tais mecanismos são divididos em cinco categorias principais: bioincrustação, incrustação por reação química, incrustação particulada, incrustação por cristalização e incrustação por corrosão. Esse funcionamento ocorre de forma isolada ou interage entre si, assim o controle da incrustação fica ainda mais complexo (IBRAR et al., 2019).

A bioincrustação é causada pelo crescimento de biofilmes formados por microrganismos e substâncias orgânicas. A incrustação por reação química ocorre quando os produtos de reações químicas, como a oxidação de substâncias, formam depósitos na superfície. O resultado do acúmulo de partículas suspensas no fluido é chamada de incrustação particulada. Quando envolve a precipitação de sais dissolvidos, em que forma-se depósitos na superfície, acontece incrustação por cristalização. Esse fenômeno ocorre quando há supersaturação no fluido reacional, ou seja, quando a concentração de uma substância ultrapassa o limite de solubilidade, levando à formação de cristais. Por fim, dizemos incrustação por corrosão, quando os produtos gerados pela corrosão do material metálico se acumulam e cria-se uma camada (IBRAR et al., 2019).

Compreender os mecanismos de incrustação é fundamental para determinação das causas principais de deposição e seleção de técnicas de mitigação adequadas. Por exemplo, ter o conhecimento de que o biofilme começa

com a formação de uma camada de pré-condicionamento possibilita a adoção de medidas preventivas para retardar a adesão dos microrganismos (bioincrustação). No que diz respeito à incrustação por cristalização, se atentar às características da água como: dureza, íons dissolvidos, pH, etc, ajuda a diminuir a formação de depósitos (IBRAR et al., 2019).

A prevenção da incrustação necessita estratégias de controle que vão além de abordagens convencionais, como o uso de biocidas ou aditivos químicos. Fazer o monitoramento contínuo das condições operacionais, a aplicação de técnicas de previsão de incrustação, a escolha das matérias-primas e dos agentes de limpeza possibilitam intervir antes que o problema piore (IBRAR et al., 2019). Métodos inovadores, como o uso de sensores inteligentes e técnicas de aprendizado automático, também são promissores para otimizar a detecção precoce e impedir ou retardar os mecanismos de incrustação (JIN et al, 2025).

3.1.3. Importância do processo de lavagem

A incrustação acontece em reatores de diferentes volumes, ela pode causar interrupção na produção, aumentar os tempos de ciclo de produção e diminuir o rendimento (URRUTIA; ASUA, 2021). Por isso, é importante dar atenção ao problema da incrustação e se atentar não só ao processo de produção como também ao processo de limpeza dos reatores industriais.

A limpeza de equipamentos e reatores na indústria química é o que reforça a segurança do produto, a qualidade e a eficiência operacional. Processos regulares de limpeza ajudam a prevenir a contaminação e reduzem o tempo de inatividade. Além disso, a atenção à etapa de limpeza dos reatores minimiza o consumo de recursos como água e energia (MAUERMANN et al., 2024).

O sucesso de um negócio de bens de consumo de movimento rápido (FMCG), por exemplo, depende majoritariamente da qualidade do produto e da conformidade com a segurança em um nível exigido. A má conformidade com a limpeza ou higiene é resultado de camadas de incrustação acumuladas em uma planta ou outros problemas de gestão da produção, das equipes e dos processos de lavagem (GOODE et al., 2013).

Os métodos automatizados, como sistemas de limpeza no local (CIP), são frequentemente utilizados para otimizar a remoção de resíduos e depósitos em superfícies de contato, e são bastante usados em fábricas alimentícias. Empregar dispositivos de limpeza adaptáveis e técnicas de otimização de procedimentos pode reduzir significativamente o tempo de limpeza e o uso de recursos, sem comprometer a eficácia da operação (MAUERMANN et al., 2024).

3.2. Elaboração dos procedimentos de lavagem

É relevante falar sobre os tipos de depósitos que ocorrem, para a partir dessa metodologia propor as limpezas pertinentes. Os depósitos podem ser classificados em três tipos. Depósitos do tipo 1 que engloba fluidos viscoelásticos ou viscoplásticos. Essas formas de depósito acontecem na produção de iogurte e pasta de dente, por exemplo. Depósitos do tipo 2 que compreende filmes microbianos e em forma de gel. Como por exemplo, biofilmes e polímeros. Ou do tipo 3 que são depósitos sólidos e coesivos formados durante o processamento térmico. Tais tipos de depósitos surgem na pasteurização do leite e na evaporação do mosto na fabricação de cerveja, por exemplo (GOODE et al., 2013). Essa é uma classificação interessante, pois com ela podemos vincular a natureza do incrustante aos problemas de limpeza.

Seguindo essa classificação por tipo, Fryer e Asteriadou (2009) elaboraram um diagrama que mostra o tipo de limpeza a ser empregado em função da complexidade de limpeza da superfície e, assim, traz uma ideia dos custos relacionados e do impacto ambiental. A parte destacada em vermelho mostra os principais tipos de depósitos difíceis de limpar. O diagrama está apresentado na Figura 2.

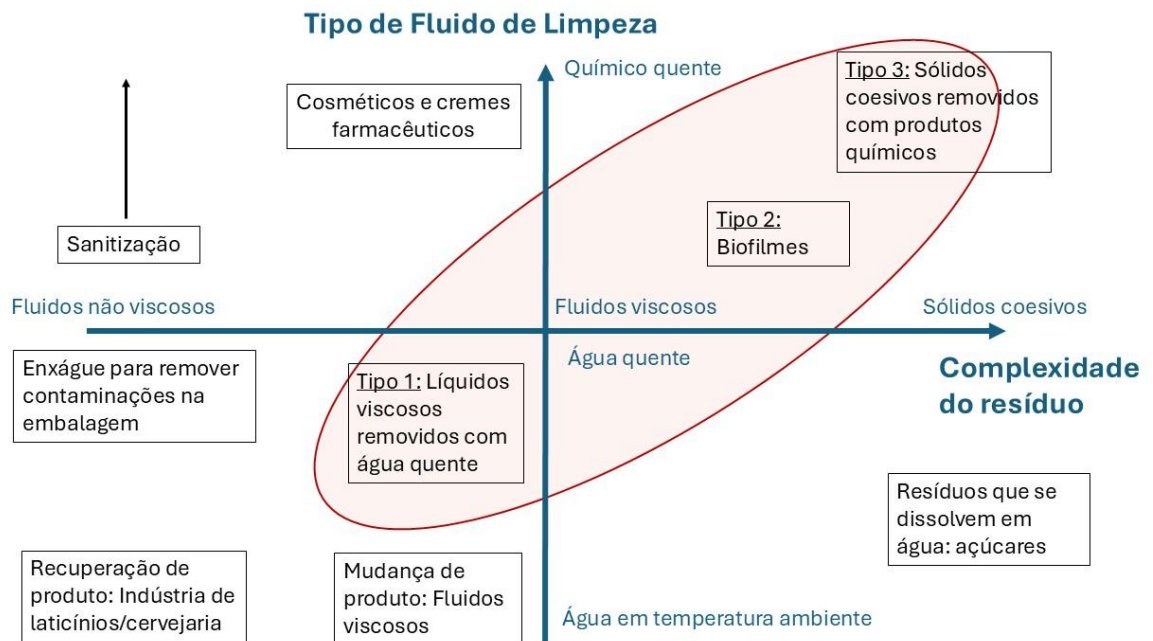


Figura 2 - Mapa de limpeza; uma classificação de problemas de limpeza com base no tipo de resíduo e no uso de produtos químicos de limpeza.

Fonte: Adaptado de Fryer e Asteriadou (2009).

Além disso, Fryer e Asteriadou (2009) propuseram uma classificação por mecanismos de limpeza. A limpeza envolve forças físicas e químicas. A limpeza deve superar as forças coesivas que unem o material e as forças adesivas entre o depósito e a superfície. Para realizar a limpeza pode-se utilizar a ação do fluido ou por efeitos combinados fluido e químico. A Figura 3 ilustra as forças que precisam ser superadas.

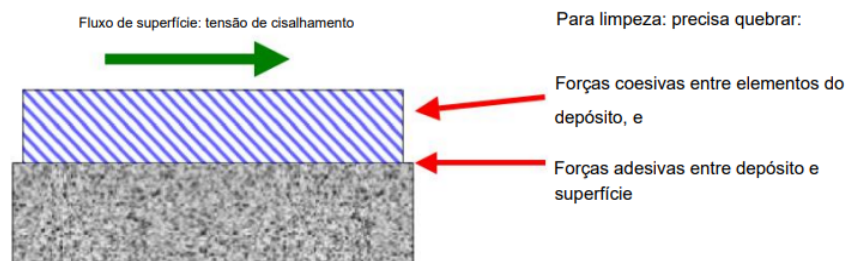


Figura 3 - Diagrama esquemático das forças que precisam ser superadas para remoção dos resíduos.

Fonte: Adaptado de Fryer e Asteriadou 2009.

Os mecanismos de limpeza para depósitos podem ser classificados em duas categorias principais: remoção mecânica por fluido e remoção por difusão-reação. A remoção mecânica por fluido é aplicada a depósitos que podem ser eliminados apenas pela ação de forças físicas do fluido. Por exemplo, o escoamento de jatos ou o fluxo através de tubulações. As variáveis que controlam isso dependem das propriedades reológicas do depósito, do fluido de limpeza, e também das características de escoamento, como a força de cisalhamento aplicada. A eficácia do processo depende da dinâmica de fluidos bifásicos. Ao longo do tempo, ela pode ser influenciada por mudanças na reologia do depósito, por conta do envelhecimento ou difusão de água (FRYER E ASTERIADOU, 2009).

A remoção por difusão-reação acontece quando a ação mecânica não é suficiente, então, utiliza-se agentes químicos para transformar o depósito em uma forma removível. Tal processo pode implicar tanto a dissolução, falha coesiva (ruptura interna do depósito) ou falha adesiva (separação do depósito da superfície). O controle é influenciado pela transferência de massa, taxa de difusão do agente químico no depósito, cinética da reação. Também pelo impacto das reações nas propriedades físicas dos depósitos. Observa-se inchaço ou retração em presença de substâncias específicas (FRYER E ASTERIADOU, 2009). Essas classificações colocam em evidência que a limpeza envolve superar forças coesivas e adesivas, com mecanismos que variam conforme as condições de operação, tipo de depósito e agentes químicos utilizados.

Apesar de podermos estimar o tipo de depósito que vai ocorrer com base no processo realizado e compreender os mecanismos de incrustação, é impossível saber exatamente o quão sujo um equipamento estará após uma fabricação (GOODE et al., 2013). Sobretudo porque desvios podem ocorrer ao longo de uma reação, por exemplo. Dentro de um mesmo processo já é complicada essa predição, se tentamos fazer isso baseado em como outra planta limpa seu equipamento fica ainda mais difícil identificar a melhor maneira de limpar. A definição dos protocolos de limpeza muitas vezes não podem ser feitas de maneira direta (GOODE et al., 2013).

Na prática industrial, os protocolos são elaborados com base em abordagens semi-empíricas. Isso significa que, em vez de depender apenas de princípios teóricos ou de dados experimentais isolados, o desenvolvimento é feito com base

em uma mistura de fundamentos científicos e ajustes baseados na experiência prática ou nos resultados de testes. Na indústria, essa abordagem é usada para criar soluções que funcionem na prática, mesmo que não sejam totalmente explicadas pela teoria (GOODE et al., 2013).

Há evidências claras de que diferentes tipos de depósito são removidos de superfícies de forma diferente. Porém, a metodologia a ser seguida para limpeza é normalmente a mesma (GOODE et al., 2013). De acordo com Goode et al., 2013, ela ocorre em 5 etapas: pré-enxágue, detergência, enxágue intermediário, desinfecção e enxágue final.

1. Pré-enxágue: É a etapa em que ocorre a recuperação do produto que restou, remove-se a sujeira e resíduos ligados de maneira tênue;
2. Detergência: Essa aplicação detergente pode ser alcali ou ácida, ou uma combinação dos dois. Serve para remover as camadas de incrustação. Pode ainda ser feita com outros produtos químicos.
3. Enxágue intermediário: Age para remover os produtos químicos aplicados nas etapas anteriores;
4. Etapa de higienização: Também chamada de etapa de desinfecção. Essa etapa pode ser química, térmica, ou uma combinação de ambos agentes. Essa etapa só é feita após todo o depósito de incrustação ter sido eliminado. Ela servirá para matar microrganismos patogênicos e restaurar a condição higiênica do sistema.
5. Enxágue final com água: Etapa finalizadora para que o produto possa ser reintroduzido no sistema.

Pode-se utilizar dessa base para poder trabalhar na elaboração dos protocolos de limpeza com uma abordagem da análise dos parâmetros a serem otimizados. Essa abordagem utiliza os parâmetros TACT ou também conhecidos como o círculo de Sinner que está representado na Figura 4.

Os parâmetros TACT são padrões utilizados para otimizar processos de limpeza, especialmente em sistemas de CIP (Clean-in-Place). A sigla em inglês TACT representa quatro fatores essenciais: Tempo, Ação mecânica, Química e Temperatura. O tempo refere-se à duração do processo de limpeza, enquanto a

ação mecânica corresponde à força ou movimento empregado para remover os resíduos, como o fluxo do líquido de limpeza. A química diz respeito à concentração e ao tipo de agentes químicos utilizados, e a temperatura se refere ao nível de calor do líquido de limpeza. A combinação adequada desses parâmetros garante uma limpeza eficiente e segura (JIN et al, 2025).

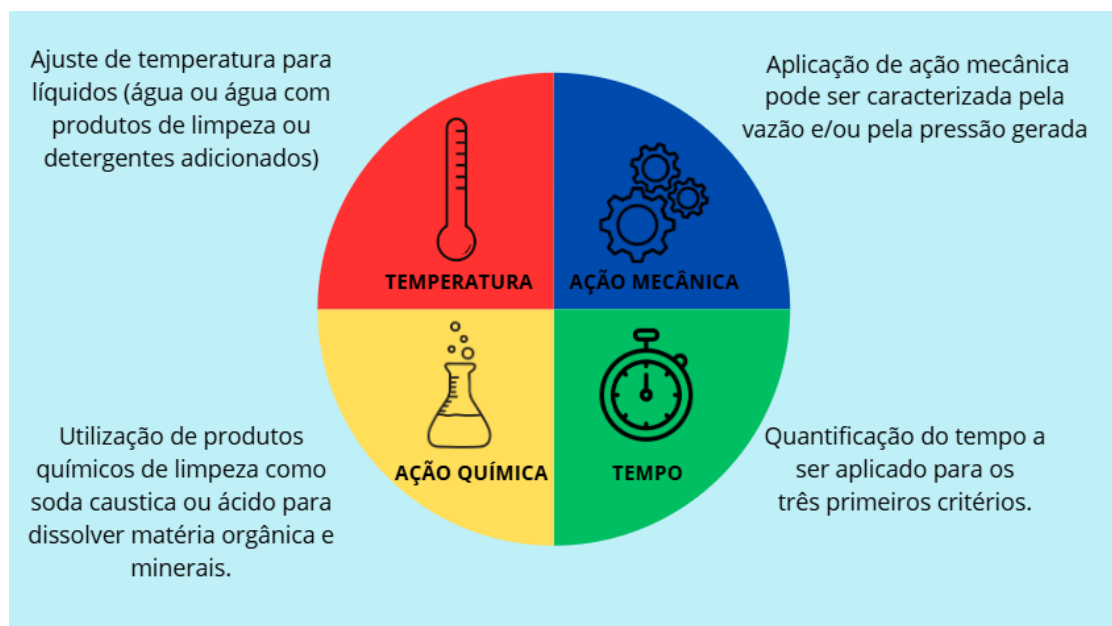


Figura 4 - Os parâmetros TACT.

Fonte: Adaptado de JIN et al, 2025.

A taxa e a extensão da incrustação e da limpeza podem ser classificadas também em termos de fluxo de fluido, pelo número de Reynolds ou pela tensão de cisalhamento da superfície. A verificação desses parâmetros permite compreender o comportamento de remoção da incrustação. Quando a solução de limpeza não é a água fica mais difícil de fazer a análise em termos de velocidade (GOODE et al., 2013).

Segundo Goode et al. (2013) para depósitos do tipo 1, o efeito do fluxo da solução de limpeza é importante já que o tempo de limpeza nos experimentos realizados para diferentes depósitos do tipo 1 diminuíram com o aumento da velocidade de fluxo, pois, aumenta a taxa de remoção com maior tensão de cisalhamento aplicada. A limpeza desses depósitos também se relaciona com o número de Reynolds diminuindo o tempo de limpeza. Aplicar uma temperatura de

limpeza intermediária (até 50 °C) já é suficiente para ajudar na limpeza (GOODE et al., 2013).

Para depósitos do tipo 2, diferentes parâmetros principais de limpeza não seguiam um comportamento definido. A remoção dos resíduos dependia principalmente do tempo de envelhecimento microbiano na superfície. O tempo de contato da solução de limpeza com o resíduo foi um fator primordial, o fluxo e a temperatura impactam mais no início do processo de limpeza. Para depósitos do tipo 2 a solução de NaOH é útil aliada a acessórios que realizam ação mecânica (GOODE et al., 2013).

Para depósitos do tipo 3, especificamente proteínas, uma concentração ótima de NaOH foi encontrada em vários estudos onde o excesso de material químico causa a formação de um depósito de difícil remoção. No entanto, o aumento da tensão de cisalhamento da parede e da temperatura foram mais benéficos para a limpeza (GOODE et al., 2013).

Nos estudos realizados por Goode et al., (2013) pode ser percebido que para verificar o resultado final da limpeza, o método principal é a visualização da superfície e tubulações limpas. Outros métodos podem ser: MSS, sensor de superfície mecatrônico; MHFS, sensor de fluxo de calor de microfólio; espectrometria; turbidimetria ou DQO, análise da Demanda Química de Oxigênio das águas de lavagem. Além disso, a qualidade dos produtos fabricados após a limpeza mostrará a eficácia da lavagem. Se houver um problema de contaminação, sabemos que houve um problema na limpeza do reator, principalmente se forem encontrados traços da produção anterior.

3.2.1. Evolução dos procedimentos de limpeza

A limpeza no local (CIP) é uma técnica amplamente utilizada na higienização de equipamentos de processamento de alimentos. Consiste na aplicação de sequências de enxágue com água e agentes de limpeza para lavar e desinfetar as superfícies internas dos equipamentos, sem a necessidade de desmontagem (HU et al., 2025). Na CIP os equipamentos de produção são limpos diretamente dentro de um circuito fechado (JIN et al, 2025). Dessa maneira, o tempo de higienização é

menor, diminui os riscos de danos aos equipamentos (HU et al., 2025) e reduz a exposição dos operadores a substâncias químicas e possíveis riscos.

A limpeza CIP é bastante utilizada no século XXI, principalmente com a tendência de automatização das atividades em diversos setores, mas é uma metodologia de limpeza que surgiu na década de 1950 como mostram registros de Kaufmann em 1955, em que trata da utilização da metodologia na indústria alimentícia de leite nesta época.

O que acontece na atualidade é que os sistemas CIP se transformam nos chamados CIP inteligentes. Estes novos sistemas de limpeza em ciclos fechados contém tecnologias avançadas como automação e bigdata. A informatização e a digitalização do CIP são impulsionadas pela incorporação inovadora da tecnologia integrando conhecimento e dados para automação do CIP (JIN et al, 2025).

O sistema inteligente de CIP utiliza diferentes sensores para monitorar os parâmetros TACT, como vazão, pressão, temperatura, concentração e tempo, por meio de um protocolo. Essas informações constituem a base do modelo desenvolvido (JIN et al, 2025).

Com relação aos agentes de limpeza, segundo Chew (2005), três agentes de limpeza importantes para remover incrustações de reatores de polimerização eram MEK (metil etil cetona), NaOH (hidróxido de sódio) e TPU (mistura aquosa de limpeza comercial). Para dois copolímeros de poliestireno estudados por Chew dois comportamentos diferentes foram observados com esses agentes: somente o NaOH não conseguiu remover completamente o material incrustado, no caso do uso do MEK o material incrustado inchou e se dissolveu completamente e, para o TPU, o material se desprende após inchar significativamente.

i. Processos obsoletos

Perka et al. (1993) fizeram um estudo em 26 reatores batelada que durou um ano. Naquele tempo, o estudo mostrou que, em média, a quantidade de solvente necessária para a limpeza de um único recipiente correspondia ao dobro do respectivo volume do recipiente. Os processos de limpeza obsoletos da indústria

química tendem a apresentar desvantagens significativas em termos de eficiência, segurança e sustentabilidade. Antigamente, muitas operações utilizavam métodos manuais e químicos altamente corrosivos. Isso envolvia produtos químicos agressivos, elevadas temperaturas e longos tempos de limpeza para remover resíduos. Esses métodos, embora removessem os resíduos, apresentavam alto consumo de água e produtos químicos. Métodos antigos diminuam a vida útil das instalações, pois, degradavam o equipamento devido à corrosão. E também eram vilões para o meio-ambiente (YANG, 2018).

A falta de automação e controle em tempo real nesses processos resultava em consumo excessivo de recursos e maior probabilidade de falhas. Não havia monitoramento com precisão das variáveis de limpeza, como temperatura e concentração química. Por exemplo, muitas vezes, as metodologias tradicionais falhavam em lidar de maneira adequada com biofilmes e depósitos complexos. Estes exigiam soluções mais sofisticadas para serem removidos completamente (YANG, 2018).

Era utilizado com frequência, nos processos antigos, abordagens padronizadas para diferentes tipos de sujidade, sem levar em consideração a complexidade e a natureza específica dos depósitos presentes. Isso não apenas aumentava o tempo de inatividade dos equipamentos, mas também elevava os custos operacionais e os riscos de contaminação cruzada. Com o avanço das regulamentações e as crescentes preocupações ambientais, essas práticas foram sendo substituídas por métodos mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente (YANG, 2018). Há, por exemplo, registro segundo Grundemann et al. (2012) que outros métodos diferentes para se livrar da incrustação em equipamentos eram testados como o ultrassom.

ii. Processos atuais

Os processos da indústria química, nos últimos anos, evoluíram de maneira considerável com a introdução de sistemas automatizados e métodos sustentáveis. Como é o caso da tecnologia de Clean-in-Place (CIP) inteligente. Segundo Jin et al., 2025, CIP inteligente trata-se de um sistema automatizado que utiliza tecnologias

avanzadas, como gêmeos digitais (representações virtuais de objetos, processos, e sistemas), big data (grandes volumes de dados gerados em alta velocidade e de diversas fontes) e automação, para otimizar o processo de limpeza em instalações industriais. Ele monitora em tempo real parâmetros críticos e compara dados reais com modelos padrão. Assim, há uma execução precisa e rastreável da operação de limpeza. Tal sistema registra e analisa informações automaticamente, isso proporciona ajustes contínuos e redução de erros.

Métodos automatizados como este fazem com que não seja necessário desmontar os equipamentos, e utilizam um fluxo controlado de soluções de limpeza que são recirculadas por todo o sistema. Também, monitoram em tempo real os parâmetros como pH, condutividade e turbidez, bem como melhora a precisão e a eficácia da limpeza. Isso garante que os resíduos sejam removidos de forma eficiente sem excessos de produtos químicos ou consumo de água (YANG, 2018).

Outras inovações são o uso de enzimas, como novidade, ou uso de água eletrolisada, que envolve a aplicação de uma solução obtida pela eletrólise da água, rica em agentes oxidantes como hipoclorito e peróxido de hidrogênio, para desinfetar e remover resíduos de forma eficiente. Fazer a limpeza com enzimas traz a possibilidade de remover os depósitos em condições menos agressivas. Tanto as temperaturas utilizadas no processo são menores quanto à concentração química, o que contribui para a sustentabilidade. A água eletrolisada funciona como um agente desinfetante eficaz. Esta reduz o risco de corrosão e toxicidade associada a desinfetantes convencionais. Avanços como esses, combinados com o uso de sensores modernos para monitoramento contínuo, tornaram os processos de limpeza mais eficientes e ambientalmente amigáveis, além de minimizar os custos e o tempo de inatividade (YANG, 2018).

Algo que não é novidade, mas que vale destacar que continua sendo utilizada é a limpeza ácida. A limpeza é um procedimento industrial comum que visa eliminar depósitos inorgânicos formados nos equipamentos metálicos. Esses depósitos reduzem a eficiência de operação do equipamento. Para isso utiliza-se ácido mineral diluído. Foi verificado na literatura que a solução HCl a 2% + NaCl a 3,5% é uma solução típica usada para limpeza ácida industrial atualmente e é usada em reatores SS316L de aço inoxidável (ADAMAA et al., 2022).

A solução auxilia na retirada de resíduos do reator porém também corroi o mesmo devido à ação dos íons cloreto. Enquanto acontece a descalcificação da superfície do metal, também acontece uma corrosão ácida no material subjacente. Esse efeito é intensificado pela utilização de água do mar na preparação das soluções ácidas, pois a água do mar contém altos níveis de íons cloreto, como o NaCl (ONYEACHU et al, 2020). Para contornar isso, normalmente, inibidores são propostos para adicionar a solução de limpeza. Adamaa et al. (2022) provou que a adição de um inibidor como o 1-benzilimidazol em 1000 ppm possibilita mais de 70% de inibição da corrosão do reator.

Para além da utilização de químicos, uma novidade e tendência do mercado atual de limpeza são tecnologias que empregam métodos mecânicos sofisticados. Quer dizer a ação mecânica realizada por meio de vários acessórios empregados estrategicamente diretamente dentro dos reatores e direcionados estatisticamente em áreas mais críticas (WANG, 2020).

Para se dar um exemplo de um equipamento com ação mecânica mais utilizado nos últimos tempos pode-se falar dos jatos. Essa tecnologia utiliza a energia cinética da água pressurizada. A pressão deste jato pode ser regulada em função das necessidades da limpeza. Os parâmetros a serem avaliados são: velocidade, pressão ideal do jato de água, a vazão do jato de água e a faixa de velocidade do bico nas condições de trabalho correspondentes. Os fatores que influenciam na eficiência da limpeza são a pressão do jato, distância do alvo, ângulo de impacto e frequência de limpeza (WANG, 2020).

Na indústria química, para a limpeza de reatores de polimerização, o mais comum é a utilização do jato de água de alta pressão, pois ele age mais intensamente rompendo a estrutura das incrustações. Geralmente, com uma bomba de pistão aumenta a pressão da água transformando em um jato de alta velocidade. Ele usa a energia cinética da água pressurizada para remover as incrustações e tem como vantagem o baixo custo, alta taxa de limpeza (+90%), não danifica o equipamento e não gera poluição. Além de reduzir os riscos à segurança, pois o operador não precisa entrar no reator (WANG, 2020).

3.3. Processos de lavagem Solvay Clamecy

No trabalho feito na fábrica da Solvay em Clamecy, identificou-se diversos procedimentos de lavagem, todos estes muito importantes para a limpeza e manutenção dos reatores industriais. Cada tipo de lavagem é escolhido de maneira cuidadosa de acordo com o produto anteriormente feito no reator. Para garantir que o equipamento esteja preparado de maneira adequada para o próximo ciclo de produção. Entre os tipos de lavagens existentes, estão lavagens com refluxo utilizando água reciclada ou água nova, lavagem com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), e processos específicos como a lavagem com soda a 0,5%, e também procedimentos de passivação. Tais variações se dão ao fato das necessidades de segurança e da eficiência na remoção de resíduos, a fim de prevenir contaminações cruzadas e garantir a qualidade dos produtos.

Há uma variação de maneira significativa no tempo de execução de cada lavagem. Vai depender do método e dos materiais utilizados. Por exemplo, as lavagens com refluxo de 4000 L de água reciclada, podem levar até 11 horas para finalizarem, já uma lavagem com refluxo de 12000 L de peróxido pode levar 23 horas. Também há procedimentos mais rápidos, como o enxaguamento com lança de água quente (jato de água quente), que leva cerca de 0,5 hora. Este é o caso quando é necessário apenas descolar placas de resíduos de produto ou matéria-prima coladas nas paredes do reator. Tais tempos diferentes mostram a complexidade e a intensidade de cada método. A escolha do procedimento apropriado é primordial para otimizar o tempo de inatividade dos reatores de maneira a não comprometer a eficiência da limpeza.

3.3.1. Exemplos de Processos de lavagem em Clamecy

a. Procedimento de lavagem com IPA em Clamecy

Para explicar um processo de lavagem realizado na fábrica, será apresentado um procedimento de lavagem após a fabricação do produto “PX”. Uma vez fabricado o PX, o reator deve ser lavado durante 16 a 24 horas, dependendo do material do reator que ocorreu a reação. Este produto é fabricado em média duas vezes por mês. A lavagem gera 8.000 L de efluentes por lavagem, ou seja, cerca de 200.000 L por ano, se não

houver uma preparação por parte da gestão dos procedimentos de lavagem nas instruções de reaproveitamento (reciclagem das águas de lavagem) e correta etiquetagem dos IBCs.

O produto PX é fabricado em dois reatores diferentes: esmaltado (reator K209) e aço inoxidável (reator K212). Por razões de compatibilidade de materiais, as lavagens não são as mesmas, mas geram a mesma quantidade de efluente. A lavagem no reator K212 consiste em carregar 1600 kg de IPA (Isopropanol), agita-se e mantém o refluxo a 80°C durante 1 hora. Em seguida, uma solução com 50 kg de carbonato de sódio com 7 IBCs de água é preparada no reator (0,71% w/w) para refluxo durante 3 horas. Por fim, uma lavagem com água desmineralizada (2000 kg) e refluxo durante 30 minutos é feita para remover vestígios de sais básicos.

No reator K209, o procedimento é parecido, mas o refluxo com IPA é realizado durante 2 horas e o carbonato não é utilizado porque o reator esmaltado não é compatível com o carbonato de sódio. A seguir, na lavagem do K209, uma maior quantidade de água desmineralizada é usada e é aplicado um tempo mais longo para efetuar a lavagem (4000 kg de água durante 2 horas).

Abaixo, na Figura 5 está apresentado o Fluxograma deste processo de lavagem do PX no reator K212. Este Fluxograma representa um procedimento típico de lavagem nesta fábrica.

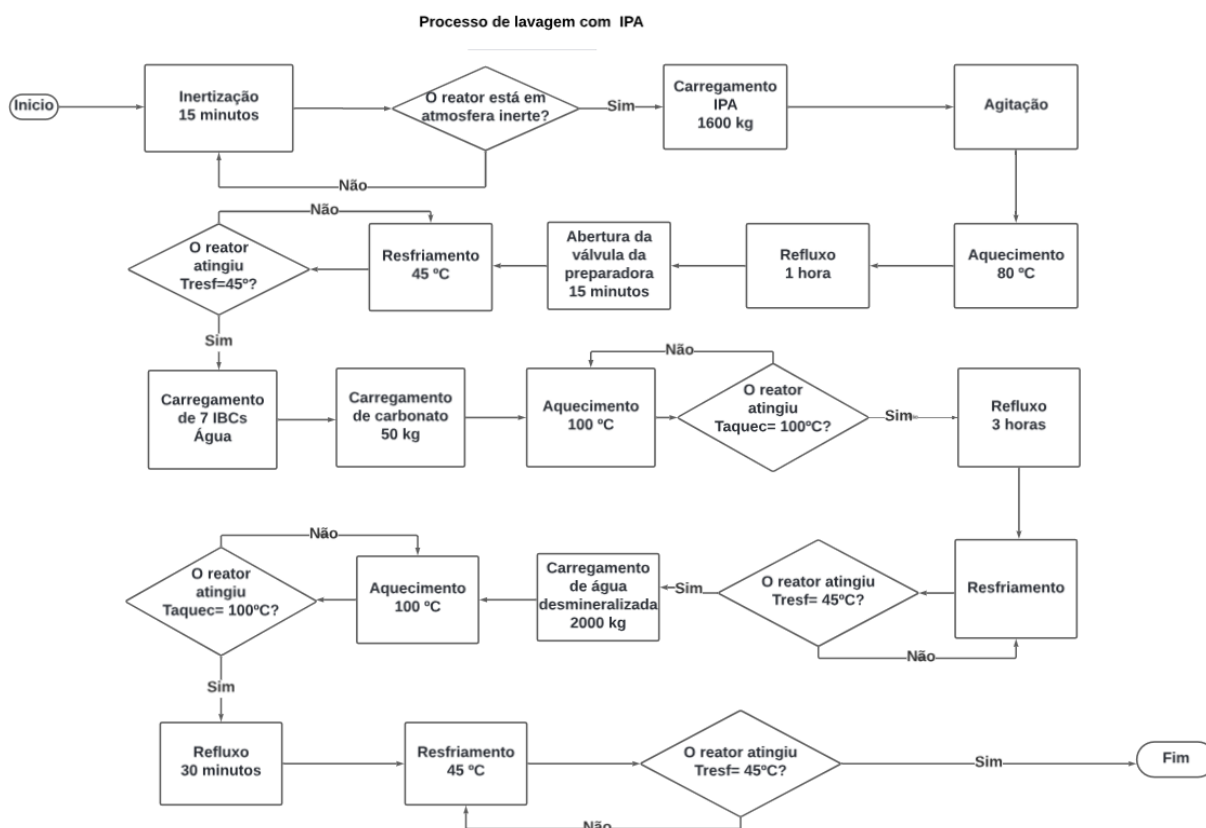


Figura 5 - Fluxograma do processo de lavagem com IPA realizado no reator K212 após fabricação do produto PX.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

A inertização visa eliminar a presença de oxigênio no reator para evitar reações indesejadas com atmosfera explosiva. Geralmente, utiliza-se um gás inerte, como o nitrogênio, para purgar o oxigênio. Nesta primeira etapa prepara-se para a adição do solvente Isopropanol (IPA) que é inflamável. São introduzidos 1600 kg de IPA para auxiliar na dissolução de resíduos orgânicos presentes no interior do reator, uma vez que o IPA é um solvente eficaz para a remoção de substâncias oleosas e poliméricas. Em seguida ocorre a agitação para promover a homogeneização do solvente IPA dentro do reator, aumentando a eficiência na dissolução e remoção de resíduos nas superfícies internas. Aliado ao aquecimento do reator para aumentar a solubilidade dos resíduos em IPA, facilitando a limpeza ao diminuir a viscosidade dos resíduos e melhorando a dissolução. O reator é aquecido até 80 °C de temperatura ideal para fazer o refluxo com IPA. O refluxo dura 1 hora e mantém o solvente em circulação, permitindo uma limpeza mais completa e garantindo que os resíduos sejam dissolvidos de forma eficiente.

Posteriormente, a válvula do reator intermediário é aberta para que a mesma também seja higienizada. No fim desta primeira sequência de etapas do processo de lavagem reduz-se a temperatura do reator a 45 °C para preparar o sistema para a próxima etapa, onde a adição de água fria será realizada de forma mais segura. A segunda sequência de etapas consiste na adição de uma grande quantidade de água para fazer uma solução com 50 kg de carbonato. O carbonato de sódio remove quaisquer vestígios que permaneçam na parede, através de tratamento químico, bem como remove o IPA. Ele age como um agente alcalinizante, neutralizando possíveis resíduos ácidos que possam estar presentes e auxiliando na limpeza química das superfícies.

Aquece-se novamente o reator dessa vez a 100 °C na temperatura de ebulição da água para depois realizar o refluxo. A circulação da solução aquecida de água e carbonato no reator, garante a remoção completa dos resíduos alcalinizados e proporciona uma limpeza mais profunda. Depois o reator é resfriado novamente

para prepará-lo para a próxima carga de água.

A última sequência de etapas consistem de lavagem exclusivamente com água. É introduzida água desmineralizada e aquecida a 100 °C melhorando a eficiência do enxágue e garantindo a dissolução e remoção de quaisquer resíduos finais. Também é realizado um refluxo de 30 min, pois, a circulação da água aquecida por 30 minutos assegura uma limpeza completa, enxaguando qualquer impureza remanescente. Para concluir, ocorre resfriamento final do sistema para possibilitar a inspeção ou o uso subsequente do reator sem risco de danos térmicos.

b. Procedimento de lavagem com NaOH em Clamecy

Um outro exemplo de processo de lavagem realizado em Clamecy é um procedimento utilizando NaOH. A lavagem com o NaOH é aplicada por exemplo após a fabricação do produto “PY”. O “PY” é um polímero de látex com 30% de peso em água. É produzido por copolimerização de emulsão de radical livre com monômeros associativos hidrofóbicos. Esse produto pertence ao mercado de “Home & Personal Care”. PY tem ação viscosificante e é usado em shampoos para bebês.

No caso do “PY”, seu procedimento de lavagem pós-produção é rigoroso e pode levar até três dias. A soda cáustica (NaOH) a 0,3% é utilizada. Quando aplicado como uma solução aquosa, o hidróxido de sódio começa imediatamente a quebrar qualquer depósito de carbono ou mineral nas superfícies metálicas, pois dissolve esses materiais alterando sua estrutura química.

O NaOH é usado para criar uma emulsão e quebrar as moléculas hidrofóbicas do produto em partículas menores que são dispersas no meio aquoso. Isso é chamado de saponificação. O hidróxido quebra as moléculas de gordura. Deve-se prestar atenção especial à concentração, ao pH e à temperatura, pois o alto pH das soluções de hidróxido de sódio pode levar à corrosão do equipamento se ele for deixado em repouso por longos períodos. Deve-se dar atenção especial ao interior de canos e tubos de metal, onde a velocidade de circulação é baixa (~ 1,56 m/s) para enxaguar a solução.

A escolha do NaOH baseia-se nas propriedades conhecidas desse produto e nas aplicações encontradas na literatura sobre limpeza de reatores de polimerização. E também se baseia no tipo de molécula do produto a ser limpo, o “PY”, com as recomendações do “Process book” desse produto. O “Process book” é um documento publicado pela P&D da empresa que contém todas as informações necessárias para a industrialização de um novo produto e acompanha recomendações sobre limpeza pré e pós-produção. Abaixo está apresentado o Fluxograma deste processo de limpeza com NaOH.

Na primeira etapa, com a quantidade calculada de água para preparar a solução com a concentração requerida de NaOH o reator é carregado. A água é adicionada ao sistema para encher o reator e começar o processo de limpeza. A quantidade utilizada deve cobrir toda a superfície interna do reator. Então o enxágue da tubulação com água é feita a fim de limpar a tubulação conectada ao reator para remover resíduos do produto anterior. A etapa de agitação é então realizada. A água circula dentro do reator para ajudar a desprender qualquer resíduo aderido nas partes internas. A seguir, 80 kg de NaOH (30%) são inseridos no reator. Como agente químico de limpeza o hidróxido de sódio (NaOH) é adicionado, ele saponifica e dissolve resíduos orgânicos ou outras substâncias que estejam presentes.

Na Figura 6 está apresentado o Fluxograma dessa lavagem.

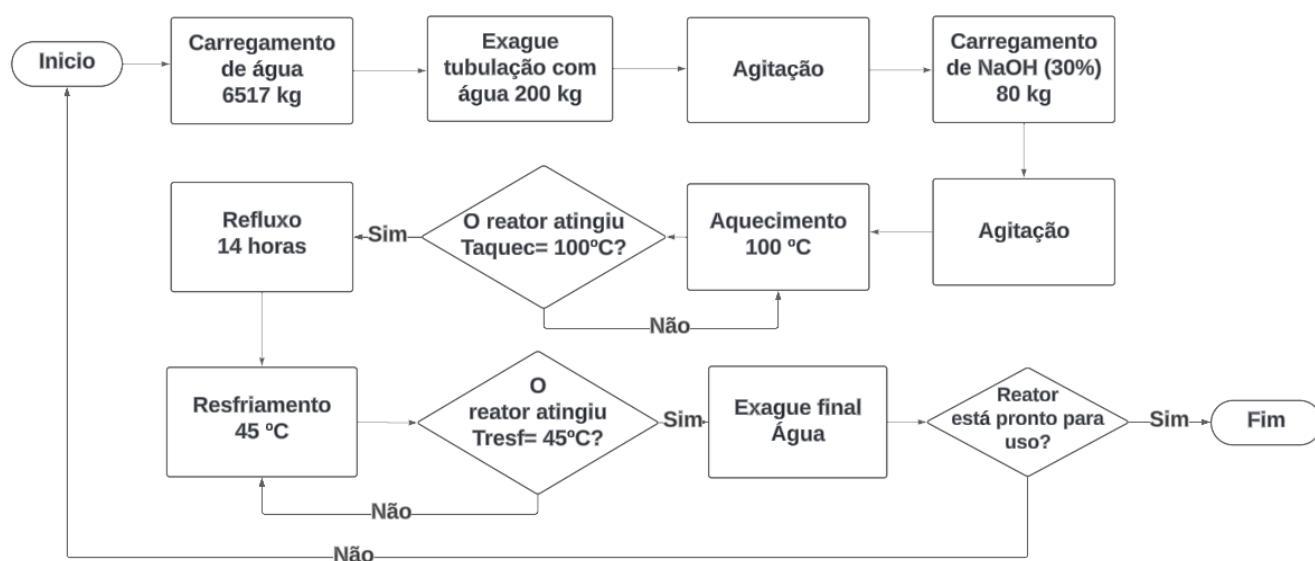


Figura 6 - Fluxograma do processo de lavagem com NaOH após fabricação do produto “PY”.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Após a adição do NaOH, é feita a agitação e aquecimento da solução. A agitação nesta etapa ajuda a garantir que a solução de NaOH entre em contato com todas as superfícies internas do reator. O aquecimento serve para aumentar a eficiência do NaOH na remoção de resíduos, pois a temperatura elevada pode ajudar a dissolver materiais mais difíceis de remover.

A solução de NaOH é mantida em circulação e aquecida para promover uma limpeza mais profunda, o que faz com que qualquer resíduo persistente seja totalmente dissolvido ou removido. Essa etapa de refluxo tem que durar 14 horas, para que o reator e equipamentos anexos fiquem limpos dentro dos padrões esperados. O sistema é resfriado para facilitar o manuseio seguro e preparar para as etapas finais do processo. Por fim, ocorre o enxágue final com água. Assim elimina-se traços do produto utilizado na limpeza. Então o reator fica limpo e sem contaminantes.

Uma última verificação é feita para garantir que o reator esteja em condições adequadas para ser utilizado novamente. Se aprovado, o processo é finalizado. Caso contrário, pode ser necessário repetir algumas, ou todas as etapas. Ou então a lança pode ser utilizada para remover apenas blocos aderidos nas superfícies.

Os efluentes gerados nos processos de lavagens são em parte armazenados para serem reutilizados em uma nova lavagem quando possível, ou quando não é possível a reutilização são enviados para a estação de tratamento de efluentes da fábrica, que realiza tratamento biológico destes efluentes. A estação de tratamento da fábrica de Clamecy é projetada para receber diferentes tipos de efluentes, e quando ocorre um experimento novo em escala industrial ela é avisada e assim pode tomar as devidas providências de preparação.

3.4. O método Lean

3.4.1. O que é

A filosofia de gestão Lean surgiu na Toyota, buscando superar os problemas após a Segunda Guerra Mundial, desenvolvendo técnicas inovadoras para superar as dificuldades do cenário da época (ADEGBITE, 2024). O fundador do Sistema de Produção Toyota (TPS), Taiichi Ohno, questionou as normas de processamento em massa na época, buscando reduzir o estoque e cultivar o fluxo por meio de avanços em trocas rápidas de matrizes e nivelamento de produção (HALL, 2004).

Na metodologia Lean, o foco é agregar valor ao cliente. Dessa maneira, todo elemento que não seja essencial é questionado e eliminado. As atividades são reorganizadas para melhorar o fluxo, aumentar a transparência e acelerar o tempo de entrega ao mercado. Graças a colaboração de equipe e discussão entre departamentos proposta pelo gerenciamento Lean, os tempos diminuem e os prazos são cumpridos devido à remoção de obstáculos. Com a utilização de ciclos de aprendizado contínuo, melhora-se a qualidade e estimula-se a inovação ao transferir mais autoridade para a linha de frente, e as entregas tornam-se mais relevantes, atendendo diretamente às expectativas do usuário final (ADEGBITE, 2024).

Diferente dos métodos tradicionais mais rígidos, a metodologia Lean proporciona maior flexibilidade, o gerenciamento de projetos se torna mais adaptável às incertezas do mercado atual. Algo fundamental em fábricas dinâmicas como de produção multiprodutos. Os métodos rígidos geram desperdícios, atrasos e desalinhamentos quando os requisitos se alteram. As práticas Lean são capazes de reduzir consideravelmente o desperdício, agregar valor ao cliente, agilizar operações, diminuir retrabalhos e melhorar os resultados dos projetos (ADEGBITE, 2024).

3.4.2. Aplicação

A metodologia de gerenciamento “Lean” utiliza além do envolvimento dos trabalhadores, a aplicação de metodologias, técnicas e ferramentas para funcionar (RIBEIRO et al., 2019). Uma delas é o 5S, o 5S atua para visualizar os desperdícios, limpando e organizando o local de trabalho. Com 5S define-se os itens necessários e desnecessários, removendo-se os últimos (ISLAM, 2023). Os 5S combinam cinco princípios que permitem a introdução e implementação das melhorias. E assim

garante que o ambiente seja mantido limpo, seguro e eficiente (RIBEIRO et al., 2019)

As práticas a serem adotadas segundo o 5S são: Seiri, o senso de utilização, que consiste em separar o necessário do desnecessário no local de trabalho; Seiton, senso de organização, envolve designar um lugar para cada coisa e tudo em seu lugar; Seisou, fazer a limpeza, compreende um local de trabalho limpo que encoraja e traz vontade de mantê-lo assim; Seiketsu, senso de saúde, constitui-se em criar regras de limpeza e organização; Shitsuke, senso de disciplina, significa a manutenção constante dos padrões estabelecidos nas etapas anteriores (RIBEIRO et al., 2019).



Figura 7 - Elementos do 5S.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Um segundo elemento que faz parte da implementação da filosofia Lean é Kaizen. Kaizen é um conceito aplicado no “Lean”, que significa “mudança para melhor” em japonês. Na melhoria contínua, desenvolve-se comportamentos para manter o local de trabalho sempre organizado (ISLAM, 2023).

Outro recurso aplicável é a gestão visual. É necessário que todas as informações estejam facilmente disponíveis a todos, mesmo os que não conhecem o processo em questão devem poder encontrar as informações e interpretá-las. Vários sistemas visuais podem ser usados, como painéis informativos, imagens, cores,

marcação de espaços e instruções de trabalho. O objetivo desses sistemas é capacitar os trabalhadores a gerenciar seu próprio ambiente de trabalho, reduzindo erros e outras formas de desperdício (RIBEIRO et al., 2019).

Mais uma ferramenta relevante é o Kanban. Ele facilita o fluxo de produção por meio de um sistema de sinalização visual. Ele indica quando uma atividade deve ser acionada, de acordo com os níveis de trabalho em andamento, limitando o estoque excessivo e promovendo a produção baseada na demanda real. A abordagem just-in-time usada pelo Kanban equilibra a eficiência e a flexibilidade, permitindo que o trabalho flua de forma contínua com base na demanda do cliente e ajustando os ciclos de produção para atender as necessidades em tempo real (ADEGBITE, 2024).

Just-in-Time (JIT) é um princípio do Lean que visa reduzir estoques e produzir apenas o necessário, no momento certo, para atender à demanda do cliente. Ele coordena o fluxo de materiais e produtos, acionando as etapas do processo apenas quando há uma necessidade real, o que evita a acumulação de inventário e maximiza a eficiência do uso de recursos. Ao alinhar a produção com a demanda atual, o JIT reduz desperdícios e tempos de espera, tornando o sistema de produção mais ágil (ADEGBITE, 2024).

Pode-se considerar o uso do mapeamento do fluxo de valor. Uma técnica que rastreia todas as etapas do processo produtivo, identificando os fluxos que agregam ou não valor ao produto final. Ele destaca pontos de desperdício e oportunidades para reduzir o lead time, eliminando barreiras e atrasos que ocorrem entre diferentes silos funcionais. Ao proporcionar uma visão completa e transparente dos processos, essa técnica permite a otimização do fluxo geral por meio da remoção de atividades desnecessárias, acelerando a entrega de valor ao cliente (ADEGBITE, 2024).

Poka-Yoke é uma abordagem que busca eliminar erros humanos por meio de métodos de prevenção e controle integrados aos processos de produção. Utilizando dispositivos ou procedimentos à prova de falhas, ele interrompe ou corrige atividades de forma imediata quando um problema é detectado, evitando que defeitos se propaguem para as etapas subsequentes. Isso reduz significativamente os custos com retrabalho e aumenta a qualidade, uma vez que a ênfase está em evitar que os erros aconteçam, em vez de apenas inspecionar os resultados (ADEGBITE, 2024).

O que importa é aplicar os valores Lean para que tudo flua da maneira correta. Não importa qual das ferramentas apresentadas será utilizada. Todas essas ferramentas utilizam princípios de gestão Lean para propor modos de funcionamento, metodologias e soluções para melhorar o fluxo de trabalho. A utilização das ferramentas pode ser combinada entre elas de diferentes maneiras (ADEGBITE, 2024).

3.4.3. Vantagens ao ser aplicado na indústria química

Implementar a filosofia Lean para aumentar a eficiência operacional dos processos produtivos traz resultados positivos e fomenta a melhoria contínua a médio prazo. Implementar ações baseadas nas ferramentas Lean possibilitam a melhoria do desempenho global da planta (RIBEIRO et al., 2019). As empresas que utilizam o sistema de gerenciamento Lean recebem destaque ao valorizar os trabalhadores. Criando assim, equipes mais motivadas e melhorias contínuas na linha de produção (ADEGBITE, 2024).

Quando a fábrica adota práticas como fluxo contínuo, rápida capacidade de adaptação, sinalização para melhorar a comunicação visual, mecanismos para prevenir erros, produção organizada e um foco no fluxo de valor, a empresa estabelece os padrões para ambientes de gerenciamento de produção ou gestão de projetos modernos (ADEGBITE, 2024).

Essas práticas formam uma base que combina ferramentas e mentalidades voltadas para otimizar, estimular a inovação e colocar o cliente no centro das operações. Os princípios Lean e as boas práticas industriais estão totalmente alinhados e tornam os modelos operacionais mais eficazes, à medida que as indústrias modernas priorizam a agilidade e o foco no cliente (ADEGBITE, 2024).

3.4.4. Lean e os procedimentos de lavagem

A implementação de metodologias Lean na organização dos procedimentos de lavagem em uma fábrica de produtos químicos, como a Solvay em Clamecy, traz

benefícios significativos para a eficiência e a sustentabilidade. A filosofia Lean, com foco na eliminação de desperdícios e na melhoria contínua, permite que os procedimentos de lavagem sejam otimizados. Isso assegura que o uso de recursos como água e produtos de limpeza seja o mínimo necessário para alcançar a eficiência desejada. Como explorado na revisão bibliográfica, a prática Lean pode reorganizar esses procedimentos em etapas essenciais e controláveis, e implementar sistemas automatizados. Assim, colabora para a otimização da limpeza, uma etapa essencial para uma indústria de produção multiproduto (YANG, 2018).

Em uma fábrica dinâmica que lida com produtos variados, a padronização e a agilidade promovidas pela gestão Lean são fundamentais para adaptar rapidamente os procedimentos de lavagem. No caso da Solvay, onde o tipo de produto fabricado determina o procedimento de limpeza, a metodologia Lean permite ajustar e simplificar esses processos sem perder a precisão. Ferramentas Lean, como o Kanban e o 5S, podem auxiliar na organização dos procedimentos de lavagem, já o mapeamento de fluxo de valor ajuda identificar e reduzir etapas redundantes, promovendo um ambiente seguro e eficiente. Isso beneficia tanto a sustentabilidade ambiental, ao evitar o consumo excessivo de água e produtos químicos, quanto a produtividade da fábrica, que pode concentrar seus esforços na produção contínua e de alta qualidade (ADEGBITE, 2024; RIBEIRO et al., 2019).

A filosofia Lean implementou estas práticas, enfatizando a eliminação de desperdícios e a otimização de recursos. Ao aplicar princípios Lean em conjunto com as normas ISO, as empresas podem padronizar processos de limpeza para reduzir a variabilidade e melhorar a eficácia geral. A integração dessas abordagens facilita a realização de auditorias internas e a identificação de não-conformidades, assegurando um ciclo de melhoria contínua e uma gestão ágil. Isso não só melhora a produtividade, mas também fortalece a imagem corporativa, tornando a empresa um parceiro confiável e comprometido com a excelência (ISLAM, 2023; CASTILLO-MARTINEZ et al., 2021).

4. METODOLOGIA

4.1. A gestão dos processos de lavagem em clamecy

Como foi apresentado, os reatores desempenham um papel crucial na indústria. Para garantir a qualidade de produtos e eficiência de produção, os reatores devem estar em boas condições de funcionamento. No entanto, numa instalação de produção, ao longo do tempo, os resíduos, a contaminação ou os depósitos podem acumular-se no interior dos reatores, comprometendo o seu desempenho. É por isso que deve ser efetuado um bom processo de lavagem após cada ciclo de produção. Apesar disso, a lavagem é por vezes negligenciada nos processos industriais, embora tenha um impacto direto no desempenho de uma instalação de produção.

No caso da área F5, existe uma dificuldade adicional. A área F5 é uma fábrica multiprodutos. São fabricados diferentes produtos, cada um com as suas próprias características químicas, para uma variedade de aplicações. Os produtos dizem respeito ao mercado alimentício, cosméticos e produtos para uso industrial, por exemplo. Neste contexto, a lavagem é um processo crítico. Deve ser dada especial atenção à lavagem para evitar a contaminação cruzada.

4.2. Funcionamento na área de fabricação F5

A limpeza industrial dos equipamentos de produção é designada no presente trabalho por "lavagem". A lavagem do reator, do trocador de calor e dos diferentes reatores intermediários é definida para cada produto, ou seja, um procedimento operacional específico para cada produto fabricado. Em alguns casos, o mesmo procedimento de lavagem pode ser utilizado para mais do que um produto fabricado com a mesma química. Em primeiro lugar, o processo de lavagem baseia-se nas propriedades do produto fabricado no reator.

Em segundo lugar, os procedimentos operacionais são geridos tendo em conta tanto o produto que acabou de ser fabricado, como a produção seguinte. Se o produto seguinte exigir padrões mais restritos, seja pelo seu modo de fabricação, seja pelo resultado final, uma limpeza mais rigorosa terá que ser realizada.

Para determinar o procedimento de lavagem a ser efetuado, a área de fabricação utiliza uma matriz de lavagem. As matrizes estão divididas por seção e por reator principal. Na seção 100, existe uma matriz de lavagem para os reatores K117 e K118 e

na seção 200 existe uma matriz para o reator K209 e uma matriz para o reator K212. Os produtos que aparecem na primeira coluna da matriz são os "produtos fabricados" e os produtos que aparecem na primeira linha da matriz são os "produtos a fabricar".

Por exemplo, na matriz da seção 100, para os reatores K117 e K118, se o produto produzido for o "P4" e o produto a fabricar for o "P6", deve ser efetuada uma lavagem B, como é mostrado na Figura 8.

Seção 100	Produto a ser fabricado							
Produto fabricado no K117/K118	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1		A	A	A	A	A	A	A
P2	A		A	A+P2	A	A	A	A
P3	C2	C2		C2+P2	C2	C2	C2	C2
P4	B	B	B		B	B	B	B
P5	B	B	B	B+P2		B	B	B
P6	E	E	E	E+P2	E		E	E
P7	E	E	E	E+P2	E	E		E
P8	E	E	E	E+P2	E	E	E	

Figura 8 - Matriz da seção 100 (em detalhe) que ilustra a determinação de uma lavagem.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

A matriz da seção 100 é apresentada no parágrafo seguinte. Os anexos (anexos 1 e 3) contêm as outras matrizes de lavagem trabalhadas durante este trabalho. Para cada matriz, uma legenda foi criada para mostrar a correspondência entre as letras da tabela e as informações sobre a lavagem (composição, duração, etc.) (anexos 2 e 4). A maior matriz é a da seção 100, que contém 31 produtos e é apresentada na Figura 9. As cores da primeira coluna representam a classificação dos produtos.

Até antes da realização do trabalho em questão, para realizar o procedimento de lavagem, olhava-se na matriz qual lavagem deveria ser executada, procurava-se a folha do procedimento, e era feita uma cópia da folha ou impressão. Os dados sobre a realização desses procedimentos de lavagem eram escritos a mão nessas folhas e armazenados por um tempo. Algumas informações úteis de testes de lavagem que deram certo no passado foram perdidas. As tabelas com as legendas dos nomes de lavagem não estavam em dia nem havia os tempos de todas as lavagens.

Para a seção 100, são classificados como solventes orgânicos, polímeros ou formulações, estes dois últimos divididos em produtos com ou sem biocidas. Como abordado anteriormente, a natureza química do produto é decisiva para determinar o tipo

de limpeza necessário. Os produtos poliméricos podem deixar resíduos viscosos ou aderentes, enquanto as formulações podem criar depósitos complexos (RICHARDS; CONGALIDIS, 2006).

As reações em meio aquoso, por exemplo, podem favorecer a formação de sais ou precipitados, enquanto as reações em meio orgânico podem deixar resíduos lipídicos ou de carbono (RICHARDS; CONGALIDIS, 2006). Estas características químicas específicas influenciam a escolha dos agentes de limpeza, as temperaturas e os procedimentos necessários para remover eficazmente os resíduos, evitar a contaminação cruzada e garantir a segurança do reator para outras produções.

SEÇÃO 100		PRODUTO A SER FABRICADO																															
PRODUTO FABRICADO NO KIT17 K118		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	
P1		A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A
P2		A	A#P2	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A
P3		C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2
P4		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
P5		B	B	B#P2	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
P6		E	E	E	E#P2	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	C	C	C	C	C
P7		E	E	E	E#P2	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	C	C	C	C	C
P8		E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C
P9		E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	C	C	C	C	C
P10		A	A	A#P2	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
P11		C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2
P12		E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P13		E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P14		E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P15		E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P16		B	B	B#P2	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
P17		D	D	D#P2	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
P18	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	
P19	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E
P20	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E
P21	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E
P22	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E	E+VAP-E
P23	C	C	C#P2	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E				C	C	C	C	C	C	C	C	C
P24	E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P25	E	E	E#P2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
P26	F	F	F#P2	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
P27	F	F	F#P2	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
P28	F	F	F#P2	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
P29	C	C	C#P2	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
P31	G	G	G#P2	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G

Figura 9 - Matriz de lavagem da seção 100 - reatores K117 e K118.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

O Tabela 1 apresenta a legenda desta matriz.

Tabela 1. Nome da lavagem, letra de referência e duração da seção 100.

Referência	Tipo de lavagem	Duração (h)
A	Lavagem com refluxo 4000 L de água reciclada	11
B	Lavagem com refluxo 12000 L peróxido	23
C	Lavagem com refluxo 4000 L de água nova	10
C2	Lavagem com refluxo 4000 L de água nova com enxaguamento por P10930	9
D	Lavagem por refluxo 12000 L de água reciclada	16
E	Lavagem TeR e enxaguamento com lança de água quente	0.5
F	Lavagem com soda 0,5% + lavagem com refluxo 10000 L de água reciclada + enxaguamento	14
G	Novas lavagens com refluxo de água após P25	11
P2	Passivação antes de P14	5

Outros pontos a ter em conta são que, em alguns casos, não é necessário limpar o reator entre dois lotes do mesmo produto, uma vez que os produtos não são incrustantes. Por outro lado, há produtos em que o reator é lavado após a fabricação de cinco lotes do mesmo produto devido à incrustação do polímero (lavagem conhecida como lavagem inter-campanhas). A incrustação das instalações tem um impacto direto na troca de calor e, conseqüentemente, na qualidade do produto final.

Há também transições entre produtos que devem ser evitadas. Quando, por exemplo, o produto é uma substância muito odorífera que não pode ser lavada com água porque é insolúvel, não é aconselhável fabricar um produto destinado ao mercado dos cosméticos para evitar a transferência de odores.

Todos estes requisitos foram rigorosamente levados em consideração na melhoria e simplificação dos processos de lavagem e no desenvolvimento da ferramenta que reagrupa esses procedimentos de lavagem.

4.3. Problemas com o formato utilizado

O problema surge porque as matrizes são grandes e existem vários procedimentos

de lavagem que parecem ser equivalentes. Há um total de 30 procedimentos de lavagem nas matrizes de lavagem das 2 seções.

Para explicar o que quer dizer “lavagens equivalentes” mas que não são exatamente iguais, há um exemplo de lavagem com água. Por exemplo, há lavagens com água nova e lavagens em que o efluente foi reutilizado. Portanto, o reator será preenchido com o conteúdo do IBC do respectivo produto lavado anteriormente ou será preenchido com água direto da tubulação. As instruções iniciais e finais do procedimento devem ser diferentes e os IBCs a serem recolhidos e etiquetados tem nomes diferentes se for uma lavagem do tipo com água nova ou reutilizada. Além disso, é necessário saber quantas vezes foi reutilizada e identificada por tipo de limpeza e pelos produtos a lavar. Apesar das diferenças, as etapas intermediárias são as mesmas.

Para dar outro exemplo, durante a industrialização de um novo produto, as etapas da lavagem do reator podem ser semelhantes, mas a lavagem do equipamento auxiliar (unidades de preparação, linhas de transferência, etc.) pode divergir. Então era necessário criar um novo procedimento de lavagem e adicionar no arquivo e na matriz.

Além disso, a utilização da matriz requer o conhecimento do próximo ciclo de produção e o planejamento pode ser modificado. Atualmente, o operador espera pelas instruções do responsável da área de fabricação. O objetivo é tornar o departamento autônomo (ganhar tempo e valorizar as equipes).

Por último, a existência de mais de 30 procedimentos de lavagem constitui uma desvantagem para a atualização completa destas informações após uma modificação da instalação ou de uma alteração do parâmetro de funcionamento, etc. Por exemplo, o agitador de um dos reatores foi trocado e verificou-se que com o novo tipo de agitador a velocidade de agitação deve ser reduzida durante todas as lavagens. Diante disso, cada um dos procedimentos tiveram que ser editados um por um.

A criação de vários procedimentos de lavagem aliado ao ritmo dinâmico da usina e a dificuldade na edição e atualização das lavagens, leva a uma obsolescência de muitos procedimentos que estão no arquivo e na discrepância de execução em função do operador. Dependendo do nível de experiência, alguns operadores sabem que algumas etapas não precisam ser realizadas, enquanto outras necessitam de adaptações no método de execução. Isso impede de haver uma repetibilidade dos processos e dificulta a identificação da origem do problema quando uma lavagem não sai como esperado. Isso resulta em processos de lavagem que variam em execução e, em alguns casos, necessitam ser repetidos devido à falta de padronização, ocasionando assim, perda de

tempo.

4.4. Aplicação da metodologia para resolução dos problemas

A Figura 10 mostra as etapas gerais deste trabalho.

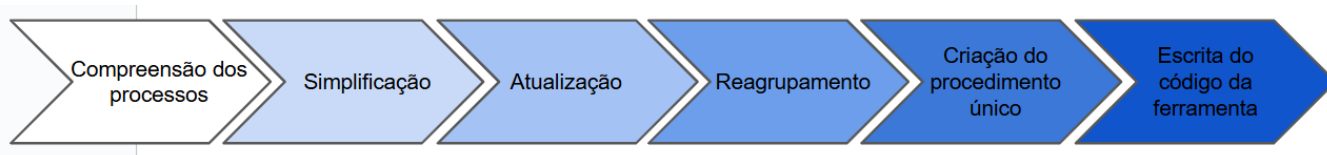


Figura 10 - Etapas do processo de melhoria.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Foi utilizado os princípios “Lean” a fim de melhorar os problemas envolvendo a gestão dos procedimentos de lavagem. A metodologia PDCA foi aplicada. A primeira etapa foi o “Plan”, “Planejar”. Foi realizada a identificação e análise dos problemas de acordo com o conceito “Muda” de eliminação de desperdícios como apresentado na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Principais problemas de gestão dos procedimentos de lavagem.

Problema	Descrição	Impacto
Excesso de Procedimentos de Lavagem	Muitos procedimentos similares, mas não exatamente iguais.	Redundância, excesso de informação desnecessária, dificuldade de encontrar o que importa.
Variabilidade nas Execuções	Diferença nas execuções entre uma lavagem e outra, influenciada pelo nível de experiência do operador.	Falta de padronização, dificuldade de identificar a origem de problemas e desperdício de recursos.
Dificuldade na Atualização	Alterações não atualizadas rapidamente, como mudança nos parâmetros dos procedimentos.	Obsolescência dos procedimentos, erros, confusão e ineficiência.
Dependência do Planejamento	Operadores precisam esperar por instruções do responsável, tornando o processo lento.	Tempo de inatividade e perda de autonomia dos operadores.

Organização manual e escrita.	Procedimentos impressos, registros físicos.	Necessidade de lugar para guardar os registros, dificuldade para encontrar informações, funcionamento arcaico.
-------------------------------	---	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela resume os problemas de gestão dos processos de lavagem e seus impactos de acordo com a filosofia Lean identificando o “muda”, o que não tem propósito. O excesso de procedimentos leva a redundância e desperdício de tempo, já a variabilidade nas execuções causa inconsistências na qualidade, fazendo com que haja retrabalho e perda de tempo. A dificuldade na atualização dos procedimentos cria disparidade entre o que é documentado e o que é praticado e leva a desvios e ineficiências. Enfim, esses problemas juntos podem causar aumento do tempo de inatividade, reduz a autonomia da área de produção, diminui a agilidade e a qualidade das ações, podendo impactar negativamente o produto. Por isso é necessário trabalhar para eliminar as “mudas” (desperdícios) e agregar mais valor ao cliente.

A segunda etapa foi o “Do”, “Executar”. De maneira a aplicar os princípios do 5S, o *Seiri* consistiu em eliminar os procedimentos redundantes ou desatualizados, o *Seiton* consistiu em organizar os procedimentos restantes de forma clara e acessível e adicionar os pictogramas e instruções de segurança faltantes. Isso foi feito com o estudo de todos os procedimentos de lavagem para identificar as semelhanças e diferenças. O passo seguinte foi simplificar as instruções utilizando frases curtas para torná-las mais fáceis de seguir (mais fáceis de ler).

O *Seiso* consistiu em manter os documentos atualizados sem informações obsoletas e o *Seiketsus* em criar padrões entre as execuções e garantir que as instruções de segurança podiam ser seguidas. Para isso, à medida que as lavagens foram sendo realizadas e que era possível acompanhá-las, houve um trabalho em colaboração com a Assistência de Processos, o responsável da área de fabricação e o seu adjunto, e os operadores. Esta fase de atualização permitiu o alinhamento entre os diferentes setores entre a versão escrita, a experiência no terreno e os engenheiros.

Em seguida para o *Shitsuke* e para garantir a melhoria contínua (Kaizen) era necessário compilar os procedimentos operacionais. O que foi feito depois da identificação das partes comuns. Assim, questioneei a necessidade de certas etapas

ou a lavagem de certos equipamentos, analisando o modo de fabricação do produto. A organização foi efetuada em várias etapas e traduzida em diagramas. A Tabela 3 resume essas ações.

O resultado final é apresentado no capítulo seguinte. O que levou a criação da ferramenta que contém todos os procedimentos de lavagem. Essa última etapa fecha o ciclo “Check” e “Act” com a verificação do funcionamento da ferramenta, a apresentação aos utilizadores da mesma e aos poucos sua validação.

Tabela 3. Aplicação dos princípios Lean utilizando 5S.

Princípio Lean	Descrição da Aplicação
Seiri (Classificação)	Eliminação de procedimentos redundantes e desatualizados.
Seiton (Organização)	Organização dos procedimentos atualizados e inclusão de instruções de segurança faltantes.
Seiso (Limpeza)	Manutenção e atualização dos documentos, removendo informações desnecessárias.
Seiketsu (Padronização)	Criação de um padrão uniforme nas execuções e nas instruções.
Shitsuke (Disciplina)	Compilação e aplicação de um ciclo de melhoria contínua (Kaizen).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As ações do PDCA estão resumidas no Fluxograma abaixo, na Figura 11.

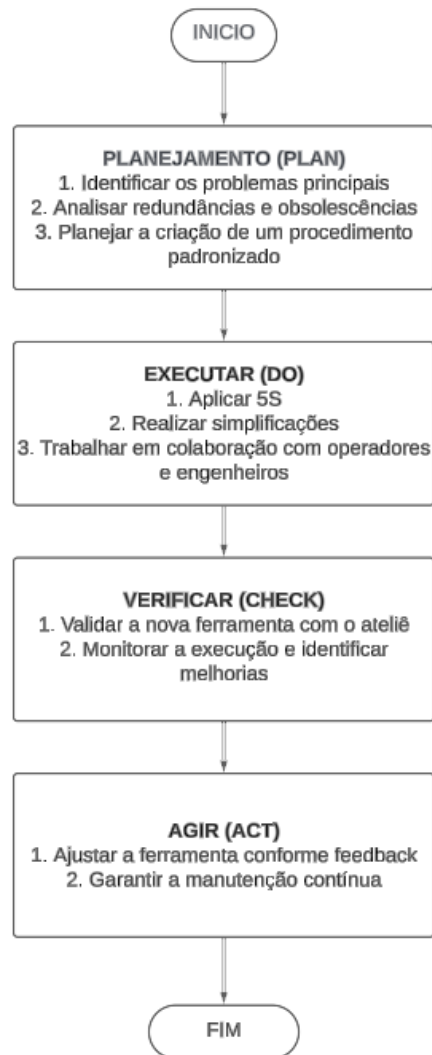


Figura 11 - Ações do PDCA.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

5. RESULTADOS e DISCUSSÕES

A compilação dos dados anteriores foi reorganizada e ordenada. As matrizes foram transformadas em Fluxogramas. Os diagramas de fluxo têm "cadernos" que agrupam as partes comuns das lavagens.

O resultado do Fluxograma para o reator K209 é apresentado na Figura 12.

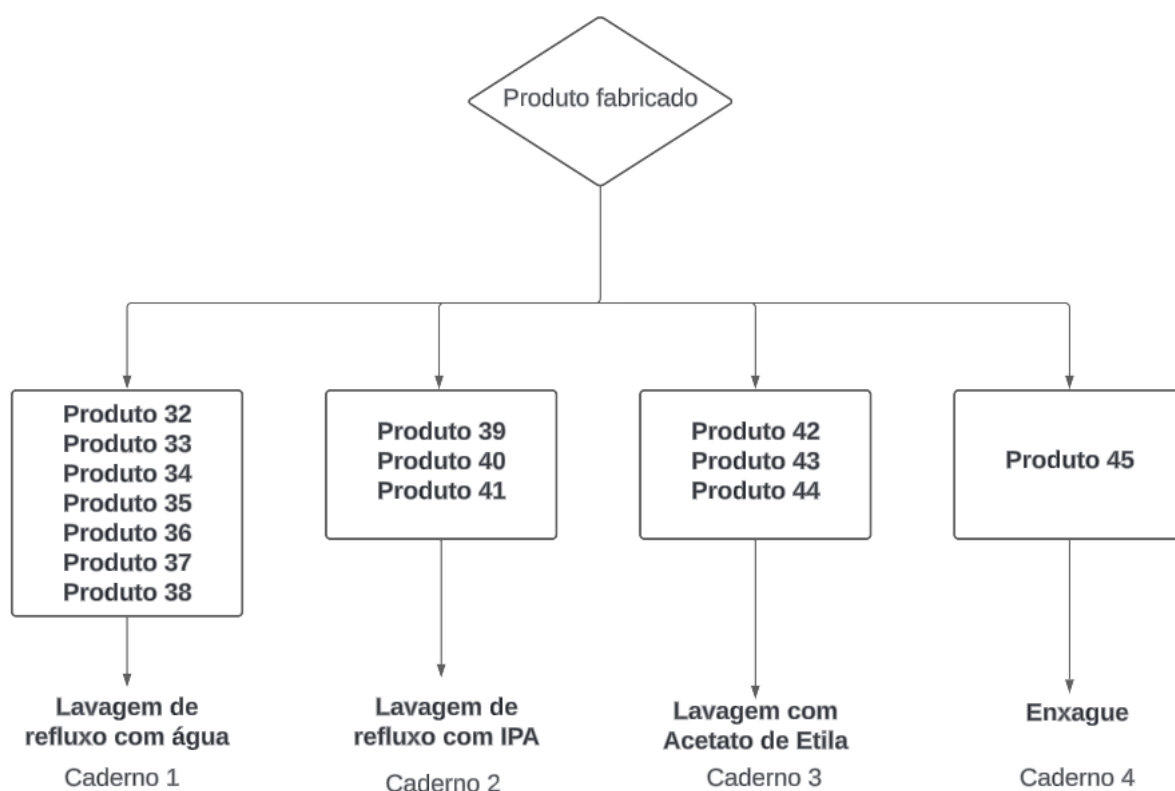


Figura 12 - Fluxograma para a parte da seção do reator K209.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Os cadernos de trabalho foram definidos da seguinte forma: Caderno de trabalho 1: Lavagem em refluxo com água (E), Caderno de trabalho 2: Lavagem em refluxo com IPA (I), Caderno de trabalho 3: Lavagem com Acetato de Etila (Z) e Caderno de trabalho 4: Enxaguamento (R). Os procedimentos de lavagem antigos estão agrupados da seguinte forma (com a sigla da legenda do antigo nome do procedimento): Caderno 1: G + H, Caderno 2: K + I + L, Caderno 3: R3, Caderno 4: R2. Isto significa que sete lavagens foram combinadas em quatro cadernos.

O resultado do Fluxograma para a parte da seção do reator K212 é apresentado na Figura 13.

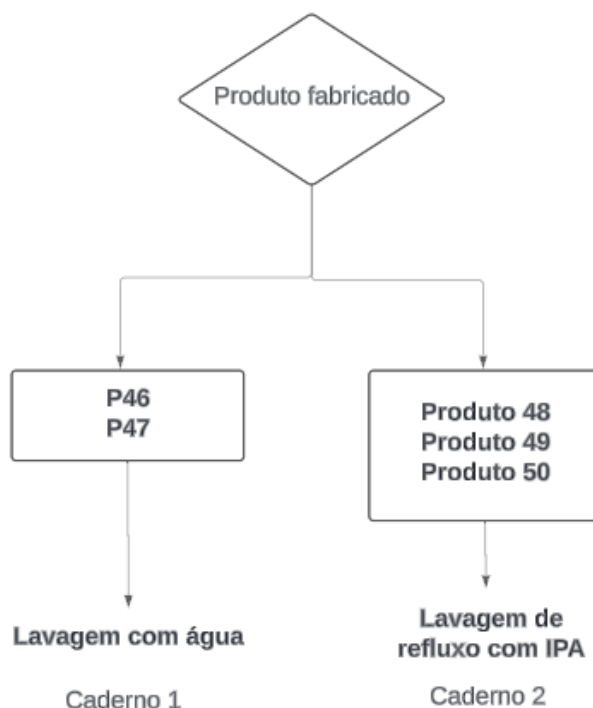


Figura 13 - Fluxograma para a parte da seção do reator K212.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Os cadernos de trabalho foram definidos como: Caderno de trabalho 1: Lavagem com água (E) e Caderno de trabalho 2: Lavagem com refluxo IPA (I). Os procedimentos de lavagem antigos estão agrupados da seguinte forma (com a sigla da legenda do antigo nome do procedimento): Caderno 1: C + B e Caderno 2: D2 + K2. Desta forma, quatro tipos de lavagem foram reorganizados em dois cadernos.

O resultado do Fluxograma para a parte da seção que contém os reatores K117 e K118 é apresentado na Figura 14.

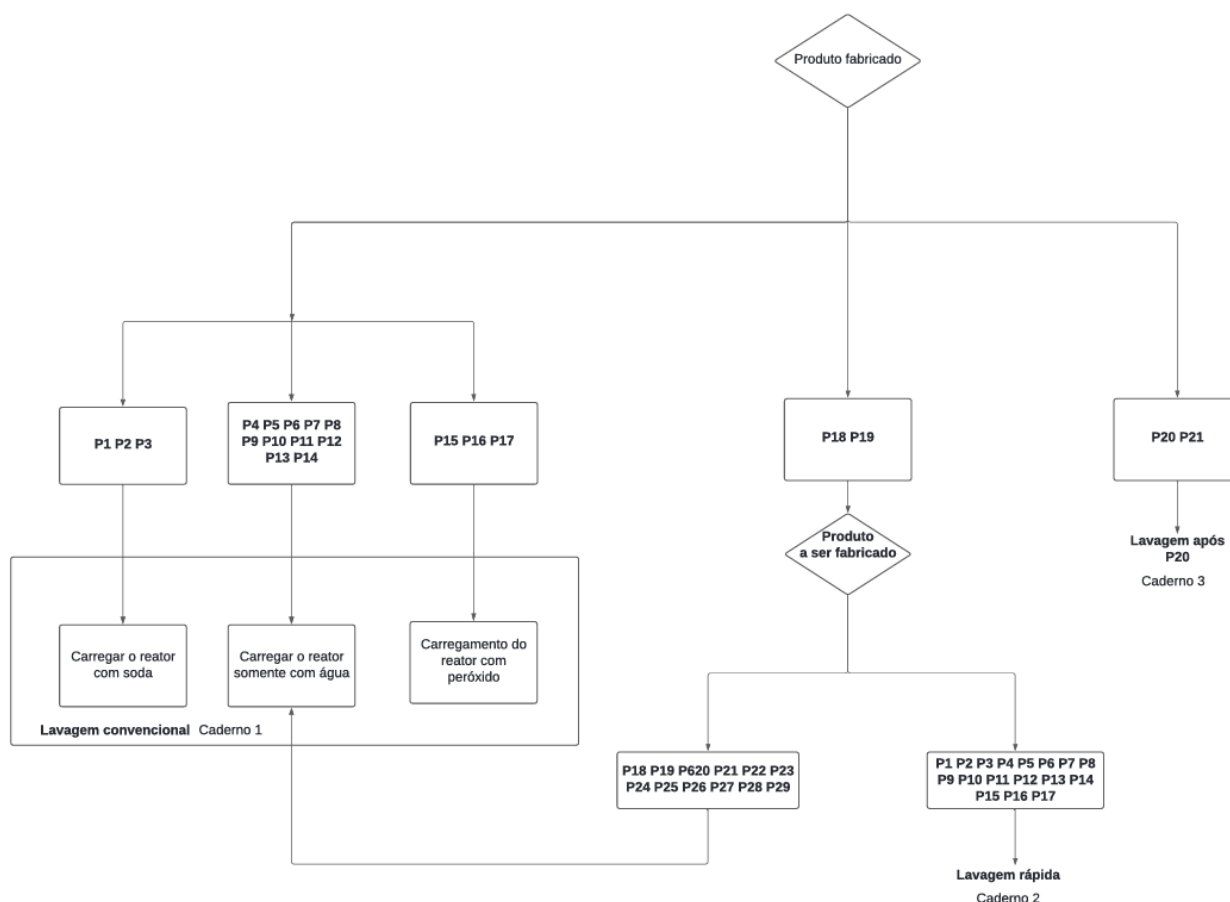


Figura 14 - Fluxograma para a parte da seção dos reatores K117 e K118.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Os cadernos de trabalho foram definidos da seguinte forma: Caderno de trabalho 1: Lavagem convencional (C), Caderno de trabalho 2: Lavagem rápida (A) e Caderno de trabalho 3: Lavagem pós P20. O paralelo com a versão anterior dos procedimentos de lavagem corresponde a (com a sigla da legenda do antigo nome do procedimento): Caderno 1: F + A + D + C + C2 + B, Caderno 2: E e Caderno 3: G. Assim sendo, oito tipos de lavagem foram reunidos em três cadernos.

No caso da seção 100 da área de fabricação, é necessário conhecer a produção seguinte. Existem dois tipos de produtos que, em função da produção seguinte, podem ser enxaguados com água quente (Lavagem rápida). Trata-se de produtos com químicas compatíveis que são fabricados com maior frequência. E outros que requerem uma atenção especial e que são fabricados com menos frequência que requerem uma lavagem completa com água nova. Assim, a separação dos tipos de lavagem é mais complexa neste caso.

A passivação e a descontaminação por serem mais específicas de certos produtos e precederem exatamente a produção dos mesmos foram realocadas à etapa 1 do seu respectivo Procedimento de Fabricação. A passivação e a descontaminação são dois processos utilizados na limpeza de reatores industriais, mas têm objetivos diferentes.

O objetivo da passivação é formar uma camada protetora na superfície interna do reator, utilizando agentes químicos. Por exemplo, para melhorar a resistência a produtos químicos agressivos (GOUJON, 2014). A descontaminação, por outro lado, envolve a remoção completa de quaisquer resíduos químicos, contaminação ou outras partículas que possam estar no reator (CHEMICAL ENGINEERING PROCESS, 2003). A descontaminação é utilizada, também, para “ambientar” o reator, e remover vestígios de água. Isto assegura que o reator está limpo e pronto para as reações seguintes.

5.1. A ferramenta

Os Fluxogramas foram utilizados para compreender a lógica envolvida na escrita do código e organização das planilhas de acordo com a lavagem a efetuar. Mas o que é utilizado para determinar a lavagem a ser efetuada pelo operador, assim como armazenar e editar os procedimentos de lavagem pela Assistência de Processos é a ferramenta desenvolvida. O objetivo é utilizar uma planilha do Google automatizada (a ferramenta) criada a partir do código Google App Script do Google Sheet. O utilizador só tem que selecionar o produto fabricado anteriormente no reator e o procedimento de lavagem correspondente será apresentado. A Figura 15 mostra um código comentado.

```

1 function hideRow1 () // cada caderno tem uma função com um nome diferente
2
3 { //constantes do código
4   const ss = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet();
5   const sheet = ss.getSheetByName("Cahier1"); // aqui estamos trabalhando com a planilha "Cahier 1".
6
7   const key = sheet.getRange("E3").getValue();//onde ele recuperará informações sobre o tipo de lavagem a ser feita
8
9   let lastRow = sheet.getLastRow();
10  let Cahier1 = sheet.getRange("A1:0"+ lastRow).getValues(); //identifica as células na planilha
11
12
13  if(key == "editor") /* Se a palavra-chave identificada em "const key" for "editor", ele executará os seguintes comandos: */
14
15  {
16    sheet.showRows(11,77); // mostrar linhas da linha 11 até 11+77=88
17    sheet.showColumns(1,16); // mostrar colunas da linha 1 até 1+16=17
18  }
19  else //aqui ele identifica quais linhas devem ser exibidas ou ocultadas para cada produto
20  {
21    sheet.hideRows(11,77); //Ocultar colunas de 11 a 88
22    sheet.hideColumns(1,1); //ocultar coluna 1
23    sheet.hideColumns(13,4); //Ocultar colunas de 13 a 17
24
25    for(row = 0; row < Cahier1.length; row++)
26    {
27      if(Cahier1[row] [12] == key | Cahier1[row] [12] == 'etape commune' || Cahier1[row] [13] == key |
28      Cahier1[row] [14] == key | Cahier1[row] [15] == key)
29      {
30        sheet.showRows(row+1);
31      }
32    }
33  }
34 }

```

Figura 15 - Código comentado sobre a parte desenvolvida para o reator K209.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Cada uma das partes das seções que contém os reatores: K209, K212 e K117/K118 tem uma planilha Google. Cada planilha tem um código, como mostra a Figura 15. Cada caderno tem o seu próprio código. A estrutura de escrita do código é idêntica para todos os cadernos, mudando apenas as variáveis "nome do caderno" e "célula do nome do produto".

A interface do utilizador, que pode ser o operador ou o engenheiro que vai editar o procedimento. Quando for o engenheiro, ele deverá colocar na opção editar e somente o engenheiro tem a permissão necessária para isso. A interface para o operador, é apresentada na Figura 16 e 17.

Lavagem da parte da seção do reator K209		
1	Inserir a produção anterior ----->	P32
2	Clicar----->	P32 P33 P34 P35 P36 P37 P38 P39 P40 P41

Figura 16 - Interface do utilizador: Inserir a lavagem anterior.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Lavagem da parte da seção do reator K209		
1	Inserir a produção anterior ----->	P32
2	Clicar----->	Caderno 1 - Lavagem de refluxo com água

Figura 17 - Interface do utilizador: visualização do procedimento de lavagem a realizar.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Os operadores selecionam o ciclo de produção anterior, como mostra a Figura 16. O Departamento de Assistência de Processos pode facilmente editar, atualizar e adicionar novos produtos neste procedimento único.

A Tabela 4 resume os resultados obtidos:

Tabela 4. Recapitulativo dos resultados obtidos.

Indicador de Resultado	Antes da Padronização	Após a Padronização
Número de procedimentos de lavagem	30	12
Tempo médio de atualização	1h30 horas/procedimento	15 minutos/procedimento
Consistência na execução dos procedimentos	Variável	Padronizada
Satisfação dos operadores	Baixa	Alta
Solução digital	Não havia ferramenta	Criação de ferramenta para armazenar os procedimentos de lavagem, registrar dados das lavagens realizadas e organizar os procedimentos.
Tempos de execução dos procedimentos	Não havia registros sistemáticos de tempo	Agora há registro de tempo de execução dos procedimentos de lavagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a padronização e implementação da ferramenta do Google Sheets com o Google App Script nos processos de lavagem de reatores industriais. Antes da padronização, havia 30 procedimentos distintos de lavagem, muitos que eram redundantes. E não existiam registros dos tempos de execução desses procedimentos. Com a implementação da ferramenta e a simplificação dos processos, o número de procedimentos foi reduzido para 12. Uma boa eliminação de desperdícios, conforme os valores do Lean.

Além do mais, a ferramenta permitiu o registro de informações das lavagens feitas para que seja possível consultar futuramente. A padronização gerou melhorias na consistência da execução dos procedimentos, que antes variavam na área de fabricação. A introdução da ferramenta possibilitou uma execução mais uniforme. Isso se alinha com o conceito Lean de padronização do trabalho. A satisfação dos operadores aumentou, por conta da maior clareza e eficiência. Todos esses resultados representam que a implementação de uma ferramenta de organização e

armazenamento de dados contribui para a otimização dos processos de lavagem, fazendo com que a rotina na área de fabricação seja mais eficiente e confiável. Tudo isso, graças ao fato de aplicar conceitos Lean e suas ferramentas, assim fazendo a eliminação de desperdícios e melhoria contínua.

6. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu realizar uma revisão sobre procedimentos de lavagem. Foi feita também uma análise crítica dos procedimentos de lavagem de reatores industriais na unidade em questão. Trabalhando diretamente na padronização e otimização dos processos operacionais. A partir do estudo detalhado dos procedimentos existentes, identificou-se a necessidade de eliminar redundâncias e simplificar as etapas, de modo a melhorar a eficiência e a segurança das operações. A aplicação de uma metodologia Lean foi importante nessa reestruturação, o que proporcionou uma gestão mais ágil e eficaz dos procedimentos de lavagem.

Os procedimentos operacionais foram simplificados, com o objetivo de rever 100% dos procedimentos de lavagem para as seções 100 e 200. O resultado final consiste em três planilhas Google, cada uma com um máximo de três cadernos, em comparação com os 30 tipos de lavagem que existiam anteriormente para todos os reatores.

O código facilitará a atualização dos procedimentos operacionais e a adição de novos produtos. O acesso e a utilização do procedimento operacional pela área de fabricação foram otimizados. Esta nova versão está atualmente sendo testada pelo área de fabricação. A implementação de um novo sistema de documentação, centralizado e acessível por meio de uma ferramenta digital feita com Google App Script, mostrou-se uma solução prática e eficiente. Esse sistema facilitou a uniformização das práticas de lavagem, independentemente do produto fabricado. A inclusão de figuras de segurança e a eliminação de procedimentos obsoletos ajuda na clareza e na relevância das instruções fornecidas aos operadores.

Também, a integração das equipes de engenharia, assistência de processos e operadores no desenvolvimento e implementação das mudanças destacou a

importância da colaboração multidisciplinar para a melhoria contínua dos processos industriais. O ciclo PDCA (Planejar, Executar, Verificar e Agir) foi uma ferramenta fundamental para garantir que as alterações fossem adaptadas às necessidades reais da produção, o que permitiu ajustes rápidos e eficazes conforme as exigências do processo evoluíam.

Como conclusão, a padronização dos procedimentos de lavagem, aliada à utilização da ferramenta do Google App Script e à metodologia Lean, contribuiu para a eficiência das operações, a segurança e a sustentabilidade da produção. Assim, este estudo reforça a importância de uma abordagem sistemática e colaborativa para a resolução de problemas na indústria química.

7. BIBLIOGRAFIA

1. SOLVAY. Notre entreprise. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/our-company>. Acesso em: 26 jul. 2023.
2. SOLVAY. Solvay en France. Disponível em: <https://www.solvay.fr/le-groupe/solvay-en-france/donnees-cles>. Acesso em: 26 jul. 2023.
3. SOLVAY. Annual integrated report Solvay 2022. Disponível em: <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2023-05/solvay-2022-annual-integrated-report.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2023.
4. SOLVAY. Site de Clamecy. Disponível em: <https://www.solvay.fr/implantations/clamecy>. Acesso em: 27 jul. 2023.
5. YANG, Jifeng. Novel strategies for cleaning-in-place operations. 2018.
6. CASTILLO-MARTINEZ, Ana et al. Proposal for a maintenance management system in industrial environments based on ISO 9001 and ISO 14001 standards. Computer Standards & Interfaces, v. 73, p. 103453, 2021. DOI: 10.1016/j.csi.2021.103453.
7. AGUS, Purwanto et al. The effect of implementation integrated management system ISO 9001, ISO 14001, ISO 22000 and ISO 45001 on Indonesian food industries performance. Test Engineering and Management, v. 82, n. 20, p. 14054-14069, 2020.
8. GRUNDEMANN, Laura; GONSCHOROWSKI, Vera; FISCHER, Norbert; SCHOLL, Stephan. Cleaning waste minimization for multiproduct plants: transferring macro batch to micro conti manufacturing. Journal of Cleaner Production, v. 24, p. 92-101, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.11.010.
9. URRUTIA, Jone; ASUA, Jose M. Reactor fouling in emulsion polymerization. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 60, n. 29, p. 10502-10510, 2021.
10. CHEW, John YM et al. Mechanisms in the solvent cleaning of emulsion polymerization reactor surfaces. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, n. 13, p. 4605-4616, 2005.

11. IBRAR, Ibrar et al. A review of fouling mechanisms, control strategies and real-time fouling monitoring techniques in forward osmosis. *Water*, v. 11, n. 4, p. 695, 2019.
12. JIN, Guoxing et al. Intelligent clean-in-place (CIP) system in beverage (healthy water) cleaner production. *Food Control*, v. 168, p. 110877, 2025. DOI: 10.1016/j.foodcont.2024.110877.
13. MAUERMANN, Marc et al. Minimizing the environmental footprint in food production: A case study on the improvement of an industrial tank cleaning process through adaptive cleaning devices. *Journal of Food Process Engineering*, v. 47, n. 3, p. e14594, 2024. DOI: 10.1111/jfpe.14594.
14. GOODE, Kylee R. et al. Fouling and cleaning studies in the food and beverage industry classified by cleaning type. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 12, n. 2, p. 121-143, 2013.
15. FRYER, P. J.; ASTERIADOU, Konstantina. A prototype cleaning map: a classification of industrial cleaning processes. *Trends in Food Science & Technology*, v. 20, n. 6-7, p. 255-262, 2009.
16. HU, Hetian; JOYNER JANAHAR, Jerish; GUDURU, Sai Sasidhar; BALASUBRAMANIAM, V.M.; YOUSEF, Ahmed E.; TING, Edmund; LAZAREV, Alexander V. Cleaning and sanitization method for a pilot-scale ultra-shear equipment for liquid food processing. *Food Control*, v. 168, p. 110922, 2025. DOI: 10.1016/j.foodcont.2024.110922.
17. KAUFMANN, O. W.; ANDREWS, R. H.; TRACY, P. H. Further studies on in-place cleaning. 1955.
18. ADAMA, Kenneth; ONYEACHU, Ikenna. The corrosion characteristics of SS316L stainless steel in a typical acid cleaning solution and its inhibition by 1-benzylimidazole: Weight loss, electrochemical and SEM characterizations. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, p. 214-222, 2022.
19. ONYEACHU, Ikenna; ADAMA, Kenneth. The impact of cleaning processes on the performance of food processing equipment. *Journal of Food Engineering*, v. 132, p. 15-24, 2020.
20. WANG, Hongfen. Application of high pressure water jet technology in cleaning polymerization vessel. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. p. 012090.

21. ADEGBITE, Babatunde Moshood. Applying lean principles to eliminate project waste, maximize value, cut superfluous steps, reduce rework and focus on customer centricity. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, v. 1768, p. 1760, 2024. DOI: 10.38124/ijisrt/IJISRT24FEB1682.
22. HALL, C. A. Environmental impacts of cleaning processes in the chemical industry. *Journal of Environmental Management*, v. 64, n. 3, p. 297-307, 2004.
23. RIBEIRO, P. et al. The impact of the application of lean tools for improvement of process in a plastic company: a case study. *Procedia Manufacturing*, v. 38, p. 765-775, 2019. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.104.
24. ISLAM, A. S. M. Touhidul. Lean applications to improve chemical laboratory production capacity in the textile industry. *MEST Journal*, v. 11, n. 1, 2023. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0002-6079-3167>. Acesso em: 12 out. 2024.
25. RICHARDS, J. R.; CONGALIDIS, J. P. Measurement and control of polymerization reactors. *Computers & Chemical Engineering*, v. 30, n. 10-12, p. 1447-1463, 2006.
26. GOUJON, C. Conséquences des nettoyages chimiques sur la réactivité de la surface externe des tubes de générateurs de vapeur des centrales nucléaires à réacteur à eau sous pression. 2014. Thèse (Doctorat) – Paris 6, 2014.
27. CHEMICAL ENGINEERING PROCESS. Séparation des résidus des réacteurs. v. 99, n. 11, p. 72-77, 2003.
28. ALVAREZ, D.; GARRIDO, N.; SANS, R.; CARRERAS, I. Minimization–optimization of water use in the process of cleaning reactors and containers in a chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 12, n. 7, p. 781-787, 2004.
29. HEATHAMSTER. How to choose CIP chemicals. Disponível em: <https://heathamster.com/how-to-choose-cip-chemicals/>. Acesso em: 20 jul. 2023.

ANEXOS

Anexo 1 - Matriz de lavagem para a seção 200 - reator K209.

SEÇÃO 200

PRODUTO FABRICADO NO K209	PRODUTO A SER FABRICADO													
	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41	P42	P43	P44	P45
P32		G	G + A2	G	G	G	G	G	G	G	G + A3	G		G
P33	G		G + A2	G	G	G	G	G	G	G	G + A3	G		G
P34	I	I		I	I	I	I	I	I	I	I + A3	I		I
P35	H	H	H + A2		H	H	H	H	H	H	H + A3	H		H
P36			R2		R1									
P37	K	K	K + A2	K	K		K	K	K	K	K + A3	K		K
P38	L	L	L	L	L	L		L	L	L	L + A3	L		L
P39	H	H	H + A2	H	H	H	H		H	H	H + A3	H		H
P40	H	H	H + A2	H	H	H	H	H		H	H + A3	H		H
P41	H	H	H + A2	H	H	H	H	H	H		H + A3	H		H
P42	H	H	H + A2	H	H	H	H	H	H	H		H		H
P43	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3 + A3			
P44	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3 + A3			
P45	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3 + A3			

Anexo 2 - Nome da lavagem, letra de referência e duração da seção 200 - reator K209.

Referência	Tipo de lavagem	Duração (h)
A2	Descontaminação IPA K209	10
A3	Descontaminação acetona K209	10
G	Lavagem refluxo com água nova (3m3 3h)	8
H	Lavagem refluxo com água nova (6m3 6h)	9
I	Lavagem especial após P34	24
K	Lavagem especial após P37	15
L	Lavagem especial após P38	-
R1	Enxague Acetona inter P36	2
R2	Enxague IPA após P36	1
R3	Lavagem com água/TeR + enxague com acetato de etila	4

Anexo 3 - Matriz de lavagem para a seção 200 - reator K212.

SEÇÃO 200					
PRODUTO FABRICADO NO K212	PRODUTO A SER FABRICADO				
	P46	P47	P48	P49	P50
P46	* C + S	C + A1	C	C	C+P2
P47	D + S		D	D	D
P48	B + S + P	B + A1		T	B
P49	K2 + S + P	K2 + A1	K2		K2
P50	B1 + S + P	B1 + A1	B1	B1	

Anexo 4 - Nome da lavagem, letra de referência e duração da seção 200 - reator K212.

Referência	Tipo de lavagem	Duração (h)
A1	Descontaminação IPA K212	10
B	Lavagem à refluxo (4 m3 --> 3h) água reciclada	8
C	Lavagem refluxo carbonato em solução de água semi-nova	24
D	Lavagem especial após P47	16
K2	Lavagem especial após P49	15
S	Sanitização	10
P	Passivação antes do P46	5
P2	Passivação antes do P50	5
T	Enxague do reator/TeR	1