

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL/USP

CARINA GONÇALVES HELENO

**Aplicação das estratégias de manutenção preditiva para determinação do melhor momento
de limpeza de um reator polimérico**

Lorena

2021

CARINA GONÇALVES HELENO

**Aplicação das estratégias de manutenção preditiva para determinação do melhor momento
de limpeza de um reator polimérico**

Monografia de conclusão de curso apresentada à
Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP como
requisito parcial para a conclusão do curso de
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Félix Monteiro Pereira

Versão Original

Lorena

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Heleno, Carina Gonçalves
Aplicação das estratégias de manutenção preditiva para determinação do melhor momento de limpeza de um reator polimérico / Carina Gonçalves Heleno; orientador Félix Monteiro Pereira. - Lorena, 2021.
54 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2021

1. Polimerização. 2. Reator polimérico. 3. Troca térmica. 4. Manutenção preditiva. I. Título. II. Pereira, Félix Monteiro, orient.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu força e saúde para concluir mais esta etapa da minha vida e sempre me guiando para melhor caminho.

Aos meus queridos pais, por sempre me apoiarem e nunca medirem esforços para verem o meu crescimento profissional e pessoal. Por todo amor e dedicação, sendo minha base em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado, por sempre me incentivar e estar ao meu lado em todos os momentos. Muito obrigada pelo incondicional amor, carinho e apoio.

Aos meus queridos amigos e familiares, que mesmo distantes, me incentivaram e comemoraram comigo todas as minhas vitórias.

Aos meus amigos de Lorena, que se tornaram uma família para mim e compartilharam comigo estes anos de graduação. Obrigada por toda a amizade e carinho.

Aos meus líderes durante o meu estágio na indústria que contribuíram para o meu crescimento profissional.

Por fim, gostaria de agradecer os colegas e professores que direta ou indiretamente contribuíram para a minha trajetória acadêmica, em especial meu orientador Prof. Dr. Félix Monteiro Pereira.

RESUMO

HELENO, C. G. Aplicação das estratégias de manutenção preditiva para determinação do melhor momento de limpeza de um reator polimérico. 2020, 54p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

As indústrias químicas vivem um momento de alta competitividade pelo mercado consumidor. Diante deste cenário, as empresas, para cativarem mais clientes, buscam estratégias para oferecer produtos com um preço mais baixo, porém com uma alta qualidade. Polímeros são de grande importância para o mercado por serem utilizados em uma diversidade de aplicações, porém a polimerização em emulsão é um processo exotérmico que exige um acompanhamento específico para garantir a segurança do sistema e gerar um produto que atenda as exigências do cliente. Ter controle das variáveis que alteram de alguma forma o processo, e conhecimento dos desvios máximos que possam ocorrer, mas que mantenham a alta qualidade e produtividade, são de grande importância para o sucesso da planta industrial. O presente trabalho apresenta um estudo de caso relacionado com estratégias da manutenção preditiva, envolvendo o acompanhamento do desempenho das reações de polimerização em diferentes produtos em planta de dispersões aquosas, visando traçar as curvas de comportamento do reator a fim de determinar o melhor momento para limpeza do mesmo. Os resultados obtidos permitiram identificar de que forma as incrustações influenciam nas variáveis de processo e nas trocas térmicas do sistema, com uma modelagem em MATLAB, que apresentou baixa porcentagem de erro, o modelo identifica a partir dos desvios em um conjunto de variáveis o melhor momento para realizar as limpezas no reator polimérico.

Palavras-chave: Polimerização. Reator Polimérico. Troca Térmica. Manutenção preditiva.

ABSTRACT

HELENO, C. G. Application of predictive maintenance strategies to determine the best cleaning time for a polymeric reactor. 2020, 54p. Monograph (Graduation in Chemical Engineering) – Escola de Engenharia de Lorena, University of São Paulo, Lorena, 2020.

The chemistry industry lives a moment of high competitiveness for the consumer's market. Ahead of this scenario, the companies, to captivate more clients, search for strategies to offer product at a lower price but maintaining high quality. Polymers are of great importance to the market, for their high range of applications, but the polymerization by emulsion is an exothermic process that demands a specific monitoring to assure the system safety and generate a product that meets the consumers requirements. Having the control of the variables that affect in anyhow the process, and the knowledge of the maximum deviations that can occur without losing the high quality and productivity, are of great importance to the success of the industrial plant. This dissertation presents a case study related to strategies of predictive maintenance, involving monitoring the performance of the polymerization reactions in different products in dispersions plants, aiming to trace the reactor behavior curves, in order to determine the best time to clean it. The results obtained allowed the identification of how the inlays influence the variables of the process and the heat exchange of the system, with modeling in MATLAB, that presented low error percentage, the model identifies based on the deviations in a set of variables the best moment to realize the cleaning in the polymeric reactor.

Keywords: Polymerization. Polymeric Reactor. Heat Exchange. Predictive Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação das etapas da polimerização em emulsão	15
Figura 2 - Processos de transferência de calor por convecção. (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural. (c) Ebulação. (d) Condensação.....	18
Figura 3 - Esquematização da torre de resfriamento contracorrente	20
Figura 4 - Tipos de manutenção de acordo com o momento em que é realizada.....	22
Figura 5 – Comparação do comportamento dos parâmetros de dosagem de matérias primas, abertura de válvula de água, temperaturas da camisa e temperatura da massa ao longo da primeira e da última batelada realizadas entre duas limpezas.....	27
Figura 6 - Reator encamisado	30
Figura 7 - Temperatura de saída da água da torre de resfriamento no período de 01/2020 até 11/2020	33
Figura 8 - Comportamento dos parâmetros de dosagem de matérias primas, abertura de válvula de água, temperaturas da camisa e temperatura da massa em uma batelada ideal	34
Figura 9 - Comportamento da curva de vazão de pré-emulsão em uma batelada ideal	35
Figura 10 - Comportamento da curva de temperatura da massa em uma batelada ideal	36
Figura 11 - Comportamento das curvas de temperatura de entrada e saída da camisa em uma batelada ideal	37
Figura 12 - Comportamento da curva de abertura da válvula de água em uma batelada ideal	38
Figura 13 - Relevância das variáveis no modelo de Kernel Naive Bayes	43
Figura 14 - Matriz de confusão	45
Figura 15 - Curva ROC	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de relevância das variáveis no modelo de Kernel Naive Bayes..... 44

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de troca térmica [m ²]
a, b, n	Massa dos reagentes A, B, N [kg]
C _p	Calor específico [J/kg.K]
ΔH _r	Entalpia de reação [J]
H _A , H _B , H _N	Entalpia dos reagentes A, B, N [J/kg]
ṁ	Vazão de monômeros [kg/s]
ṁ _c	Vazão mássica da camisa de refrigeração [kg/s]
Q _{camisa}	Taxa de resfriamento [J/s]
Q _{reação}	Taxa de geração de calor [J/s]
T ₁	Temperatura do produto [°C]
T ₂	Temperatura da água de entrada da camisa de refrigeração [°C]
T ₃	Temperatura da água de saída da camisa de refrigeração [°C]
U _{camisa}	Coeficiente de transferência de calor da camisa de resfriamento [W/m ² .K]
U _{reação}	Coeficiente de transferência de calor da reação [W/m ² .K]

Lista de Siglas

LMTD	Diferença Média Logarítmica de Temperatura
ROC	Características de Operação do Receptor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVO GERAL	13
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	MECANISMO DA POLIMERIZAÇÃO EM EMULSÃO	14
2.2	PROCESSO SEMI-CONTÍNUO	16
2.3	TROCA TÉRMICA	16
2.3.1	Transferência de calor em reatores encamisados	17
2.4	TORRE DE RESFRIAMENTO	19
2.5	MANUTENÇÃO PREDITIVA	21
2.6	MATLAB.....	22
2.6.1	Modelo de Naive Bayes (Kernel Naive Bayes).....	23
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	OBJETO DE PESQUISA	24
3.2	PROBLEMÁTICA	24
3.3	MÉTODO DE PESQUISA.....	25
3.4	MÉTODO TÉCNICO	25
3.5	PROPOSTA DE SOLUÇÃO	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	ANÁLISE DOS PRODUTOS E DA EXOTERMIA DE REAÇÃO.....	29
4.2	IDENTIFICAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL	30

4.2.1	Impacto das condições ambientais e da simultaneidade de processos	32
4.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	33
4.3.1	Análise de influência dos parâmetros.....	39
4.4	MODELAGEM INICIAL.....	40
4.4.1	Coeficiente de troca térmica.....	41
4.5	MODELAGEM FINAL.....	42
4.5.1	Resultados obtidos.....	45
5	CONCLUSÃO.....	48
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICES	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A humanidade tem estado em contato com polímeros há muito tempo, por meio de vários produtos que podem ser encontrados na natureza e das diversas aplicações dos polímeros sintéticos. Essa grande diversidade é originada por motivos econômicos, motivos de desempenho, amplas opções de moldagem e hábitos de consumo mundial que, em alguns casos, envolvem milhões de toneladas por ano (CORDEBELLO, 2003). O crescimento da indústria de polímeros foi determinado desde a substituição de materiais como madeira, metais e vidros, com aplicações na medicina, indústria automotiva, indústria eletrônica, entre outras.

Em 2018, de acordo com a companhia de inteligência comercial Transparency Market Research (2020), o mercado global de polímeros de emulsão foi avaliado em mais de 40 bilhões de dólares com uma previsão de crescimento de 6,2% ao ano. As emulsões a base de água oferecem vários benefícios, como a possibilidade de serem personalizadas para diferentes aplicações e a vantagem ambiental comparada com a utilização de solventes orgânicos.

Apesar de apresentar diversas vantagens, a polimerização em emulsão abrange processos complexos de transferência de massa e trocas térmicas, principalmente por serem reações exotérmicas que geram uma grande quantidade de energia na forma de calor. Para isso, fazem-se necessários a otimização e o controle dos reatores poliméricos, com o objetivo de reduzir custos, obter altos índices de produtividade e qualidade dos produtos.

As indústrias de grande porte apresentam um amplo portfólio, e para atender toda a demanda, possuem uma produção que abrange a existência de vários lotes em andamento. Cada produto é fabricado de acordo com uma receita que contém todas as informações, instruções de fórmula e processamento, que devem ser seguidas à risca, necessárias para a fabricação daquele determinado produto. A existência de vários lotes em andamento em um determinado momento apresenta inúmeras oportunidades para o operador do processo cometer erros, como um carregamento inadequado, descontrole da reação etc. Alguns erros geralmente levam a um lote fora da especificação ou até mesmo para uma condição perigosa, afetando a segurança de processo e a segurança do trabalho (PERRY et al., 2008).

Este trabalho apresenta um estudo das trocas térmicas e das variáveis que influenciam um processo de polimerização em emulsão, com base em análises do estado dos equipamentos envolvidos e no acompanhamento de vários lotes de produção de polímeros em emulsão em uma indústria química, nas suas condições reais de uso, visando melhorar os índices de produtividade e de qualidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desempenho das reações de polimerização em emulsão é susceptível a desvios devido ao comportamento de diversas variáveis que interferem no processo. Com a utilização das estratégias da manutenção preditiva, que são focadas em acompanhar processos e equipamentos a fim de antecipar alguma falha, é possível mapear e ter conhecimento do grau de interferência destas variáveis, visando obter melhores níveis de produtividade, qualidade e segurança.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo a determinação do melhor momento de limpeza para um reator polimérico a partir do estudo do histórico de alguns produtos selecionados e variáveis de interferência, aplicando as análises estratégicas da manutenção preditiva.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a situação atual do processo de polimerização na planta industrial estudada;
- Analisar a entalpia de reação de alguns produtos;
- Avaliar os impactos da temperatura ambiente e da simultaneidade de processos na planta industrial na polimerização do reator eleito;
- Propor um modelo de comportamento da limpeza do reator, utilizando o MATLAB.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma revisão da literatura envolvendo a fundamentação teórica utilizada na elaboração deste trabalho de conclusão de curso, iniciando com a descrição do mecanismo da polimerização em emulsão, envolvido no processo aqui estudado.

2.1 MECANISMO DA POLIMERIZAÇÃO EM EMULSÃO

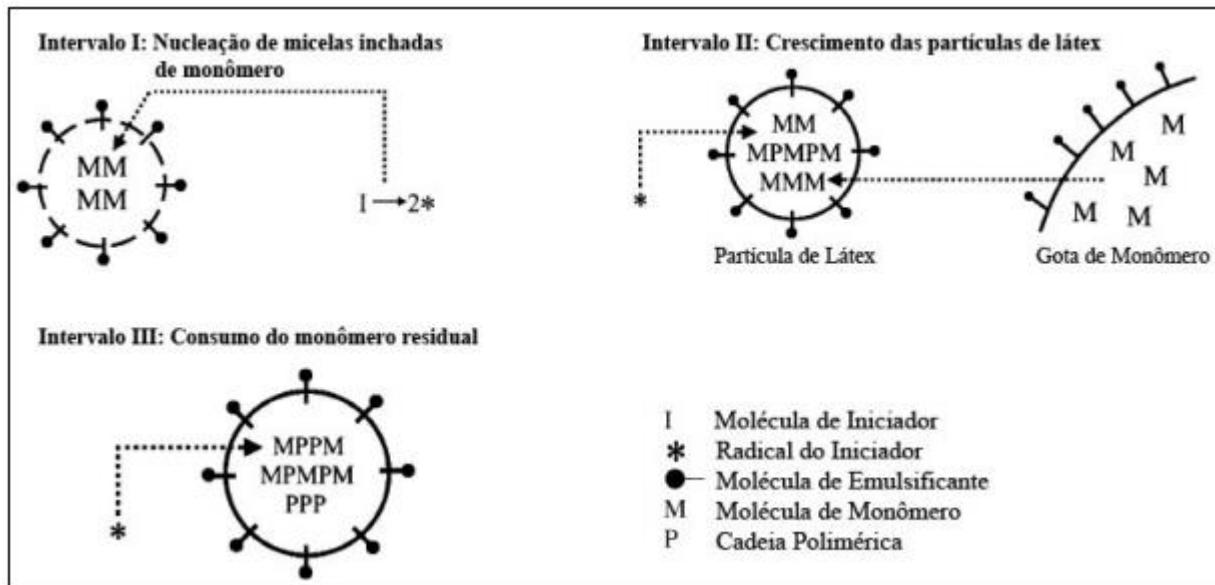
Polímeros são macromoléculas constituídas pela combinação de moléculas menores, denominadas monômeros, que formam as unidades estruturais do polímero. A formação de polímeros advém de uma reação química, a polimerização. As características moleculares e morfológicas do polímero dependem da sua formulação (monômeros, catalisadores, iniciadores) e das condições de processo (ASUA, 2008).

A polimerização em emulsão é um processo heterogêneo envolvendo a emulsificação de monômero relativamente hidrofóbico em um meio dispersante, normalmente a água (fase contínua), com a adição de emulsificantes e iniciadores. Devido à grande área interfacial gerada, é necessário um estabilizador eficaz, como surfactantes, que podem ser adsorvidos fisicamente para impedir a floculação e coagulação das partículas (SHAH, 2012). Para se adequar as necessidades desejadas, podem ser adicionadas substâncias como, por exemplo, biocidas, ácidos, agentes iniciadores, entre outros, a fim de modificar as características do polímero final. O resultado deste tipo de polimerização é uma dispersão estável em um meio basicamente aquoso para aplicação de produtos de látex (CHERN, 2006).

O meio dispersante é um componente inerte, mas de grande relevância por garantir o equilíbrio dinâmico do emulsificador entre as fases, permitir os fenômenos de transferência de monômero entre gotas e partículas, decomposição do iniciador e formação de radicais. A reação é controlada pelos mecanismos de polimerização por radicais livres advindos da decomposição de um iniciador hidrofílico, de maneira que a polimerização ocorra dentro das micelas. A água tem grande utilidade nesta fase por apresentar um meio ideal para formação de micelas, visto que os monômeros são relativamente insolúveis na água, e por sua baixa viscosidade permite um bom controle da temperatura do sistema reacional e do sistema de troca térmica do reator (MARINANGELO, 2010).

O processo de polimerização, segundo Thickett e Gilbert (2007), pode ser definido em três intervalos, como apresentado na Figura (1).

Figura 1- Representação das etapas da polimerização em emulsão



Fonte: Adaptado de Chern (2006)

Como mostra a Figura (1), a primeira etapa é a fase de nucleação micelar das partículas (intervalo I), onde ocorre a entrada do radical livre na micela contendo o monômero, propiciando a ocorrência de reação de propagação. Esta etapa é rápida e transitória, mas determina o tamanho e a distribuição das partículas. O sistema passa por alterações devido a nucleação, resultando no crescimento e no aumento da velocidade de polimerização até que o número de partículas seja definido. O término deste intervalo se dá imediatamente após o esgotamento das micelas, mantendo a partir deste ponto a taxa de polimerização constante (THICKETT; GILBERT, 2007).

No intervalo seguinte, a velocidade de polimerização tende a permanecer constante ou aumentar lentamente. As gotas de monômeros continuam sendo consumidas com as reações de propagação, fazendo com que as partículas aumentem de tamanho. Os monômeros determinam o final da etapa quando diminuem, visto que elas se reduzem para promover o aumento em volume das partículas (LOVELL, 2020).

O intervalo III se caracteriza pela diminuição gradual da taxa de polimerização e da concentração de monômeros nas partículas de polímeros. O monômero restante na fase aquosa é

consumido e o sistema passa a ser composto apenas por partículas com o seu interior preenchido de monômeros, se tornando mais viscoso. Com o aumento da conversão dos monômeros, a velocidade de polimerização decresce gradualmente, marcando o final da polimerização (LOVELL, 2020).

Os polímeros de emulsão são utilizados em uma ampla gama de aplicações, como borrachas sintéticas, adesivos, ligantes, pigmentos plásticos, aditivos para área de construção civil, compostos para forros automotivos (CHERN, 2006).

2.2 PROCESSO SEMI-CONTÍNUO

O processo de polimerização em emulsão pode ser realizado em reatores contínuos, em batelada ou principalmente em semi-contínuo (ou semi-batelada). No processo semi-contínuo, após a adição de uma carga inicial, a temperatura aumenta gradativamente até uma temperatura determinada pelos parâmetros do processo, quando simultaneamente inicia-se a dosagem de matérias-primas (HVALA et al., 2011).

Uma das principais características do processo de polimerização em emulsão em reator semi-batelada é a manipulação de forma independente das variáveis de entrada de monômeros (puros, em solução ou emulsionados), iniciadores, emulsificantes, velocidade e tipo de agitação, e temperatura (PALMA; GIUDICI, 2006).

Portanto, com esta possibilidade de controle da polimerização semi-batelada, é possível traçar o caminho da reação, atingir as taxas desejáveis de conversão, ajustar a estequiometria e alcançar a composição ou sequência de monômeros requerida (HVALA et al., 2011).

Para todos os processos semi-contínuos, a taxa a qual o monômero é introduzido na reação é de grande importância para o controle da concentração de monômero nas partículas e consequentemente o controle da sua liberação de energia, concedendo uma operação segura, fundamental quando se trata de processos exotérmicos (HARSONO et al., 2005).

2.3 TROCA TÉRMICA

As reações químicas são acompanhadas de liberação ou absorção de energia. Segundo Perry et al. (2008), a diferença entre a entalpia total de formação dos produtos e a entalpia dos reagentes

é chamada de calor da reação. A reação é denominada exotérmica quando o calor de reação é negativo, ou seja, quando há liberação de energia na forma de calor; e endotérmica quando esta diferença é positiva, havendo consumo de energia. O calor efetivo da reação depende da temperatura e das fases dos reagentes e do produto. É de grande importância para o controle do sistema, compreender com precisão o balanço energético da reação.

Plantas industriais químicas normalmente possuem sistemas de troca térmica devido a necessidade de promover ou remover energia em partes do processo. Manter as variáveis das reações químicas, como temperatura, dentro dos limites estabelecidos, é fundamental para a segurança do processo (FINKLER et al., 2014).

As reações de polimerização em emulsão são extremamente exotérmicas, ou seja, produzem calor, o que tende a aumentar a temperatura da reação, exigindo um sistema de refrigeração para o reator. Um reator polimérico pode se tornar instável quando sua superfície de transferência de calor apresenta uma falha ou quando a taxa de produção aumenta além do ponto crítico estabelecido (PERRY et al., 2008).

2.3.1 Transferência de calor em reatores encamisados

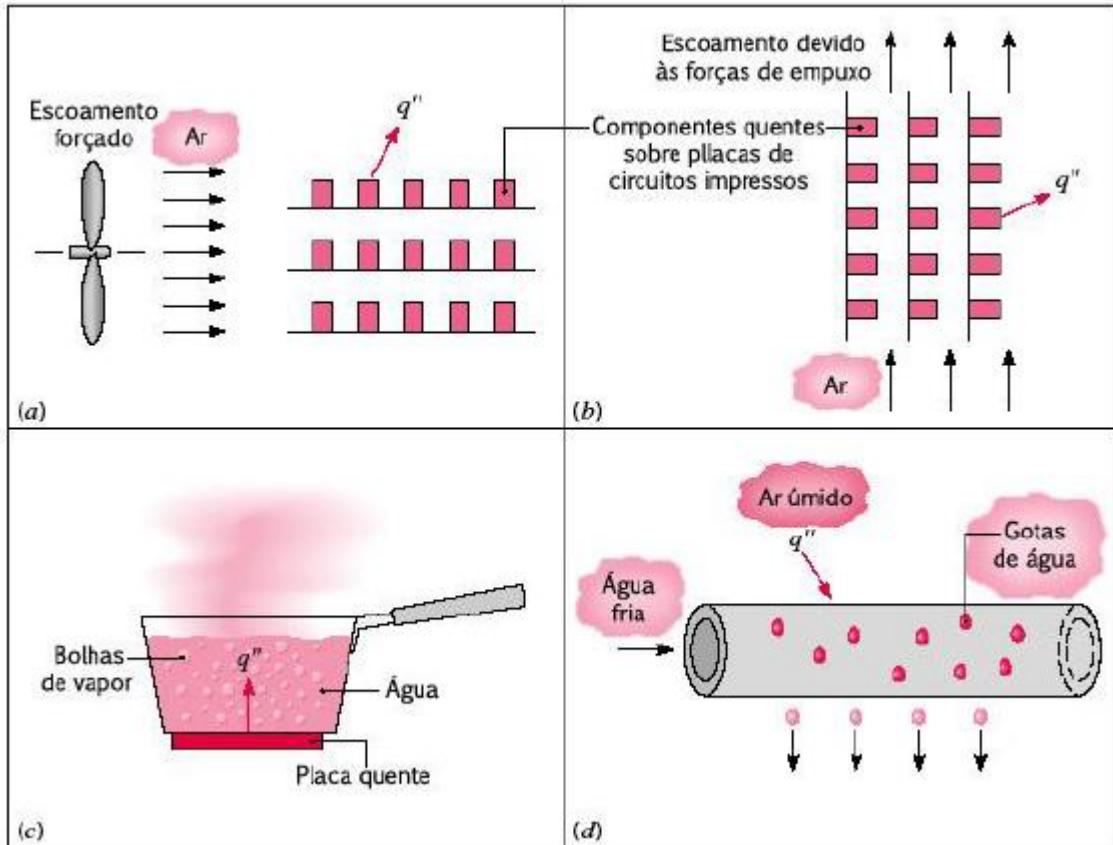
Calor é a energia transferida devido a uma diferença de temperatura. Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Nos reatores poliméricos encamisados a transferência ocorre principalmente por convecção e condução, sendo que, no caso das reações exotérmicas, o calor segue da reação para o sistema de refrigeração (AGOSTINI, 2006).

A condução, segundo o Incropera et al. (2014) é definida como o fluxo de energia, por meio de interações atômicas ou moleculares, das partículas mais energéticas para as menos energéticas. Temperaturas mais elevadas estão relacionadas com energias moleculares mais altas, portanto na presença de um gradiente de temperatura quando moléculas vizinhas de colidem, haverá uma transferência de energia.

A convecção é a transferência de calor devido ao movimento molecular aleatório e ao movimento global do fluido. Esta transferência ocorre por meio de um gradiente de temperatura entre um fluido em movimento e uma superfície. Como mostrado na Figura (2), a convecção é classificada de acordo com o escoamento do fluido, podendo ser: forçada (escoamento causado por meios externos); natural (escoamento induzido pela força do empuxo); ebulação; ou condensação

(INCROPERA et al., 2014).

Figura 2 - Processos de transferência de calor por convecção. (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural. (c) Ebulação. (d) Condensação.



Fonte: Incropera et al. (2014)

No caso do reator polimérico encamisado, há internamente a transferência de calor entre a reação exotérmica e a parede do reator, e externamente a transferência de calor através da parede do reator e o fluido refrigerante na camisa. O fluxo de transferência de calor do reator para a camisa é fornecido por um fluido térmico qualquer (água, óleo) proveniente de um trocador externo (FINKLER et al., 2014).

Entretanto existem fatores relacionados as trocas térmicas que podem gerar perdas e problemas de qualidade dos produtos. Um desvio que pode vir a acontecer é a formação de incrustações na parede interna do reator devido ao acúmulo de produtos e outros componentes, que causam resistência à transferência de calor. Em virtude disso, deve-se avaliar o crescimento das incrustações, estimando-se um fator para o tempo de uso do reator para, então, realizar controle e

limpezas periódicas. Também é importante o controle da qualidade do fluido de resfriamento na camisa do reator e da agitação, verificando se são suficientes para retirarem o calor excedente; possíveis desvios na temperatura das reações químicas podem interferir diretamente na qualidade do produto final (AGOSTINI, 2006).

2.4 TORRE DE RESFRIAMENTO

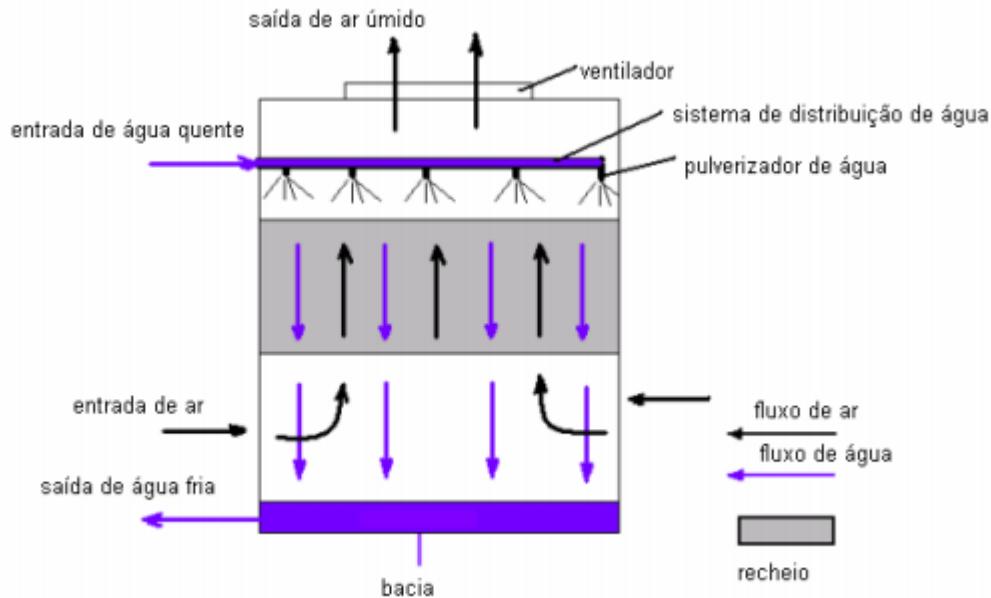
Segundo a definição de Hensley (2008), torre de resfriamento é um trocador de calor especializado onde ar atmosférico e água, advinda do processo industrial, entram em contato promovendo transferência de calor e massa. À medida que a água flui através da torre, um pequeno volume é evaporado reduzindo a temperatura da água, que resfriada é bombeada de volta para os equipamentos da planta industrial que necessitarem de refrigeração.

Trocadores refrigerados a ar são muito utilizados onde as variações sazonais nas temperaturas ambientes são relativamente pequenas, não correndo o risco de haver temperaturas extremas ou neve, que poderiam interferir diretamente na troca térmica (PERRY et al., 2008). Atualmente, as torres de resfriamentos representam para as indústrias uma forma de redução de custos operacionais e principalmente da redução de gastos de água, um importante tópico para a sustentabilidade, já que neste equipamento há a formação de um circuito fechado diante da reutilização da água (MELLO, 2008).

Para as torres de contato direto contracorrente, a água flui verticalmente para baixo e o ar flui verticalmente para cima. A água é alimentada no topo da torre, distribuída por tubulações com “furos”, que aumentam a superfície de contato, e pela ação da gravidade a água desce encontrando contracorrente o ar que evapora parte dela. À medida que o calor é absorvido pelo ar há a evaporação de parte da água e a restante é resfriada até a temperatura de saída desejada, que então é despejada na bacia de retorno para o processo. A troca de massa e energia ocorre através do recheio da torre que fornece uma superfície de contato eficaz entre a água quente e o ar atmosférico (STANFORD III, 2011).

A Figura (3) representa de forma simplificada o funcionamento da torre de resfriamento estudada.

Figura 3 - Esquematização da torre de resfriamento contracorrente



Fonte: Mello (2008)

Processos que utilizam diretamente a torre de resfriamento estão suscetíveis as variações das condições ambientais. As variáveis que são caracterizadas pala condição ambiental são a temperatura do bulbo úmido do ar (temperatura mais baixa que pode ser atingida pela evaporação de água em uma corrente de ar) e a sua pressão, porém essa pouco varia em uma mesma localidade. Entretanto, a temperatura do bulbo úmido é atingida devido as temperaturas que se alteram durante o dia, à noite e durante as estações do ano (OIKAWA, 2012).

Como os sistemas de água de resfriamento são integrados, ou seja, uma única torre geralmente fornece vários equipamentos da planta, principalmente quando há processos simultâneos, ocorrem fortes interações entre as variáveis do processo hidráulico e térmico. A complexidade maior é no nível térmico. Em cada equipamento, uma determinada carga de calor deve ser removida. E por outro lado, a temperatura de entrada da água na torre de resfriamento depende das temperaturas de saída e vazões de cada equipamento resfriado. A temperatura da água de saída na torre de resfriamento é determinada pelo seu desempenho e representa aproximadamente o valor de entrada dos equipamentos (CORTINOVIS et al., 2009).

Nível de umidade ambiente, temperatura da água de reciclagem, temperatura do ar são exemplos de perturbações que alteram a operação da torre de resfriamento. E uma vez alterada, a temperatura de saída da torre influencia em todos os equipamentos e processos que tem como

responsabilidade remover calor (MELLO, 2008).

2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção é definida como a associação de medidas técnicas e administrativas, com o objetivo de manter ou recolocar um dispositivo para um estado que ele desempenhe a função desejada, da maneira o qual foi projetado (XENOS, 1998). As atividades de manutenção, sejam elas corretivas, preventivas, preditivas, entre outras, são realizadas a fim de evitar a degradação dos equipamentos e instalações, causada pelo seu desgaste natural e pelo uso. Em paralelo, a manutenção também exerce um papel significativo na melhoria da produtividade e nos ganhos potenciais com a melhoria do seu gerenciamento (ALMEIDA, 2014).

Segundo Barbosa (2009), as estratégias de manutenção estão estabelecidas de modo a aperfeiçoar a operacionalidade e eficiência dos equipamentos, busca-se:

- Aumento de capacidade e disponibilidade da planta industrial;
- Maior confiabilidade das instalações;
- Melhora na segurança de processo e pessoas;
- Aumento da vida útil dos equipamentos e seus componentes;
- Redução das paradas de emergência e desmontagens desnecessárias.

As vantagens são elencadas principalmente com medidas sustentáveis que não agridam o meio ambiente e aliadas com a redução de custos.

A manutenção pode ser classificada de acordo com o momento e propósito no qual é realizada, como pode ser visto na Figura (4). Na manutenção preditiva objetiva-se a prevenção ou antecipação da falha, por meio de medições de parâmetros que indiquem as reais condições de funcionamento do equipamento e a evolução de uma falha, a tempo de serem corrigidas (ALMEIDA, 2014).

Figura 4 - Tipos de manutenção de acordo com o momento em que é realizada



Fonte: Alves (2019)

A manutenção preditiva possibilita o detalhamento do controle e da qualidade do produto, que é gerado através das análises de estado do equipamento nas suas condições reais de uso. Compara-se com uma inspeção sistemática de acompanhamento da situação das instalações (SANTOS; ARAÚJO; LIMA, 2018).

2.6 MATLAB

As ferramentas computacionais existentes possuem como objetivo simplificar o desenvolvimento de modelos numéricos e possibilitar a resoluções de problemas em diversas áreas, como na engenharia.

O MATLAB® é um *software* de alta performance para cálculos numéricos, modelagens e simulações, análises numéricas, desenvolvimento de algoritmos e gráficos (GILAT, 2006). O programa permite que o usuário, através de códigos, com uma linguagem intuitiva, implemente algoritmos, desenvolva estudos avançados e controle sistemas industriais (CHAPMAN, 2006). Além das operações estabelecidas pela linguagem MATLAB básica, o *software* possui diversas funções disponíveis para resolução de problemas específicos e de alta complexidade, ferramentas para problemas de processamento de sinais, controle de sistemas, redes neurais, entre outros (CHAPMAN, 2006).

2.6.1 Modelo de Naive Bayes (Kernel Naive Bayes)

O modelo Naive Bayes é um algoritmo, implementado em *softwares* como o MATLAB, utilizado para realizar predições baseado no teorema de Bayes. A partir de dados amostrais, denominados dados de treinamento, o algoritmo forma uma estimativa estatística, conhecida como método probabilístico bayesiano, para evidenciar características que compõem as dependências entre os dados de entrada no sistema e de saída, considerando os dados como independentes. Na primeira etapa, com os dados de treinamento, o método estima os parâmetros de uma distribuição de probabilidade. Na etapa seguinte, o método estabelece uma previsão calculada a partir da estatística das amostras conhecidas para analisar a probabilidade de amostras futuras pertencerem a cada classe (MATHWORKS, 2020).

A distribuição Kernel é apropriada quando os dados de entrada possuem uma distribuição contínua. Para cada dado de entrada que se modela com uma distribuição de Kernel, o classificador Bayes calcula uma estimativa de densidade de Kernel separada para cada classe com base nos dados de treinamento dessa classe (MATHWORKS, 2020).

A suposição de independência dos dados de entrada permite que o classificador de Kernel Naive Bayes estime os parâmetros necessários para uma classificação precisa, usando menos dados de treinamento do que muitos outros classificadores. Isso o torna eficaz para conjuntos de dados contendo muitos dados de entrada (MATHWORKS, 2020).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo foram descritos o objeto de pesquisa, a problemática e a proposta de solução do estudo. Além disso, foram apresentados o método de pesquisa e o método técnico que auxiliaram no desenvolvimento para a obtenção da resolução final.

3.1 OBJETO DE PESQUISA

O estudo foi realizado em uma indústria química, estruturada em mais de 80 países com mais de 390 unidades de produção, atuando nas seguintes divisões de produtos: químicos; materiais; soluções para a indústria; tecnologias para superfície; nutrição e cuidados pessoais; soluções para agricultura.

Este projeto foi realizado em uma planta de dispersões aquosas. A planta de Dispersões opera em uma produção contínua para atender a demanda de diversas áreas da indústria com a produção de adesivos, resinas para tintas, produtos para construção civil, produtos para carpetes e outros produtos intermediários.

Como a empresa possui diversos processos simultâneos com cerca de 100 produtos diferentes em sua produção mensal, o estudo se baseou somente na análise de alguns produtos específicos, com maiores volumes de produção, de um mesmo reator.

3.2 PROBLEMÁTICA

A Planta em questão não possui um sistema de identificação do grau de sujeira dentro do reator, com isso as limpezas do reator são realizadas conforme observação do produto, experiência com o processo e histórico das bateladas. Foi observada neste ponto, uma oportunidade de melhoria na eficiência do processo se fosse projetado um sistema que retornasse exatamente o momento limite em que uma limpeza fosse necessária, e, portanto, se obter um bom aproveitamento de todo o processo produtivo, gerando aumento da capacidade e diminuição de paradas desnecessárias.

3.3 MÉTODO DE PESQUISA

O presente trabalho teve como método de pesquisa a metodologia conhecida como “Estudo de Caso”. Baseado na estratégia de examinar e observar os acontecimentos reais quando os mesmos não podem ser manipulados. O estudo de caso é uma pesquisa empírica que lida com uma ampla variedade de evidências (como documentos e observações) analisando as condições contextuais que acredita que são pertinentes ao seu fenômeno de estudo, principalmente quando a relação entre contexto e fenômeno não estão bem definidas (YIN, 2001).

A abordagem seguida foi pelo método de pesquisa qualitativa, que conta com a observação de fatos, utilizando uma gama de procedimentos de coleta de dados. Objetiva-se uma compreensão profunda do contexto analisado. Em resumo, divide-se os atributos da pesquisa qualitativa em: características gerais, coleta de dados, objeto de estudo, interpretação dos resultados e generalização (GÜNTHER, 2006).

Para contribuir com a estratégia, o tipo de pesquisa definida foi a exploratória, segundo Gil (2008) a pesquisa é um processo sistemático de desenvolvimento do método científico com o objetivo de descobrir uma resposta mediante o emprego de procedimentos científicos. Gil (2008) define o nível de pesquisa exploratória como aquele que tem como finalidade esclarecer e desenvolver conceitos, formulando problemas e hipóteses mais precisas, e por fim proporcionando uma visão geral de tipo aproximativo acerca do fato.

O estudo de caso considera a execução de seis etapas principais, usadas como base para a realização do presente trabalho: delimitar a unidade-caso, definir uma teoria com base na literatura, coletar dados, analisar e interpretar os dados e geração de relatório (TOLEDO; SHIAISHI, 2009).

3.4 MÉTODO TÉCNICO

A solução se baseia na aplicação das estratégias de manutenção preditiva a fim de estabelecer o momento ideal para a limpeza do reator polimérico, de forma que este esteja alinhado com os melhores níveis de produtividade e qualidade do produto.

As polimerizações em emulsão seguem basicamente um mesmo perfil de temperatura durante o processo para as mesmas receitas e mesmo reator. A partir disso, avalia-se no histórico os momentos os quais houve algum desvio desse perfil. Estes desvios podem ser gerados pela

mudança na temperatura ambiente, que pode influenciar na temperatura de saída da torre de resfriamento e consequentemente na troca térmica com o reator; e pela formação de incrustações na parede interna do reator (devido as bateladas seguidas sem haver limpeza), que pode alterar a troca térmica da entre a reação exotérmica e a parede do reator.

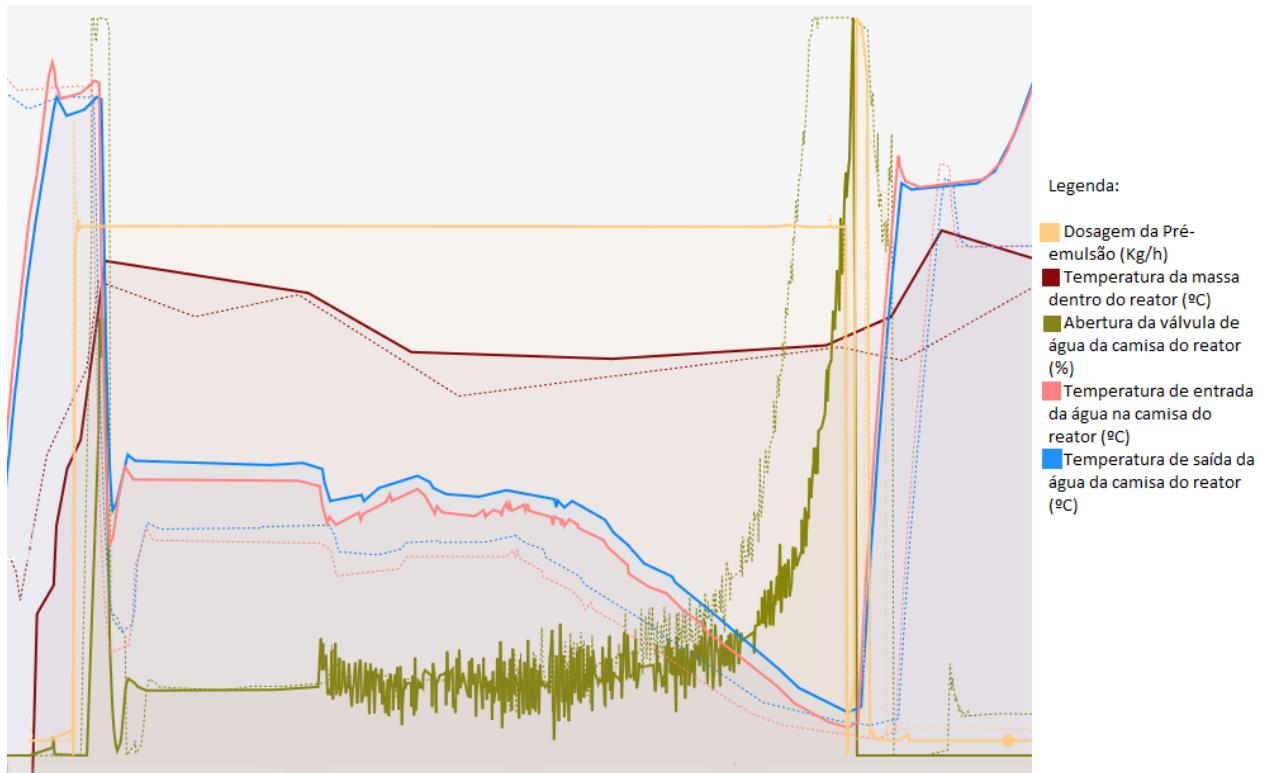
De acordo com as variações observadas, verificou-se as variáveis do processo relacionadas a troca térmica e que eram importantes para serem monitoradas. Entre elas a vazão e temperatura da água de resfriamento, as temperaturas de entrada e saída da camisa do reator, a temperatura do produto e a vazão e temperatura da água de reciclo para a torre de resfriamento. Definiu-se a correlação entre estas variáveis, para obter um modelo de comportamento da limpeza do reator.

3.5 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A solução proposta foi na análise e modelagem das variáveis que sofrem interferência direta pelos resíduos acumulados na parede interna do reator. Com as estratégias da manutenção preditiva, baseou-se em estabelecer o melhor momento para a realização de limpezas no reator, identificando quando a sujeira no reator estaria interferindo no processo de polimerização de um determinado tipo de produto de um reator específico, considerando os parâmetros de processo estabelecidos nas receitas dos produtos e os parâmetros de segurança estabelecidos pela equipe técnica de tecnologia global da empresa.

A Figura (5) mostra um exemplo das atuais condições de processo da planta, de um determinado produto, onde a linha cheia é de uma batelada logo após uma limpeza no reator e a linha tracejada se refere a última batelada antes de uma limpeza, ou seja, com o reator sujo.

Figura 5 – Comparação do comportamento dos parâmetros de dosagem de matérias primas, abertura de válvula de água, temperaturas da camisa e temperatura da massa ao longo da primeira e da última batelada realizadas entre duas limpezas



Fonte: O autor.

Pela Figura (5) observa-se que ao longo da polimerização, a válvula de abertura da água de resfriamento tem um baixo nível de abertura, mantendo a temperatura interna do reator dentro de uma mesma faixa de temperatura, e caso temperatura interna demande um maior resfriamento, a válvula ainda tem cerca de 80% de capacidade para abrir. Ao final da polimerização, estabelecida pelo fim da dosagem de pré-emulsão, a válvula é aberta totalmente para resfriar a massa dentro do reator, entretanto para a batelada em que o reator possui mais resíduos na parede interna, a válvula é aberta quase 100% antecipadamente e por um tempo bem maior comparado com a batelada em que o reator se encontra limpo.

A diferença das bateladas neste exemplo, mostra a interferência da sujeira no reator na dificuldade da troca térmica entre a camisa do reator e a massa, observando os valores de temperatura alcançados pela massa e pela camisa e a abertura da válvula da água de resfriamento.

Foi realizada uma reunião com os profissionais envolvidos para definir as etapas da pesquisa,

iniciando com um estudo das diversas bateladas realizadas ao longo de todos os meses de 2020, analisando a correlação entre as variáveis com o intuito de observar como os mesmos momentos da polimerização reagiam em diferentes bateladas, com reator sujo ou limpo ou após a batelada de outro produto. A partir deste resultado foram analisados os graus de interferência de cada variável no processo de trocas térmicas para estabelecer o modelo final. Levando em consideração que a planta é uma planta multipropósito (produz diversos produtos no mesmo reator), foi realizado também um estudo sobre as trocas térmicas entre a reação exotérmica e a camisa de resfriamento, através de cálculos das entalpias de reação da polimerização de cada produto e dos coeficientes de troca térmica da liberação de calor da reação e da absorção de calor pelo fluido refrigerante.

Após o estudo do comportamento de todos os parâmetros envolvidos na polimerização, foi feita uma modelagem em MATLAB, utilizando o algoritmo de Kernel Naive Bayes, com os dados retirados a partir histórico da planta, para servir como dados de treino e mostrar o desempenho do modelo. Por fim, apresentado uma boa acurácia, o sistema poderá ser utilizado para as bateladas futuras, e indicará se a batelada realizada está no limite para anteceder uma limpeza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo deste estudo consistiu, por meio de reuniões com os profissionais envolvidos, de uma análise criteriosa de todos os pontos que deveriam ser estudados. Neste passo foram identificadas e definidas as seguintes etapas a serem abordadas neste trabalho:

- Eleger os produtos de estudo;
- Determinar a entalpia de reação dos produtos eleitos;
- Avaliar os impactos das condições ambientais e da simultaneidade de processos;
- Verificar quais as variáveis de processo que seriam monitoradas;
- Definir a correlação das variáveis;
- Definir a fase do processo;
- Modelagem das variáveis;
- Definir o sistema de comportamento da limpeza do reator.

Para eleger os produtos de estudo e levantar a entalpia de reação dos produtos eleitos foi realizada a análise dos produtos e da exotermia de reação como mostrado a seguir.

4.1 ANÁLISE DOS PRODUTOS E DA EXOTERMIA DE REAÇÃO

A planta estudada é multipropósito, o reator em estudo possui um portfólio de mais de 30 produtos, portanto houve a necessidade de analisar o comportamento da polimerização e a entalpia de reação de cada um, para obter o modelo final de limpeza do reator fosse completo e atendesse todo o portfólio.

Inicialmente foi feita uma análise da entalpia de reação, H_r , de todos os produtos do reator em estudo, com o objetivo de identificar o comportamento da reação exotérmica e da liberação de calor de cada produto. Segundo Perry et al. (2008), esse valor é obtido pela entalpia específica dos monômeros multiplicado pelas respectivas massas, expressa pela Equação (1).

$$H_r = a \cdot H_A + b \cdot H_B + \dots + n \cdot H_N \quad (1)$$

Nessa análise foi observado que todos os produtos apresentam valores muito próximos de entalpia de reação, portanto o modelo final poderá se basear em alguns produtos selecionados, e

mesmo assim irá abranger por completo o portfólio.

O segundo ponto analisado foi em relação ao comportamento da reação de cada polimerização. Todo produto possui uma descrição de processo que contém os parâmetros de processo e segurança, assim como as etapas de preparação. Cada produto possui uma individualidade, porém todos apresentam um comportamento de reação e etapas de preparação semelhantes. Este fato reforça que o modelo final poderá se basear em alguns produtos e abranger todo portfólio.

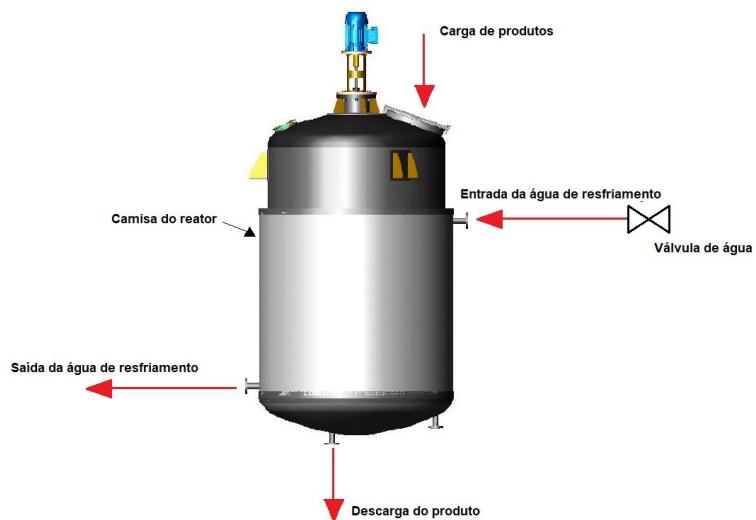
Dado o resultado do estudo preliminar, para as análises seguintes, foi acompanhada uma sequência de bateladas dos produtos com maiores valores de produção do determinado reator, que traziam um maior histórico para extrair exemplos do cenário atual e auxiliar na modelagem e validação de testes futuros.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL

Foi realizada uma análise do cenário atual para compreender o processo produtivo e elencar as variáveis potenciais que poderiam ser afetadas por um possível acúmulo de sujeira no reator, para poder acompanhá-las e estudá-las mais detalhadamente.

A Figura (6) ilustra com detalhes o reator encamisado em estudo.

Figura 6 - Reator encamisado



Fonte: Adaptado de MobilBatch (2021)

Foram observados os seguintes parâmetros:

- Temperatura da massa interna;
- Temperatura de entrada e saída da camisa do reator;
- Vazão de pré-emulsão;
- Abertura da válvula de vapor para a camisa;
- Abertura da válvula de água para a camisa;
- Rotação do agitador;
- Abertura da válvula de retorno para a torre de resfriamento.

O processo de polimerização se divide em três intervalos: (1) o período de aquecimento, onde a temperatura do reator é elevada até a temperatura de *set point* da reação; (2) inicia-se a dosagem de matérias-primas, a temperatura atingida deve ser mantida constante até o término da operação; (3) ao final da dosagem, ocorre o resfriamento da massa. Ao longo do processo encontram-se algumas diferenças de lote para lote devido às mudanças nas condições operacionais, que por conta da sequência de produção, tem-se mais de uma batelada seguida da outra sem que haja limpeza entre elas, ocasionando acúmulo de incrustações na parede interna do reator, e as mudanças nas condições ambientais, como temperatura externa e temperatura da água de resfriamento, que promovem alterações na transferência de calor.

Na sala de controle da planta, todos os produtos são analisados durante a sua produção, os operadores estabelecem o *set point* de cada parâmetro e o sistema ajusta as válvulas dependentes para que a temperatura se mantenha constante durante a polimerização, como previsto para cada produto. Através desta análise feita pelos operadores, desvios no comportamento dos parâmetros são reportados à supervisão da planta. Em questão das limpezas, uma diminuição na vazão de pré-emulsão é um ponto significativo para a operação de que há uma necessidade de limpeza. Além desse indicativo, a programação das bateladas do reator é feita seguindo uma sequência já estudada pelo time de engenharia, que leva em consideração as características e necessidades de cada produto, e já determina algumas limpezas que são necessárias perante as individualidades de cada produto e conhecimento pelo histórico da quantidade de bateladas seguidas que podem ser feitas sem limpeza.

Deste modo, em reuniões com os profissionais envolvidos, realizou-se análises mais criteriosas com o objetivo de compreender o comportamento de forma mais detalhada dos desvios nas trocas

térmicas e as variáveis de processo que sofriam alterações para sempre manter a temperatura da massa no *set point*.

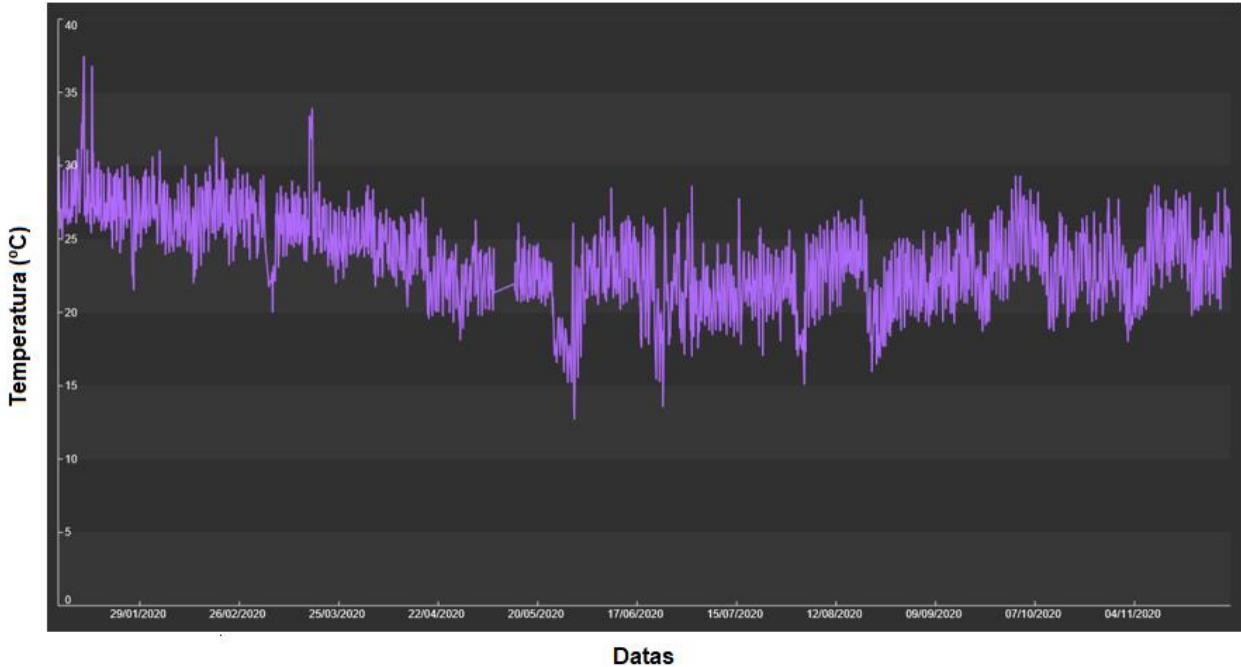
4.2.1 Impacto das condições ambientais e da simultaneidade de processos

A temperatura de entrada da camisa pode ser influenciada predominantemente pela temperatura da água vinda da torre de resfriamento, que pode sofrer variações de acordo com a temperatura de entrada no equipamento e a temperatura ambiente. Na planta química em estudo, a mesma torre é utilizada para todos os equipamentos, e principalmente para todos os reatores que trabalham em simultaneidade.

Com a primeira premissa de que se processos simultâneos ocorressem, e que acontecesse de todos os reatores poliméricos da planta estiverem em uma mesma fase do processo que exigisse resfriamento, a água vinda dos processos entraria na torre de resfriamento em uma temperatura elevada. E com a segunda premissa de que uma temperatura ambiente mais elevada, que pode ser encontrada em estações do ano mais quentes, como no verão, pode fazer com que água da torre não seja suficientemente resfriada quando em contato com o ar atmosférico.

Para validar esta proposição observou-se o comportamento da temperatura da água na saída da torre de resfriamento ao longo de um ano e como este comportamento modificava a temperatura de entrada na camisa do reator. Na Figura (7), tem-se as temperaturas da água na saída da torre de resfriamento durante o ano de 2020, de forma que fosse possível verificar a variável em todas as estações do ano, abrangendo a variação de temperatura que foram registradas na localidade da planta estudada.

Figura 7 - Temperatura de saída da água da torre de resfriamento no período de 01/2020 até 11/2020



Fonte: O autor.

A temperatura sofre diversas variações ao longo de um ano, mas como mostrado na Figura (7), os pontos se encontram na faixa de temperatura de 15°C a 30°C, concentrados principalmente entre 20 a 30°C. A cidade, onde está localizada a planta estudada, está em uma região que apresenta pequenas variações sazonais nas temperaturas ambientes, não originando grandes variações no equipamento. Adicionalmente, também pode ser observado que apesar de ter processos simultâneos na planta, este também não provoca uma grande interferência na torre de resfriamento.

Esta faixa de temperatura de 15°C na saída do equipamento é relativamente pequena para todo o processo, o que não provoca grandes diferenças na temperatura de entrada da água na camisa do reator, que poderia alterar o cenário de troca térmica do sistema. A premissa incialmente estabelecida, portanto, não apresenta, no processo em estudo, interferência significativa para ser evidenciada no modelo final.

4.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

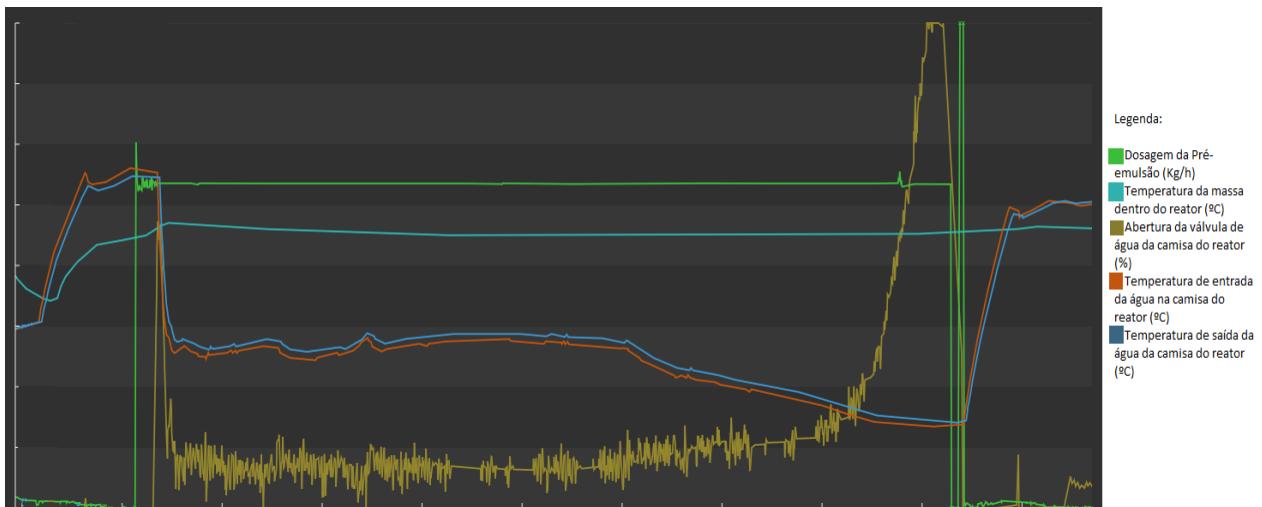
Os comportamentos de reação dos produtos estudados seguem um mesmo padrão e, em todas

as bateladas, foi observado um mesmo perfil para cada parâmetro do processo. Algumas variáveis sofrem forte influência e possuem grande importância no âmbito das trocas térmicas, pontos que foram selecionados para serem acompanhados e analisados com mais detalhes. Para poder identificar essa influência e possíveis desvios que possam ocorrer, primeiramente foi necessário ter conhecimento do comportamento ideal de cada parâmetro.

Devido à confidencialidade, este trabalho apresenta o comportamento dos parâmetros em gráficos, nos quais foram excluídos os rótulos de valores dos eixos das ordenadas e abscissas.

A Figura (8) mostra o comportamento ideal esperado de cada variável durante o tempo de uma batelada, cumprindo com os parâmetros ideais estabelecidos para essa polimerização, para a qualidade do produto e para a segurança do processo.

Figura 8 - Comportamento dos parâmetros de dosagem de matérias primas, abertura de válvula de água, temperaturas da camisa e temperatura da massa em uma batelada ideal



Fonte: O autor.

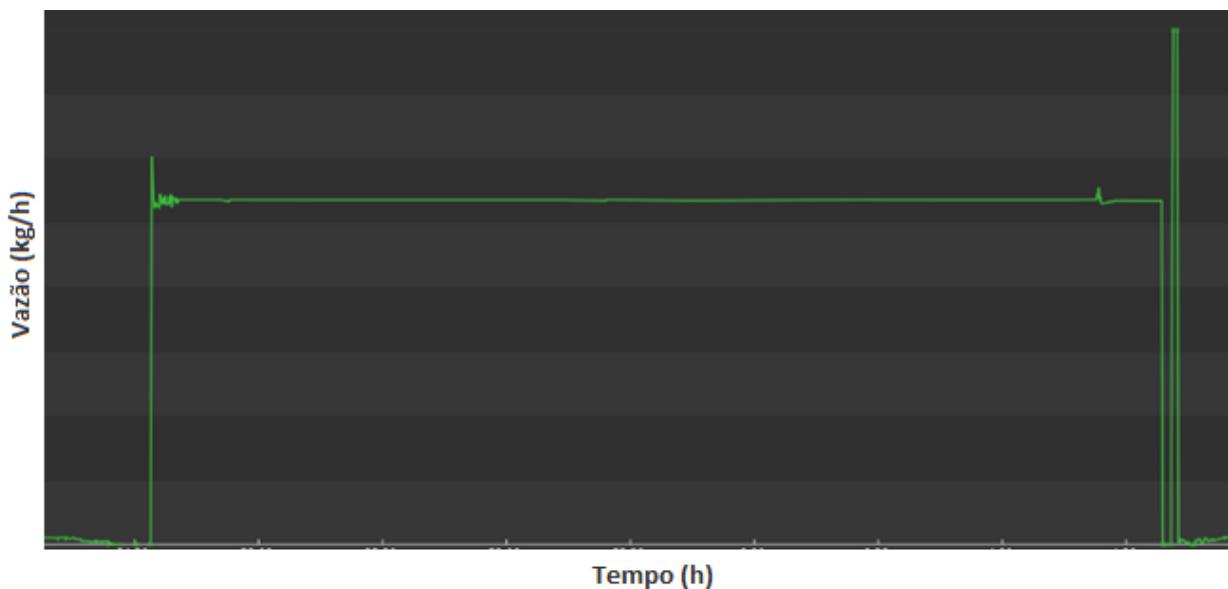
Na Figura (8) pode-se observar a vazão de pré-emulsão, a temperatura da massa interna do reator, a abertura da válvula de água vinda da torre de resfriamento para a camisa do reator e as temperaturas de entrada e saída da água da camisa do reator. Essas variáveis são cruciais para a análise das trocas térmicas durante uma batelada.

Além destas, foi analisada também a rotação do agitador, ponto importante para a estabilidade da polimerização e para controle de temperatura e consequentemente, das trocas térmicas. Considera-se que a agitação não apresentou mudanças significativas, pois durante todo o

processo e nas diferentes bateladas, essa se manteve em um mesmo padrão, assegurando que o sistema permanecesse totalmente homogêneo.

Iniciou-se o processo de polimerização em emulsão com uma carga inicial adicionada ao reator. Essa carga foi aquecida até uma determinada temperatura, nesse momento começa simultaneamente a dosagem da pré-emulsão até o final da reação, como pode-se observar na Figura (9).

Figura 9 - Comportamento da curva de vazão de pré-emulsão em uma batelada ideal

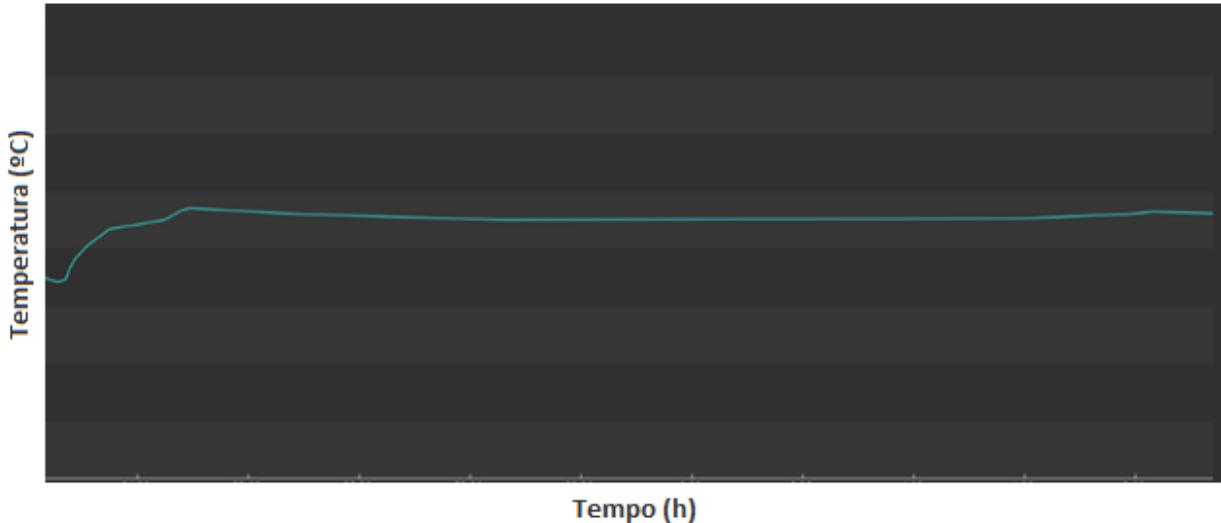


Fonte: O autor.

A pré-emulsão é a mistura de monômeros, água e surfactantes e, como visto na Figura (9), a mistura é dosada no reator em uma vazão constante durante todo o processo. Uma dosagem controlada de matéria-prima é de grande importância para o controle da reação exotérmica, da taxa de reação e da liberação de energia, pontos cruciais para a segurança do processo.

A vazão de pré-emulsão, assim como outros fatores como as taxas de reação e as trocas de calor com a camisa, têm influência na temperatura da massa no interior do reator. O perfil da temperatura da massa apresenta uma rampa de aquecimento no início até atingir a temperatura desejada e deve se manter na mesma até o final do processo, como pode ser visto na Figura (10).

Figura 10 - Comportamento da curva de temperatura da massa em uma batelada ideal



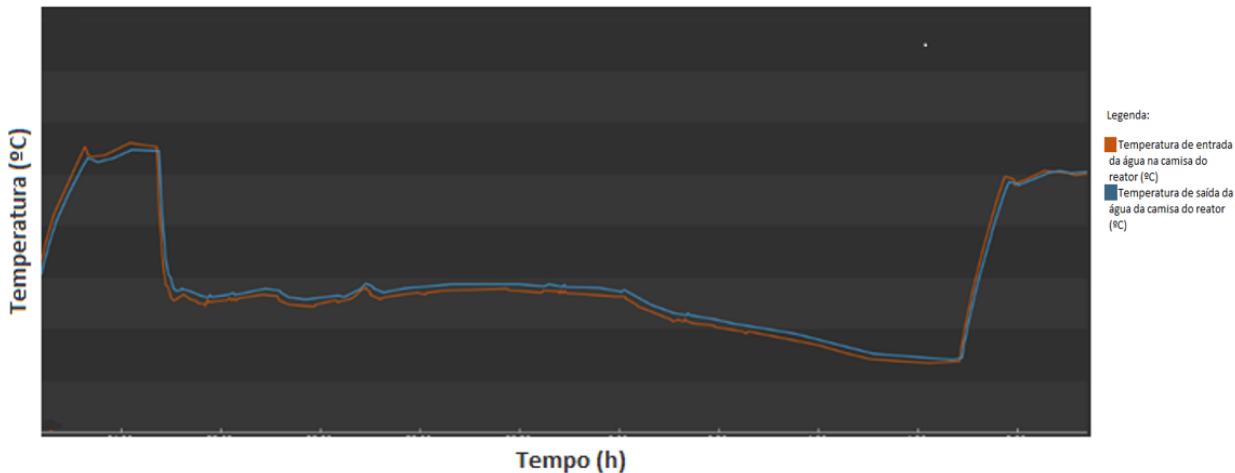
Fonte: O autor.

O comportamento da temperatura pode ser analisado em três momentos. No momento inicial ocorre a etapa de aquecimento, desde a temperatura de alimentação até a temperatura de *set point*, momento no qual começa a dosagem de monômeros e inicia-se a reação. Pode-se observar esse momento na Figura (10), onde logo no início a curva apresenta uma alta inclinação atingindo um pico de temperatura em pouco tempo. Durante todo o tempo da polimerização a temperatura precisa estar controlada e constante dentro do limite do *set point*, pode-se verificar na Figura (9) que por um longo período a curva se mantenha praticamente reta. Ao final ocorre o resfriamento da massa e finalização da batelada. O controle da temperatura é crucial para o processo, caso ocorra um aumento indesejado na temperatura antes do término da reação, pode-se avaliar que seja devido a algum desvio no sistema de refrigeração, por exemplo.

Para manter a temperatura da massa no *set point* desejado e controlar a liberação de energia da reação, é necessário que a camisa do reator seja adequada e esteja em perfeito funcionamento. Na camisa passa-se a água vinda da torre de resfriamento, que refrigera o reator, quando a massa interna se encontra em uma temperatura acima da temperatura da água de entrada da camisa. No momento inicial do processo, por exemplo, em que há a necessidade de aquecimento, é aberta uma válvula de vapor para aumentar a temperatura de entrada da camisa e consequentemente permitir a troca térmica aquecendo o material interno ao reator que se encontra em temperatura menor. Estes momentos, portanto, são caracterizados pela temperatura da água na camisa, observados no

comportamento das temperaturas de entrada e saída na Figura (11).

Figura 11 - Comportamento das curvas de temperatura de entrada e saída da camisa em uma batelada ideal



Fonte: O autor.

Ao comparar as temperaturas das camisa, observa-se a troca térmica do processo, a diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura de saída representa o quanto de calor foi trocado com a parede do reator e da parede com a massa. Com a diferença de temperatura são identificados os desvios no sistema de refrigeração da camisa, ou seja, se em alguma situação a variação na diferença de temperatura apresentar uma diminuição durante um período, deve-se verificar se a troca térmica está sendo efetiva. Como mostrado na Figura (11), a diferença entre as temperaturas se mantém aproximadamente constante durante toda a batelada ideal, tanto nas fases de aquecimento como resfriamento.

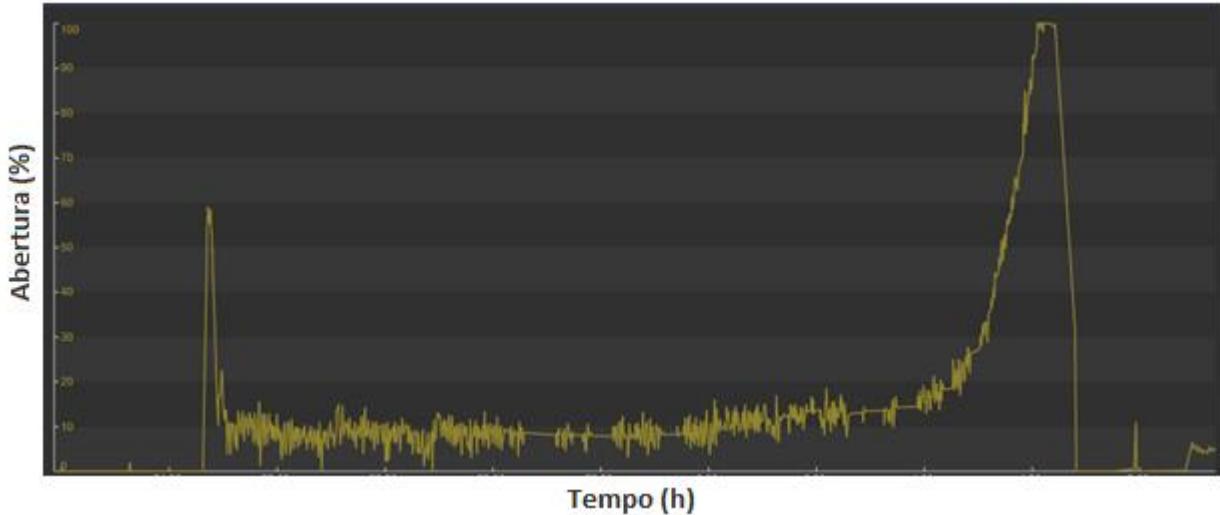
Ao início, pode se identificar um aumento na temperatura de entrada da camisa, para aquecer a massa, ocasionando em uma temperatura menor na saída da camisa. Em um segundo momento tem-se o processo de resfriamento da massa, durante toda a polimerização, onde a água da camisa entra a uma temperatura menor e sai com uma temperatura mais elevada, com a função de equilibrar com o calor liberado pela reação exotérmica e manter a temperatura do produto dentro da faixa de *set point*.

A temperatura de entrada camisa é influenciada por diversos fatores, alguns são controlados pela produção, como as aberturas das válvulas de água e vapor, mas alguns são derivados do próprio sistema, como a temperatura da água vinda da torre de resfriamento, que é alterada

conforme a temperatura ambiente e a simultaneidade de processos. Com isso pode-se observar diversas variações nesta temperatura de uma batelada para outra, porém as mesmas não possuem grande relevância, isso deve-se ao fato de que essas variações são pequenas e permitem que a troca térmica ocorra da mesma maneira e de forma adequada.

A válvula de água para a camisa é essencial para manter a temperatura da massa dentro dos limites de segurança. Durante todo o processo a abertura de válvula é controlada pela análise sobre as temperaturas, sendo aberta a todo o momento em que se precisa de refrigeração no reator. Na Figura (12) tem-se os níveis de abertura da válvula de água durante toda a batelada.

Figura 12 - Comportamento da curva de abertura da válvula de água em uma batelada ideal



Fonte: O autor.

Com a massa aquecida e após começar a dosagem da pré-emulsão, observa-se o primeiro pico de abertura da válvula de água. Com um nível de abertura médio, em torno de 60%, como visto na Figura (12), já é o suficiente para diminuir a temperatura da camisa e finalizar a etapa de aquecimento da massa. Após atingir a temperatura de *set point*, a abertura da válvula varia em uma faixa de 5 a 20%, com foco de manter a temperatura do produto constante durante todo o processo. Como visto nos comportamentos da temperatura da massa na Figura (10) e das temperaturas da camisa na Figura (11), estas varáveis guiam durante todo o processo o comportamento da válvula de água, que sempre apresenta picos de abertura quando a reação libera mais calor e a mesma precisa ser resfriada.

Após o término da dosagem de pré-emulsão, a massa interna ao reator necessita ser

refrigerada, pois a reação retorna a liberar mais calor, o produto é resfriado até o final da reação onde a taxa de liberação reduz a zero e finaliza-se a batelada.

4.3.1 Análise de influência dos parâmetros

A partir da compreensão do perfil de cada variável e do acompanhamento do processo produtivo atual, observando as bateladas de alguns produtos com comportamentos similares durante a polimerização, foi possível correlacionar os desvios dos parâmetros, definindo os pontos de evidência de alterações nas condições operacionais. Os tópicos que estiveram em destaque foram:

- Momento de abertura da válvula de água;
- Tempo de abertura da válvula de água;
- Variação de temperatura da camisa;
- Comportamento da temperatura da massa no aquecimento;
- Comportamento da temperatura da massa no resfriamento.

Observou-se que a válvula de água para a camisa, ao ser aberta, rapidamente gerava uma resposta na temperatura do produto, resfriando-o imediatamente. Porém esse comportamento obtinha respostas cada vez mais tardias com o passar de bateladas seguidas sem limpeza. Ou seja, havia uma necessidade de abrir a válvula de água antecipadamente, mantê-la quase totalmente aberta e durante maior tempo para ter o efeito de resfriamento do produto. E em alguns casos adicionais, foi observado que mesmo com esta abertura prolongada, ainda havia um incremento na temperatura do produto, aumentando ligeiramente, isto é, a troca térmica entre a camisa de resfriamento e o produto não estava sendo eficiente.

Algumas mudanças também são notadas no comportamento da temperatura da massa interna ao reator durante toda a polimerização. Ainda que a temperatura se mantenha próxima do *set point* durante a reação, em bateladas limpas esta temperatura é alcançada mais facilmente e se mantém superior à de bateladas sujas, nas quais desde o aquecimento apresentam-se dificuldades nas trocas térmicas, visto que a temperatura atingida é menor mesmo sendo submetida a altas temperatura na camisa do reator.

Nos casos em que se tem essa abertura maior da válvula de água, identifica-se que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída (delta da temperatura) da água da camisa é menor,

indicando a menor troca térmica reafirmando o que foi analisado pela curva de temperatura da massa.

É importante salientar que todo o processo foi monitorado constantemente pelos operadores na sala de controle. Os desvios comentados são pequenos e respeitam o cenário e as condições de uma operação segura, previamente estudada e descrita pela engenharia da planta, não interferindo na qualidade do produto e nem na segurança do processo.

4.4 MODELAGEM INICIAL

A partir do estudo das variáveis e de suas correlações, identificou-se que as trocas térmicas tinham maior relevância durante a dosagem de pré-emulsão, momento no qual ocorre a polimerização e todas as variáveis, principalmente a temperatura da massa, precisam estar controladas. Este período, portanto, foi selecionado para ser analisado.

Foi extraído do sistema um relatório, em forma de planilha, com diversas bateladas sequenciais dos produtos selecionados realizadas em momentos distintos durante o período de um ano, abrangendo as diversas situações encontradas pelo reator em relação às limpezas. Devido à confidencialidade, este trabalho não apresenta a planilha com o relatório extraído do sistema.

O relatório foi extraído contendo as seguintes informações: nome do produto; data e hora; temperatura da massa ($^{\circ}\text{C}$); vazão de pré-emulsão (kg/h); temperatura de entrada da camisa ($^{\circ}\text{C}$); temperatura de saída da camisa ($^{\circ}\text{C}$), abertura da válvula de água (%), os dados foram extraídos com intervalos de 5 minutos. Com esses dados calculou-se o gradiente de temperatura da camisa, entre a entrada e a saída, que foi adicionado a planilha.

Considerando a especificação de cada produto, também se acrescentou na planilha, a temperatura média e a temperatura máxima da faixa de *set point* de cada um dos produtos e a numeração sequencial das bateladas entre limpezas. Adicionalmente, realizou-se uma análise de acordo com o histórico mapeado pela planta em questão, classificando as bateladas em três categorias:

- Limpo: batelada realizada imediatamente após uma limpeza do reator;
- Sujo: as duas bateladas que antecedem uma limpeza;
- Intermediário: demais bateladas realizadas.

Esta categorização dos dados em diferentes classes, serviram como base de entrada para o

treino do modelo na utilização do método de Naive Bayes.

4.4.1 Coeficiente de troca térmica

Como forma de aumentar a credibilidade do modelo, para identificar as variações nas trocas térmicas realizou-se o cálculo do coeficiente de troca térmica que possibilita realizar uma análise mais detalhada da influência das incrustações na parede do reator.

As trocas térmicas do sistema foram consideradas separadamente para a análise, e desconsiderando as possíveis perdas de calor para o ambiente. Foi considerada a existência de dois coeficientes de transferência de calor, o primeiro em relação ao calor absorvido pela água da camisa de refrigeração e o segundo relacionado ao calor liberado pela reação exotérmica, representados, segundo Agostini (2006) e Incropera et al. (2014), pela Equação (2) e Equação (3), respectivamente.

$$U_{camisa} = \frac{Q_{camisa}}{A \cdot LMTD} \quad (2)$$

$$U_{reação} = \frac{Q_{reação}}{A \cdot LMTD} \quad (3)$$

O coeficiente de transferência de calor (U) depende, em ambos os casos, da área de transferência, da taxa de calor envolvida e de uma diferença de temperatura. Para o caso em questão, a diferença de temperaturas é avaliada pela média logarítmica (LMTD). Para isso considera-se que a temperatura em toda a superfície de troca de calor e na região interna do reator é uniforme, havendo uma variação de temperatura apenas no fluido refrigerante que passa por um aumento de temperatura entre a entrada, em uma temperatura T_2 , e saída da camisa do reator, em uma temperatura T_3 . Segundo Agostini (2006) e Incropera et al. (2014), a diferença média logarítmica de temperatura é definida pela Equação (4).

$$LMTD = \frac{(T_1 - T_2) - (T_1 - T_3)}{\ln(\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3})} \quad (4)$$

A Equação (4) é aplicável quando a reação está controlada, sendo a temperatura da massa interna ao reator constante, a uma temperatura T_1 .

O calor retirado pela água de refrigeração da camisa, é dado pela vazão mássica de água na camisa e pela variação da energia interna no intervalo de duas medições, este pode ser calculado, segundo Incropera et al. (2014), utilizando a Equação (5):

$$Q_{camisa} = \dot{m}_c \cdot Cp \cdot (T_3 - T_2) \quad (5)$$

Já o calor gerado pela reação depende da entalpia de polimerização e da vazão dos monômeros (pré-emulsão), de acordo com Incropera et al. (2014), representada pela Equação (6):

$$Q_{reação} = \dot{m} \cdot \Delta H_r \quad (6)$$

Na planilha com os dados extraídos do sistema foram adicionados, portanto, todas as variáveis mencionadas, considerando, para cada batelada, o produto em questão e suas especificidades, mantendo o intervalo de 5 minutos entre cada medição.

4.5 MODELAGEM FINAL

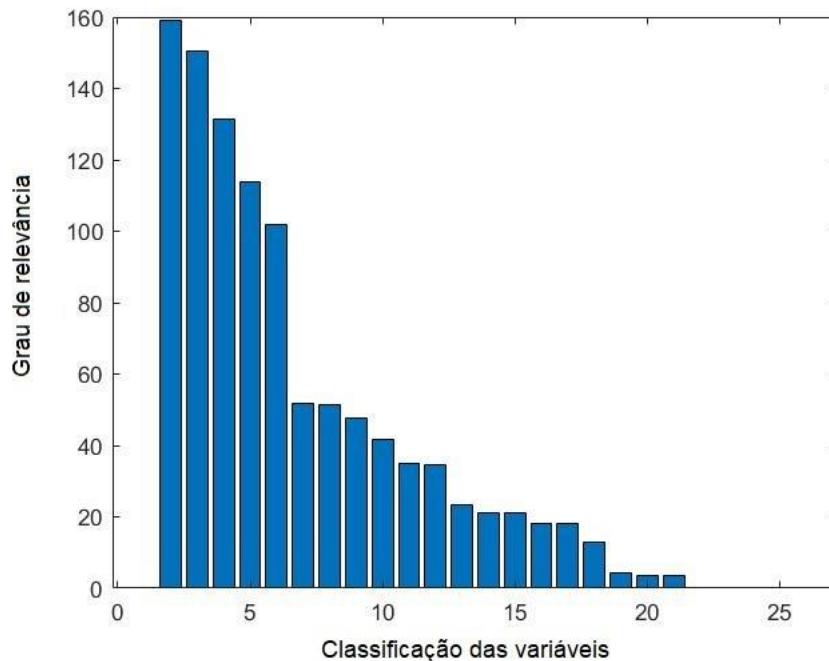
A planilha final foi formada por 21 variáveis, de modo que cada coluna represente uma variável e as linhas os dados extraídos das bateladas sequenciais. As variáveis consideradas para o modelo foram:

- Nome do produto;
- Número sequencial da batelada;
- Categoria de classificação da batelada (Limpido, Sujo ou Intermediário);
- Temperatura máxima do *set point* (°C);
- Temperatura média do *set point* (°C);
- Vazão de pré-emulsão (kg/s);
- Temperatura de entrada da camisa (°C);
- Temperatura de saída da camisa (°C);
- Variação entre a temperatura de entrada e saída da camisa (°C);

- Abertura da válvula de água (%);
- Temperatura do produto (°C);
- Abertura da válvula de vapor (%);
- Agitação do reator (rpm);
- Diferença média logarítmica de temperaturas;
- Vazão mássica da água na camisa (kg/s);
- Área de contato do fluido refrigerante com a parede do reator (m^2);
- Calor absorvido pelo fluido refrigerante (J/s);
- Coeficiente de transferência de calor da camisa (W/m^2K);
- Volume de massa no reator (m^3);
- Calor liberado pela reação exotérmica (J/s);
- Coeficiente de transferência de calor da reação (W/m^2K).

No *software* MATLAB foram carregados os dados e, por meio da função de classificação, foram analisadas as relevâncias de cada variável para o sistema. A Figura (13) apresenta esta classificação, onde no eixo horizontal tem-se as variáveis numeradas de 1 a 21 e no eixo vertical o valor de relevância de cada variável.

Figura 13 - Relevância das variáveis no modelo de Kernel Naive Bayes



Fonte: O autor.

A numeração referente a classificação feita no *software* MATLAB com a identificação de cada variável pode ser vista pela Tabela 1.

Considerando esta ordem das variáveis, parte dos dados (linhas da planilha) foi empregada no treinamento do modelo, e este foi testado nos demais dados para comparação dos resultados e análise de erros. O sistema foi programado para retornar a classificação estabelecida no início, com as categorias “Limpo”, “Intermediário” e “Sujo”, de acordo com relevância considerada pelo modelo de Kernel Naive Bayes, programado no *software* MATLAB.

Tabela 1 - Classificação de relevância das variáveis no modelo de Kernel Naive Bayes

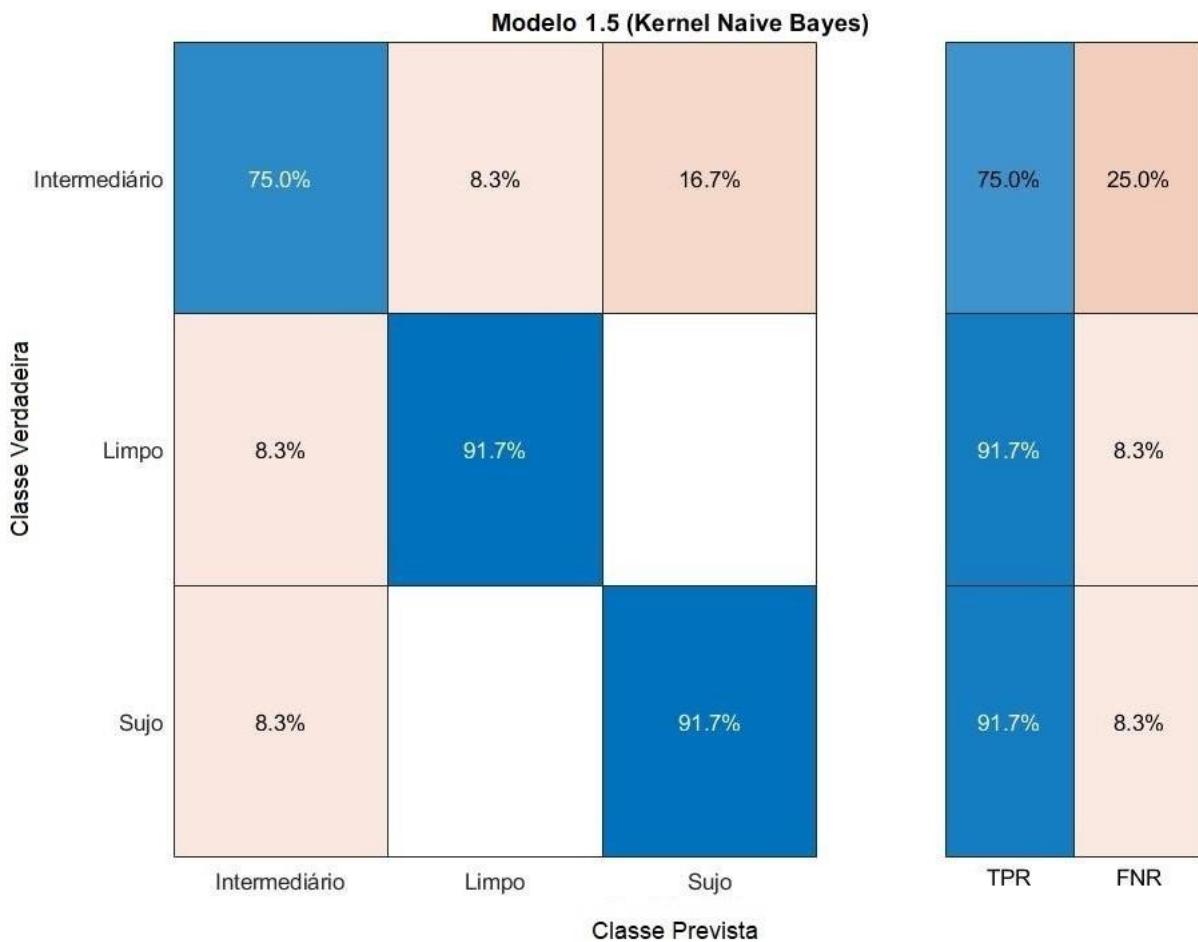
Classificação	Nome de identificação da variável
1	Número sequencial da batelada
2	Vazão de pré-emulsão
3	Nome do produto
4	Calor liberado pela reação
5	Temperatura de saída da camisa
6	Temperatura de entrada da camisa
7	LMTD
8	Categoria
9	Temperatura do produto
10	<i>Set point</i> médio
11	<i>Set point</i> máximo
12	Abertura da válvula de vapor
13	Abertura da válvula de água
14	Coeficiente de troca térmica da reação
15	Coeficiente de troca térmica da camisa
16	Delta de temperatura da camisa
17	Calor absorvido pela água da camisa
18	Agitação do reator
19	Área de contato
20	Volume interno no reator
21	Vazão mássica da camisa

Fonte: O autor.

4.5.1 Resultados obtidos

A Figura (14) mostra a Matriz de confusão do modelo treinado, que apresenta o desempenho do treino, onde as linhas mostram a classe verdadeira e as colunas representam a classe prevista.

Figura 14 - Matriz de confusão



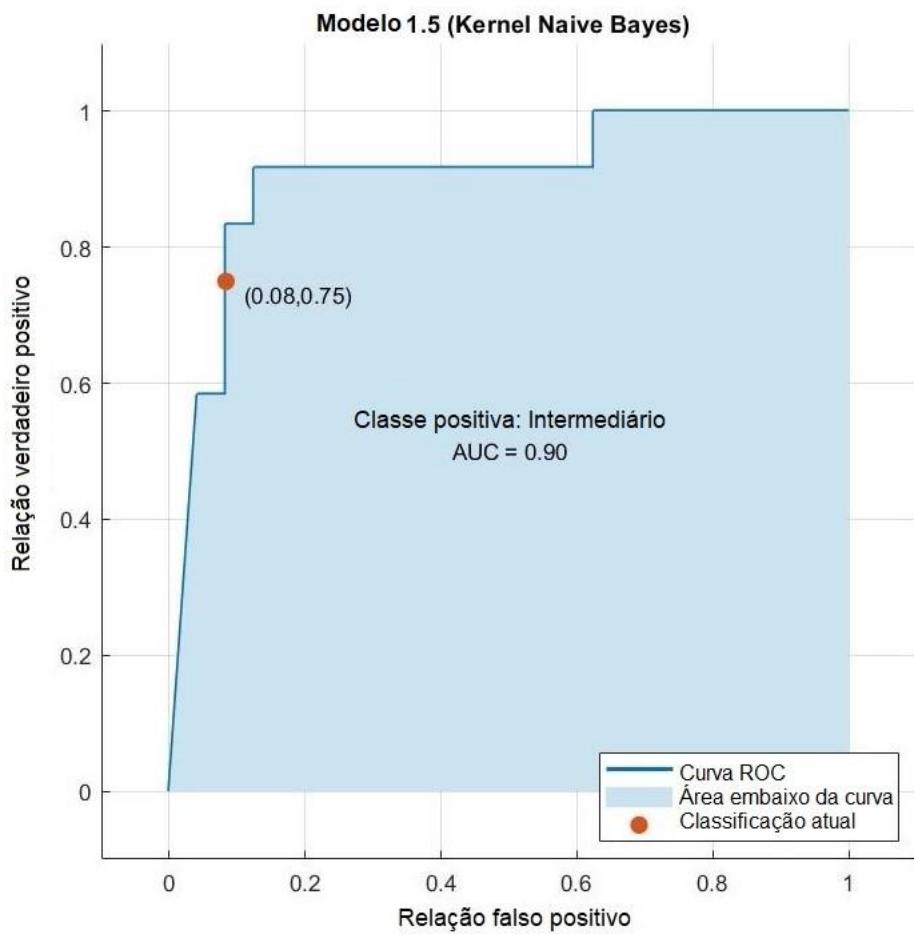
Fonte: O autor.

Na Figura (14), o eixo vertical mostra a classe verdadeira, colocada na coluna de classificação da planilha e o eixo horizontal mostra a classe que foi prevista pelo modelo. Observa-se que o modelo retornou 75% de verdadeiro positivo para a classificação “Intermediário” e um índice ainda mais satisfatório, de 91,7% de verdadeiro positivo, para as classes “Limpo” e “Sujo”, consideradas mais críticas quando se refere a necessidade de limpeza do reator. Estes valores demonstram que o

modelo está classificando corretamente os dados, com baixa porcentagem de erro.

A Figura (15) apresenta as curvas características de operação do receptor (ROC), onde pode-se avaliar o desempenho do modelo de aprendizado do sistema a partir da área abaixo da curva. A curva ROC mostra a taxa de verdadeiro positivo e de falso positivo da modelagem, um classificador perfeito terá um verdadeiro positivo igual a 1 e um falso positivo igual a 0.

Figura 15 - Curva ROC



Fonte: O autor.

O modelo, portanto, considerando a classe positiva igual a “Intermediário”, de acordo com a Figura (15) apresentou 0,75 de verdadeiro positivo e 0,08 de falso positivo, e uma área abaixo da curva de 0,90, indicando uma alta confiabilidade do sistema, sendo este um resultado satisfatório para atender ao objetivo de indicar o melhor momento para a limpeza do reator, no qual a troca

térmica apresenta desvios.

O sistema, portanto, foi treinado de forma que identificasse desvios nas variáveis e os associasse com a classificação da batelada. Os dados extraídos de bateladas futuras servirão como base de entrada para o modelo, e o mesmo retornará a classificação da partida em “Limpido”, “Sujo” ou “Intermediário”, a partir desta identificação dos desvios nas variáveis. O modelo retornando a classificação como “Sujo” indica que incrustações presentes na parede interna do reator estão interferindo nas trocas térmicas, sendo assim, este é o momento limite e ideal para realizar uma limpeza.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises das temperaturas envolvidas no processo, abertura de válvula da água de resfriamento, dosagem das matérias-primas e trocas de calor ao longo da polimerização, pode-se concluir que o modelo estipulado por este estudo foi satisfatório para atender o objetivo e indicar momentos em que a troca térmica apresente desvios no qual pode-se sugerir a limpeza do reator.

Foi possível identificar com precisão a influência das incrustações nas variáveis de processo e comprovar que a sujeira na parede interna do reator acarreta redução da troca térmica entre o produto e a camisa do reator. Estas incrustações, excedendo um determinado limite que pode ser observado pela modelagem final demonstrada, acarretam problemas de segurança de processo, apresentando comportamentos fora dos parâmetros estabelecidos para a determinada polimerização.

A modelagem desenvolvida com o *software* MATLAB® resultou em um sistema condizente com a literatura. Como benefícios que este modelo pode trazer para o processo pode-se citar:

- Redução na frequência de limpezas;
- Aumento da produtividade;
- Otimização das limpezas de acordo com a segurança e qualidade do processo.

A planta química estudada avaliou como satisfatório os resultados obtidos, o projeto será implementado gradualmente junto com a realização de testes e mais estudos para que seja confirmado na prática que o sistema de controle é totalmente adequado e confiável.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem outros fatores adicionais que podem ser calculados em relação a troca térmica, e estes podem complementar as variáveis utilizadas, modelando um sistema mais robusto. Para tal, podem ser avaliados o fator incrustação e as perdas de calor para a atmosfera da parede da camisa do reator. De forma que se obtenha um coeficiente global de troca térmica mais próximo da realidade para ser incluído na modelagem, e que se estabeleça uma equação final de limpeza do reator com uma pequena porcentagem de erro.

A presente monografia de conclusão de curso aponta pontos importantes a serem considerados em outros estudos que envolvam análises de segurança de processos em sistemas de polimerização. A escolha do melhor momento para realizar limpezas em um reator pode auxiliar em projetos que também objetivem o aumento da produtividade e qualidade de polimerizações.

REFERÊNCIAS

AGOSTINI, Maria Stella. **Análise de riscos envolvendo reações exotérmicas**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção Mecânica Industrial: Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. São Paulo: Érica, 2014. p. 1-25.

ALVES, Sylvio. **Análise de Vibração de Máquinas para Manutenção Preditiva**. 2019. Disponível em: <https://venturus.org.br/analise-de-vibracao-de-maquinas-para-manutencao-preditiva/>. Acesso em: 18 mai. 2020.

ASUA, Jose (ed.). **Polymer Reaction Engineering**. Espanha: John Wiley & Sons, 2008. p. 1-23; 233-268.

BARBOSA, Alessandra da Costa. **Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade na função transmissão a fim de reduzir o tempo de indisponibilidade**. 2009. 72 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CHAPMAN, Stephen J. **Programação em MATLAB para Engenheiros**. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

CHERN, C.s.. Emulsion polymerization mechanisms and kinetics. **Progress In Polymer Science**, [s.l.], v. 31, n. 5, p. 443-486, maio 2006. Elsevier BV. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.02.001>>.

CORDEBELLO, Fátima S. Polímeros do future - tendências e oportunidades: tendências e oportunidades. **Polímeros**, São Carlos, v. 13, n. 1, p. 4-43, jan. 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282003000100003>.

CORTINOVIS, Giorgia F. et al. A systemic approach for optimal cooling tower operation. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 50, n. 9, p. 2200-2209, set. 2009. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.033>.

FINKLER, Tiago F.; KAWOHL, Michael; PIECHOTTKA, Uwe; ENGELL, Sebastian. Realization of online optimizing control in an industrial semi-batch polymerization. **Journal Of Process Control**, Dortmund, Alemanha, v. 24, n. 2, p. 399-414, fev. 2014. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.09.028>.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, p. 20-68, 2008.

GILAT, Amos. **Matlab com Aplicações em Engenharia**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GÜNTHER, Hartmut. Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão?.

Psicologia: Teoria e Pesquisa, Brasília, v. 22, n. 2, p. 201-209, ago. 2006. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-37722006000200010>.

HARSONO, I.; HINDARSO, H; INDRASWATI, N. **Base Case Simulation of a Semi-batch emulsion copolymerization process: Application to Styrene/Butadiene system.** Process System Engineering Laboratory, Widya Mandala Surabaya Catholic University, Indonesia, 2005.

HENSLEY, John C (ed.). **Cooling Tower Fundamentals.** 2. ed. Estados Unidos: Spx Cooling Technologies, 2008. Disponível em: <<https://spxcooling.com/wp-content/uploads/Cooling-Tower-Fundamentals-1.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2020.

HVALA, Nadja; ALLER, Fernando; MITEVA, Teodora; KUKANJA, Dolores. Modelling, simulation and control of an industrial, semi-batch, emulsion-polymerization reactor. **Computers & Chemical Engineering**, Ljubljana, Eslovênia, v. 35, n. 10, p. 2066-2080, out. 2011. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.05.016>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** Rio de Janeiro: LTC, 7a Ed, 2014. p. 142-178; 659-710.

LOVELL, Peter A.; SCHORK, F. Joseph. Fundamentals of Emulsion Polymerization. **Biomacromolecules**, Estados Unidos, v. 21, n. 11, p. 4396-4441, 16 jun. 2020. American Chemical Society (ACS). DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00769>.

MARINANGELO, Giovane. **Copolimerização em emulsão de estireno e acrilato de butila com alto teor de sólidos: estudo experimental e modelagem matemática do processo em reator semicontínuo.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. DOI:10.11606/T.3.2010.tde-19012011-112636.

MATHWORKS. **Naive Bayes Classification.** Disponível em: <https://la.mathworks.com/help/stats/naive-bayes-classification.html>. Acesso em: 09 nov. 2020.

MELLO, Lilian Cardoso de. **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento.** 2008. 138 f. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MOBILBATCH EQUIPAMENTOS INDUSTRIALIS. Reatores industriais. Disponível em: <<https://www.mobilbatch.com.br/reatores-industriais>> Acesso em: 01 jan. 2021.

OIKAWA, Eduardo Hiroshi. **Avaliação de um sistema industrial de resfriamento de água.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PALMA, Mauri; GIUDICI, Reinaldo. Copolimerização em emulsão de acetato de vinila e acrilato de butila com alto teor de sólidos. **Polímeros**, São Carlos, v. 16, n. 4, p. 269-275, Dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000400005>.

PERRY, R. H., BENSKOW, L. R., BEIMESCH, W. E., et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.

SANTOS, M.; ARAUÚJO, M. M.; LIMA, A. R.. Manutenção Preditiva: Contribuindo para a melhoria dos processos e para a redução dos custos de operação. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 10., 2018, Sergipe. *Anais [...]* . São Cristóvão: Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal de Sergipe, 2018. p. 342-358. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329362121_Manutencao_Preditiva_contribuindo_para_a_melhoria_dos_processos_e_para_a_reducao_dos_custos_de_operacao%0Ahttps://www.ri.ufs.br/handle/riufs/10421>. Acesso em: 24 abr. 2020.

SHAH, Ziarat. **Efeito de tensoativos na polimerização em emulsão**. 2012. 132 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/250318>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

STANFORD III, Herbert W. **HVAC Water Chillers and Cooling Tower**: fundamentals, application and operation. Nova Iorque: CRC Press, 2011. p. 133-255.

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (Nova Iorque). **Global Emulsion Polymers Market to Reach Value of US\$ 66 bn by 2027; Rise in Demand of Paints & Coatings to Drive Market**. Disponível em: <https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/emulsion-polymer-market.htm>. Acesso em: 16 mai. 2020.

THICKETT, Stuart C.; GILBERT, Robert G.. Emulsion polymerization: state of the art in kinetics and mechanisms. : State of the art in kinetics and mechanisms. **Polymer**, [s.l.], v. 48, n. 24, p. 6965-6991, nov. 2007. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2007.09.031>.

TOLEDO, L. A.; SHIAISHI, G. de F.. Estudo de caso em pesquisas exploratórias qualitativas: um ensaio para a proposta de protocolo do estudo de caso. : Um ensaio para a proposta de protocolo do estudo de caso. **Revista da Fae**, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 103-119, jan. 2009.

XENOS, Harilaus Georgius. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Belo Horizonte: EDG, 1998. p. 17-66.

YIN, Robert K.. **Estudo de Caso**: planejamento e métodos. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - SCRIPT DO MATLAB

%% Leitura de dados

```
Raw_data = readtable('Dados de Processo_versão final.xlsx','Sheet','Dados_ajustados'); %Leitura da tabela Excel
```

%% Seleção de dados para treino de modelo

```
Raw_data.Situacao_limpezas=categorical(Raw_data.Situacao_limpezas); %categorizar a coluna de qualidade
```

```
[g,gID]=findgroups(Raw_data.Situacao_limpezas); %separar as categorias gID e o vetor de classificação g
```

```
Q=splitapply(@numel,g,g); %contar quanto elementos temos em cada classificação
```

```
m=min(Q); %achar o menor valor de
```

```
inds=cell(size(gID));
```

```
for k=1:numel(inds)
```

```
    inds{k}=randsample(find(Raw_data.Situacao_limpezas==gID(k)),m); %dados aleatórios respeitando o menor coeficiente
```

```
end
```

```
inds=vertcat(inds{:}); %concatenar as 2 colunas em um vetor coluna unico
```

Dados =Raw_data(inds,:);%nova tabela, com dados equivalentes

%% Variáveis relevantes para o modelo

```
X=[Raw_data(:,1) Raw_data(:,3:24) Raw_data(:,26:28)]; %Seleção dos dados de entrada do modelo
```

```
Y=[Raw_data(:,25)]; %Seleção da coluna de saída do modelo
```

```
[idx,scores] = fscchi2(X,Y); %Função de classificação dos mais relevantes: matriz idx ordena os fatores mais importantes e score relaciona a nota de cada parâmetros
```

```
bar(scores(idx)) %plotagem em gráfico de barras
```

```
xlabel('Predictor rank') %eixo X  
ylabel('Predictor importance score') %eixo Y  
idx(1:5) %plotagem dos dados  
  
%% teste do modelo  
yfit2=Class_Final.predictFcn(Raw_data); %teste dos resultados do modelo
```