

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
DILUIÇÃO EM LINHA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM UMA
INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO**

Larissa Rochele Laste

Pedro Rafael Bolognese Fernandes

Porto Alegre, março de 2023.

Larissa Rochele Laste

**VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
DILUIÇÃO EM LINHA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM UMA
INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal do
Rio Grande do Sul como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Rafael
Bolognese Fernandes

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Evandro Steffani

Dr. Lucas Manique Raymundo

Porto Alegre, março de 2023.

Para minha irmã que, mesmo longe, segue sendo meu porto seguro, minha fonte de inspiração, e para meus pais, por sempre me permitirem sonhar.

RESUMO

A produção de soja está entre as atividades econômicas que, nas últimas décadas, apresentaram crescimentos mais expressivos. Isso pode ser atribuído a diversos fatores, dentre os quais destaca-se o elevado teor de proteínas contido no grão. Existem três tipos principais de produtos comerciais de proteína de soja: a farinha de soja, as proteínas concentradas de soja e as proteínas isoladas de soja. A farinha de soja é produzida a partir da moagem do farelo desengordurado, um subproduto obtido durante o processo de extração do óleo. As proteínas concentradas e isoladas, por sua vez, são produzidas a partir da farinha de soja e a sua fabricação envolve quatro etapas principais: solubilização, precipitação, neutralização e secagem. À exceção da secagem, todas as etapas mencionadas envolvem alterações no pH do meio, realizadas através da utilização de ácidos e bases de grau alimentício, como o ácido clorídrico e o hidróxido de sódio, respectivamente. Tendo isso em conta, o objetivo do presente estudo compreende propor um sistema de diluição em linha para melhoria do processo de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de produção de proteínas isoladas e concentradas de soja de uma empresa do ramo alimentício. Para tanto, pretende-se avaliar o sistema atual visando detectar problemas e gargalos, caracterizar as linhas de tubulação e componentes disponíveis, avaliar tecnicamente e escolher os componentes para o sistema proposto através de pesquisas e simulações e avaliar os benefícios trazidos pela nova instalação em comparação à existente. Atualmente, a diluição do hidróxido de sódio a ser dosado no processo é realizada em bateladas, nas quais a solução concentrada é misturada com água no interior de um tanque. A agitação do sistema é promovida pela ação dos jatos dos fluidos e uma linha de recirculação é responsável por manter a homogeneidade da solução. Por meio de entrevistas, visitas em campo e análise de dados de processo, constatou-se que a instalação existente apresenta problemas no que diz respeito à capacidade de armazenamento e à homogeneidade da solução. O hidróxido de sódio concentrado e a água possuem densidades significativamente diferentes e, devido ao dimensionamento inadequado do sistema de mistura por jatos, observa-se, no tanque de diluição, o fenômeno de estratificação, isto é, a formação de camadas líquidas de densidades distintas que não se misturam. Visando sanar os problemas existentes na instalação atual, propõe-se a implementação de um sistema de diluição em linha. Três componentes básicos fazem parte desses sistemas: tubulações, dispositivos de mistura e dispositivos de bombeamento. Existem diversos tipos de misturadores estáticos disponíveis no mercado e a escolha do modelo a ser empregado na instalação proposta foi feita com base na natureza dos fluidos. As bombas, por sua vez, foram dimensionadas com o auxílio do software Pipe Flow Expert, uma ferramenta focada na modelagem e simulação de sistemas de transporte de fluidos. Finalmente, verificou-se que a implementação de um sistema de diluição em linha de hidróxido de sódio resultaria em benefícios como aumento da capacidade de armazenamento, redução da variabilidade do processo, operação mais estável, redução do desgaste de equipamentos e redução do tempo de serviço repetitivo da operação.

Palavras-chave: *proteínas de soja, sistemas de diluição, mistura de líquidos, projetos.*

ABSTRACT

Soy production is one of the economic activities that, in recent decades, have shown expressive growth. This can be attributed to several factors, including the high protein content observed in soybean. There are three main types of commercial soy protein products: soy flour, soy protein concentrates, and soy protein isolates. Soy flour is produced from the grinding of defatted soy flakes, a by-product obtained during the oil extraction process. Concentrates and isolates, on the other hand, are produced from soy flour and their manufacture involves four main steps: solubilization, precipitation, neutralization and drying. With the exception of drying, all the steps mentioned involve changes in the pH of the medium, which are performed using food grade acids and bases, such as hydrochloric acid and sodium hydroxide, respectively. Therefore, the objective of this study is to propose an in-line dilution system to improve the storage and dilution facilities of sodium hydroxide in a company that produces soy protein concentrates and isolates. It is intended to evaluate the current system in order to detect problems and bottlenecks, to characterize the available pipe lines and components, to technically evaluate and choose the components for the proposed system through research and simulations and to evaluate the benefits brought by the new installation in comparison to the existing one. Currently, the dilution of the sodium hydroxide applied in the process is conducted in batches, in which the concentrated solution is mixed with water inside a tank. The agitation of the system is promoted by the action of the jets of the fluids and a recirculation line is responsible for maintaining the homogeneity of the solution. Interviews, field visits and analysis of process data showed that the existing installation has problems related to storage capacity and homogeneity of the solution. Concentrated sodium hydroxide and water have significantly different densities and, due to the inadequate dimensioning of the jet mixing system, the phenomenon of stratification is observed in the dilution tank, i.e., the formation of liquid layers of different densities that don't mix. In order to solve the existing problems, it is proposed the implementation of an in-line dilution system. Three basic components are present in in-line dilution systems: piping, mixing devices and pumping devices. Several types of static mixers are available on the market and the choice of the model to be used in the current application was based on the nature of the fluids. The pumps were dimensioned using the software Pipe Flow Expert, a tool focused on modeling and simulating fluid transport systems. Finally, it was verified that the implementation of an in-line dilution system for sodium hydroxide would result in benefits such as increased storage capacity, reduced process variability, more stable operation, reduced equipment wear and reduction of repetitive work of time.

Keywords: *soy protein, dilution systems, liquid mixing, projects.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura dos aminoácidos e sua categorização conforme a polaridade da cadeia lateral.....	5
Figura 2. Reação de condensação para formação da ligação peptídica.....	6
Figura 3. Esquema representativo da solubilidade das proteínas em função do pH.....	6
Figura 4. Diagrama de blocos do processo de obtenção da farinha de soja desengordurada.....	8
Figura 5. Diagrama de blocos dos processos de fabricação de proteínas concentradas de soja.....	9
Figura 6. Diagrama de blocos do processo de produção de proteínas isoladas de soja.....	10
Figura 7. Fluxograma do sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de proteínas isoladas e concentradas.....	14
Figura 8. Exemplo de reformulação do tanque de diluição a partir de dados de processo.....	17
Figura 9. Dados de processo ilustrando a transferência de hidróxido de sódio 20% para as plantas.....	18
Figura 10. Representação simplificada do comportamento das camadas de fluido do tanque de diluição e sua interação com o medidor DIT-01.....	19
Figura 11. Fluxograma do sistema de diluição em linha proposto.....	22
Figura 12. Misturador estático de elementos de mistura helicoidais com torção alternada.....	23
Figura 13. Configuração adequada para a introdução do fluxo lateral na corrente principal para misturadores de elementos helicoidais de modelos mínimos.....	24
Figura 14. Tubulações do sistema de diluição proposto representadas no software Pipe Flow Expert.....	26
Figura 15. Curvas do sistema para as bombas de (a) água e (b) hidróxido de sódio 50%.....	28
Figura 16. Estratégia de controle da concentração da solução diluída.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição de diferentes tipos de produtos de proteína de soja.....	4
Tabela 2. Lista de medidores do sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio.....	14
Tabela 3. Parâmetros de queda de pressão para misturadores estáticos.....	35
Tabela 4. Constantes para cálculo de queda de pressão para densímetros do tipo Coriolis.....	36
Tabela 5. Propriedades dos fluidos empregadas na simulação com o software Pipe Flow Expert.....	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 A soja e os produtos de proteínas de soja	2
2.2 Proteínas.....	4
2.3 Processo de produção de proteínas de soja	7
2.3.1 A influência do pH no processo de produção de proteínas de soja	10
2.4 Mistura de líquidos	11
3 METODOLOGIA.....	13
3.1 Caracterização da empresa	13
3.2 Descrição do sistema atual	13
3.3 Descrição dos problemas encontrados	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1 Descrição do sistema proposto	21
4.1.1 Seleção do modelo do misturador estático	23
4.1.2 Dimensionamento das bombas	24
4.1.3 Escolha da estratégia de controle.....	28
4.2 Benefícios da implementação do sistema proposto	29
5 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma espécie de leguminosa rica em proteínas e óleo e, por esse motivo, é considerada uma excelente fonte de nutrientes para alimentação animal e humana. A primeira tentativa de plantio de soja no Brasil ocorreu em 1882, mas foi somente a partir da década de 1970 que a sua produção apresentou um crescimento significativo, fazendo com que o grão se consolidasse como a principal cultura do agronegócio brasileiro.

As proteínas de soja, por sua vez, são uma fonte de proteína econômica e confiável, que pode ser utilizada como alternativa às proteínas da carne e do leite para controlar custos e melhorar o valor nutricional de vários produtos alimentícios. Além disso, elas possuem vantagens funcionais comparativamente às proteínas de origem animal – solubilidade, capacidade de estabilização de emulsões, capacidade de formação de gel, capacidade de retenção de água, capacidade de formação de espumas, viscosidade –, o que possibilita a sua utilização na mais variada gama de alimentos.

O processo de produção de proteínas de soja consiste, fundamentalmente, em alterações de pH que visam solubilizar ou insolubilizar as proteínas e carboidratos presentes nos grãos de soja. Essas alterações de pH são feitas através da utilização de ácidos e bases de grau alimentício, como o ácido clorídrico e o hidróxido de sódio, respectivamente. Um controle adequado da dosagem desses componentes durante a fabricação de proteínas de soja significa um controle adequado de pH e, conseqüentemente, do rendimento do processo e das propriedades funcionais do produto final.

Tendo isso em conta, o objetivo do presente estudo compreende propor um sistema de diluição em linha para melhoria do processo de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de produção de proteínas isoladas e concentradas de soja de uma empresa do ramo alimentício. Pretende-se avaliar o sistema atual visando detectar problemas e gargalos, caracterizar as linhas de tubulação e componentes disponíveis, avaliar tecnicamente e escolher os componentes para o sistema proposto através de pesquisas e simulações e avaliar os benefícios trazidos pela nova instalação em comparação à atual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Crescentemente, são exigidos elevados padrões de atuação das indústrias de alimentos. Busca-se precisão durante os processos produtivos, bem como a redução de erros e falhas que prejudiquem os produtos. Para tanto, é necessário gerar padronização ao longo dos processos diários, visando a melhoria contínua e a melhor alocação de recursos financeiros e humanos. Assim, a presente monografia, de forma geral, tratará sobre a padronização do processo de diluição de hidróxido de sódio utilizado na produção de proteínas de soja, tomando como base um estudo de caso realizado em uma empresa do ramo alimentício.

Dessa forma, para melhor compreender o tema em questão, o texto a seguir discorre, primeiramente, acerca do mercado de soja e de proteínas de soja; na sequência, sobre a química das proteínas e sobre o processo produtivo de proteínas de soja; e, posteriormente, sobre a mistura de líquidos.

2.1 A soja e os produtos de proteínas de soja

A soja é uma espécie de leguminosa rica em proteínas e óleo. Seus grãos contêm, aproximadamente, 36% de proteína, 18% de óleo, 15% de carboidratos solúveis, 15% de carboidratos insolúveis e 16% de outros componentes, como vitaminas e minerais. Devido a essa composição, é considerada uma rica fonte de nutrientes para alimentação animal e humana (THRANE et al., 2016).

A soja cultivada hoje nas lavouras é bastante diferente das culturas que lhe deram origem. Sua evolução ocorreu de cruzamentos naturais entre duas espécies de soja selvagem, que foram domesticadas e melhoradas por estudiosos da antiga China. O Oriente, há mais de cinco mil anos, reconhece a soja como um grão sagrado e a utiliza intensamente em sua alimentação. No Ocidente, por outro lado, a soja somente começou a ser explorada comercialmente na segunda metade do século XX, quando os Estados Unidos iniciaram o seu cultivo para emprego em alimentação animal (DALL'AGNOL et al., 2007).

No Brasil, a primeira tentativa de plantio de soja ocorreu na Bahia em 1882, sem sucesso, contudo, em função do clima quente da região. Foi somente na década

de 1970 que a soja se consolidou como a principal cultura do agronegócio nacional, passando de uma produção anual de 1,5 milhões de toneladas em 1970 para 15 milhões de toneladas em 1979. Nessa época, mais de 80% da produção ainda se concentrava nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, em função do clima mais ameno. Nas décadas seguintes, entretanto, fortes investimentos foram realizados visando a tropicalização da soja e, em 1990, mais de 40% da produção nacional já estava concentrada no estado do Mato Grosso do Sul (DALL'AGNOL et al., 2007), atualmente maior produtor de soja do Brasil (EMBRAPA, 2022).

Nas últimas décadas, a cadeia produtiva da soja tem apresentado um crescimento contínuo e diferenciado, tanto no Brasil quanto no mundo (HIRAKURI, LAZZAROTTO, 2014). De acordo com o United States Department of Agriculture (2022), a produção mundial de soja na safra de 2021/2022 totalizou 355,605 milhões de toneladas. O Brasil, maior produtor do grão, atingiu uma produção de 127,000 milhões de toneladas, seguido pelos Estados Unidos, com 121,528 milhões de toneladas. Conforme Thrane et al. (2016), aproximadamente 13% dos grãos produzidos são destinados diretamente à produção de alimentos, como leite de soja, tofu, missô e tempê. Os demais 87% são processados para a obtenção de óleo e farelo desengordurado, sendo este último a matéria-prima utilizada na fabricação de produtos de proteína de soja para a alimentação humana. Apenas 2% do farelo de soja desengordurado, contudo, é utilizada com esse propósito, enquanto grande parte, isto é, 98%, é destinada à alimentação animal.

Existem três tipos principais de produtos comerciais de proteína de soja: a farinha de soja, a proteína concentrada de soja e a proteína isolada de soja. A farinha de soja é produzida a partir da moagem do farelo desengordurado e possui um teor de proteína mínimo de 50% em base seca. A proteína concentrada de soja, por sua vez, é obtida a partir da remoção dos carboidratos solúveis contidos na farinha de soja e possui um teor de proteína mínimo de 65% em base seca. Finalmente, a proteína isolada de soja é obtida a partir da remoção da fibra e dos carboidratos, solúveis e insolúveis, contidos na farinha de soja e possui um teor de proteína mínimo de 90% em base seca (TIAN et al., 2018; THRANE et al., 2016). A Tabela 1 apresenta a composição em base seca dos diferentes tipos de produtos de proteína de soja.

Tabela 1. Composição de diferentes tipos de produtos de proteína de soja

Componente (%)	Farinha de soja com gordura	Farinha de soja desengordurada	Proteína concentrada de soja	Proteína isolada de soja
Umidade	3,4	6,5	9,0	4,8
Proteína	41,0	53,0	65,3	92,0
Gordura	22,5	5,1	0,3	-
Fibra	1,7	3,0	2,9	0,25
Cinzas	5,1	6,0	4,7	4,0

Fonte: TIAN et al., 2018

A proteína de soja é a única do reino vegetal com possibilidade de substituir as proteínas animais, do ponto de vista nutricional, pois contém todos os aminoácidos essenciais em proporção adequada, excetuando-se apenas os aminoácidos sulfurados. Além disso, funcionalmente, os produtos de proteína de soja possuem propriedades – solubilidade, capacidade de estabilização de emulsões, capacidade de formação de gel, capacidade de retenção de água, capacidade de formação de espumas, viscosidade – que permitem a sua utilização nos mais variados alimentos, como molhos para salada, sopas, barras nutricionais, substitutos de carne, bebidas em pó, queijos, sobremesas congeladas, chantilis, fórmulas infantis, pães, cereais matinais, massas, entre outros (THRANE et al., 2016).

2.2 Proteínas

As proteínas são macromoléculas complexas, formadas a partir de estruturas básicas denominadas aminoácidos, que constituem mais de 50% do peso em base seca das células. Elas apresentam grande diversidade de funções nos organismos e podem ser agrupadas em três categorias principais: proteínas estruturais, proteínas com atividade biológica e proteínas alimentares. As proteínas estruturais estão presentes em todos os tecidos dos seres vivos, como músculos, ossos, pele, órgãos, entre outros. Já, as proteínas com atividade biológica, das quais destacam-se as enzimas, atuam como catalisadores das reações químicas envolvidas no metabolismo celular. Finalmente, as proteínas alimentares não representam um grupo único. Elas compreendem todas as proteínas palatáveis, digeríveis, não-tóxicas e economicamente disponíveis para a alimentação humana. Diversas proteínas estruturais e com atividade biológica fazem parte desse grupo (CHEFTEL, CUQ, LORIENT, 1985).

Conforme mencionado anteriormente, estruturalmente, as proteínas são polímeros de aminoácidos, moléculas anfífilas compostas, essencialmente, por um grupo amino (—NH_2), um grupo carboxila (—COOH) e uma cadeia lateral (—R). Cada aminoácido possui uma cadeia lateral característica, responsável por influenciar as suas propriedades físico-químicas. De acordo com a polaridade da cadeia lateral, é possível agrupar os aminoácidos em quatro categorias – apolares, polares sem carga, polares com carga negativa e polares com carga positiva – e, com base nisto, definir a sua hidrofobicidade ou hidrofiliicidade, conforme ilustrado na Figura 1 (CHEFTEL, CUQ, LORIENT, 1985).

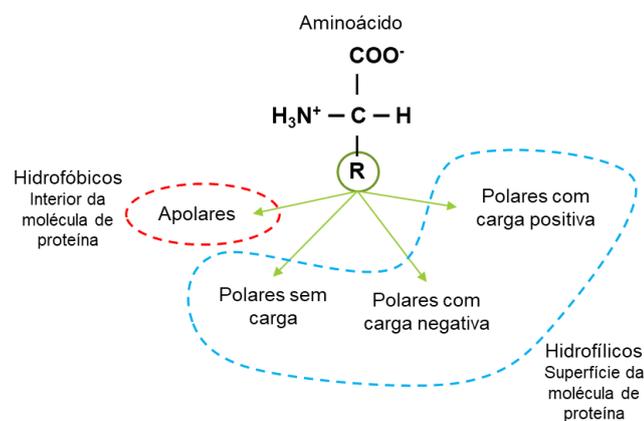


Figura 1. Estrutura dos aminoácidos e sua categorização conforme a polaridade da cadeia lateral

Fonte: Do autor

Os aminoácidos ligam-se entre si por meio de ligações peptídicas, originadas através de reações de condensação entre o grupo amino e o grupo ácido, de acordo com a Figura 2. A grande maioria das proteínas é formada a partir da combinação de vinte aminoácidos diferentes, conhecidos como aminoácidos essenciais. A quantidade de cada aminoácido, assim como a sequência na qual estão ligados, é específica de cada proteína e é responsável por definir a sua conformação e as suas propriedades físico-químicas, como, por exemplo, a solubilidade (CHEFTEL, CUQ, LORIENT, 1985).

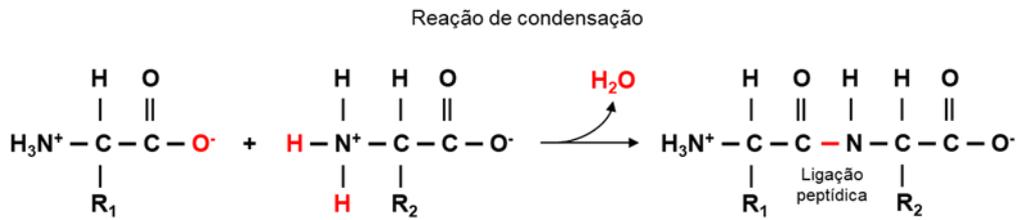


Figura 2. Reação de condensação para formação da ligação peptídica

Fonte: Do autor

A solubilidade de moléculas grandes como as proteínas depende da sua estrutura molecular e da densidade e distribuição das cargas elétricas na sua superfície que, dentre outros fatores, são influenciadas pelo pH do meio aquoso. Como já foi citado, as cadeias laterais dos aminoácidos podem apresentar carga positiva ou negativa e, se sua carga global for diferente de zero, forças de repulsão eletrostática atuarão entre as moléculas de proteína, minimizando a agregação das mesmas e aumentando a solubilidade devido à forte interação com as moléculas de água. Por outro lado, quando a molécula de proteína se encontra eletricamente neutra, isto é, quando o número de cargas positivas for igual ao número de cargas negativas, sua solubilidade será mínima. O pH no qual esse fenômeno é observado é conhecido como ponto isoelétrico. Como podemos observar na Figura 3, conforme nos afastamos do pH do ponto isoelétrico, aumentamos a presença de cargas negativas ou positivas na superfície das moléculas de proteína, aumentando, portanto, a sua solubilidade (LIN, WU, WANG, 2012).

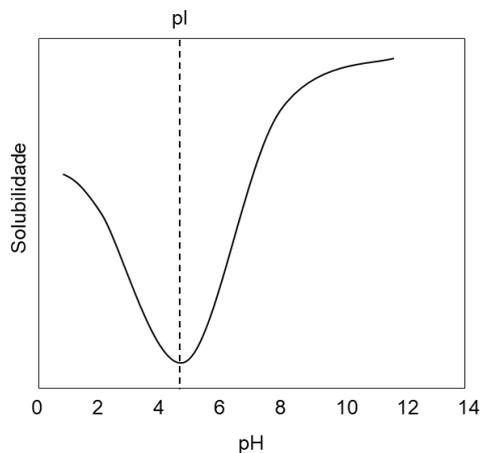


Figura 3. Esquema representativo da solubilidade das proteínas em função do pH

Fonte: Do autor

2.3 Processo de produção de proteínas de soja

A soja contém dois tipos principais de proteínas de armazenamento: a β -conglucina e a glicina. Elas são classificadas como proteínas globulares e, juntas, representam de 65 a 89% das proteínas totais do grão. Elas são as primeiras a serem concentradas e isoladas nos processos de fabricação de produtos de proteínas de soja. Adicionalmente, a soja contém outras proteínas como lectinas, inibidores de tripsina e lipoxigenases. Normalmente, deseja-se remover ou inativar essas últimas proteínas, uma vez que elas podem afetar o valor nutricional e o sabor dos produtos de proteína de soja (THRANE et al., 2016).

O processo de produção de proteínas de soja inicia-se com o transporte da soja colhida ou armazenada nos centros de distribuição até as indústrias de processamento, onde passa por uma etapa de peneiramento para remoção de grãos danificados e impurezas. Em seguida, os grãos limpos são quebrados e as cascas são removidas através de um sistema de aspiração. Após a remoção da casca, a soja é aquecida entre 55 °C e 60 °C em um processo conhecido como condicionamento, cujo objetivo é ajustar a umidade dos grãos e torná-los mais maleáveis para a etapa seguinte de laminação, na qual os grãos são esmagados com o auxílio de rolos lisos, visando a formação de lâminas de soja. Nesse processo, a distância entre o centro do grão e a sua superfície é diminuída, aumentando a área de saída do óleo e facilitando sua extração. Após a laminação, o óleo é extraído utilizando-se um solvente de grau alimentício, normalmente hexano, em um processo em contracorrente. Posteriormente, o óleo passa por um processo de refino e desodorização e pode ser vendido como óleo vegetal para utilização em alimentos. O farelo de soja desengordurado, por sua vez, é conduzido através de um equipamento conhecido como *flash desolventizer*, onde ocorre a evaporação quase instantânea do solvente remanescente. A seguir, ele é seco e moído e obtém-se, ao final, a farinha de soja. Conforme citado anteriormente, a farinha de soja possui um teor de proteína mínimo de 50% em base seca (THRANE et al., 2016; MANDARINO, HIRAKURI, ROESSING, 2015). A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos dos processos de preparação dos grãos e extração do óleo para a obtenção da farinha de soja desengordurada.

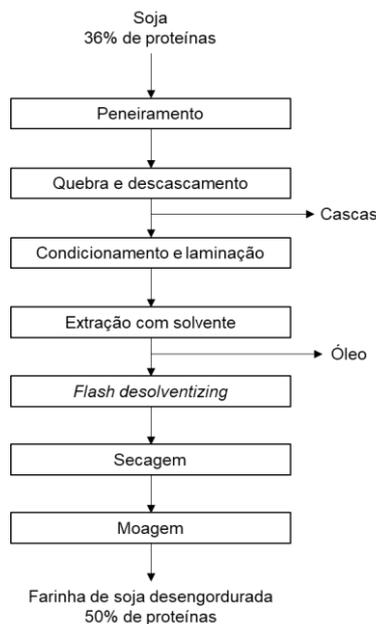


Figura 4. Diagrama de blocos do processo de obtenção da farinha de soja desengordurada

Fonte: THRANE et al., 2016; MANDARINO, HIRAKURI, ROESSING, 2015

As proteínas concentradas de soja são obtidas a partir da extração dos carboidratos solúveis – sacarose, estaquiose e rafinose – contidos na farinha de soja, aumentando, assim, o seu teor de proteína. Esse processo pode ser realizado de três formas distintas: i) extração em meio aquoso ácido com pH compreendido entre 4,2 e 4,5, isto é, próximo ao ponto isoelétrico das proteínas de soja; ii) desnaturação proteica¹ por aumento de temperatura, seguida de extração em água; iii) extração em uma solução aquosa de álcool etílico de concentração entre 60 e 90%. Em todos os casos, o objetivo do processo é o mesmo: insolubilizar-se a proteína enquanto solubiliza-se os carboidratos. A separação das duas fases é feita por meio de centrifugação. Em seguida, as propriedades funcionais das proteínas concentradas de soja podem ser modificadas através de processos de neutralização – para o caso da extração em meio ácido –, injeção de vapor e cisalhamento mecânico. Os produtos resultantes possuem alta capacidade de retenção de água e alta capacidade emulsificante. A etapa final do processo consiste na secagem do pó em secadores do

¹ A desnaturação é um processo que consiste na quebra das estruturas secundária e terciária de uma proteína. Os agentes mais comuns causadores da desnaturação são: aquecimento, agitação, radiações ultravioleta e visível ou raios X, ácidos e bases fortes. A desnaturação completa das proteínas destrói a sua atividade biológica, logo não é desejada. Contudo, a desnaturação parcial é muito utilizada na fabricação de produtos proteicos pois ela altera consideravelmente as propriedades funcionais das moléculas de proteína (CHEFTEL, CUQ, LORIENT, 1985).

tipo *spray dryer* (THRANE et al., 2016). A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos dos processos de fabricação de proteínas concentradas de soja.

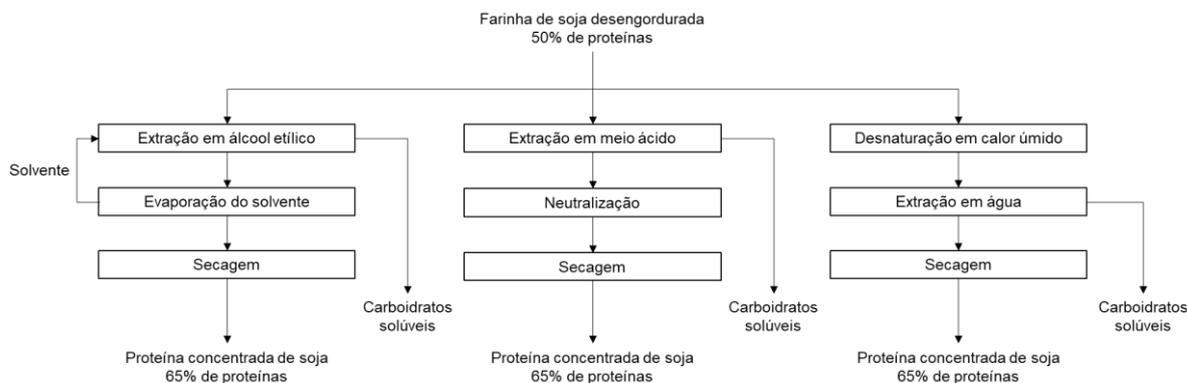


Figura 5. Diagrama de blocos dos processos de fabricação de proteínas concentradas de soja

Fonte: THRANE et al., 2016

O objetivo do processo de fabricação das proteínas isoladas de soja, por sua vez, é separar a fibra insolúvel, composta por pectina, celulose e hemicelulose, e os carboidratos solúveis e insolúveis, como a sacarose e vários outros oligossacarídeos, da proteína. Um dos processos mais utilizados para atingir esse objetivo é a extração alcalina, seguida de precipitação ácida. Na extração alcalina, mistura-se a farinha de soja com água, em proporções que variam entre 1:10 e 1:20, e aumenta-se o pH do meio até valores compreendidos entre 8 e 9, visando solubilizar-se as proteínas. A fibra insolúvel é separada do licor alcalino por centrifugação. O próximo passo envolve a precipitação ácida das proteínas e a remoção dos carboidratos solúveis. Para isso, utilizam-se ácidos de grau alimentício, como o ácido clorídrico ou o ácido fosfórico, para reduzir o pH do licor alcalino até valores próximos de 4,5. A proteína precipitada, também chamada de pasta ácida, é separada dos carboidratos solúveis, ou soro ácido, por centrifugação e, em seguida, é lavada com água para garantir a máxima remoção dos componentes não proteicos (THRANE et al., 2016).

Posteriormente, a pasta ácida é neutralizada com o auxílio de hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio até valores de pH compreendidos entre 6,8 e 7,2. As propriedades funcionais das proteínas isoladas de soja podem ser modificadas através da utilização de enzimas proteolíticas, aditivos para quebra de pontes

dissulfeto ou aumento de temperatura. Essas estratégias podem ser empregadas individualmente ou combinadas, conforme o efeito final desejado. A última etapa do processo é a secagem do produto em secador do tipo *spray dryer* (THRANE et al., 2016). A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do processo de fabricação de proteínas isoladas de soja.

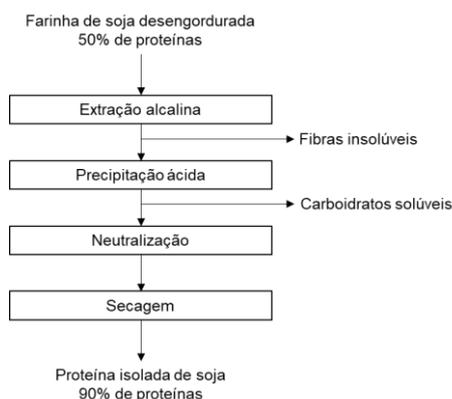


Figura 6. Diagrama de blocos do processo de produção de proteínas isoladas de soja

Fonte: THRANE et al., 2016

2.3.1 A influência do pH no processo de produção de proteínas de soja

Conforme descrito anteriormente, o processo de produção de proteínas de soja consiste, fundamentalmente, em se alterar o pH do meio visando solubilizar ou insolubilizar as diferentes frações que compõem a farinha de soja.

Rickert, Johnson e Murphy (2004) observaram em seu estudo que o rendimento da extração alcalina aumenta conforme aumenta-se o pH do meio de 7,5 para 9,0. Adicionalmente, eles observaram que a solubilidade da glicinina e da β -conglucina é muito similar para valores de pH compreendidos entre 8,0 e 10,0. Contudo, para pH inferiores a 8,0, a solubilidade da glicinina diminui, caindo drasticamente para pH inferiores a 7,0. A solubilidade da β -conglucina, por outro lado, se mantém aproximadamente constante até pH 7,0.

Verfaillie et al. (2023), por sua vez, estudaram os efeitos do pH de precipitação ácida na produção de proteínas isoladas de soja. Eles observaram que, para todos os valores de pH testados – 3,5, 4,5 e 5,5 – houve a desnaturação parcial da β -

conglucina. Além disso, eles verificaram que, para o pH de precipitação de 5,5, a razão β -conglucina/glicina foi menor, ao mesmo tempo que a solubilidade e a pureza dos isolados obtidos foram maiores.

Finalmente, o pH de neutralização influencia diretamente nas propriedades funcionais das proteínas de soja (CHEFTEL, CUQ, LORIENT, 1985), além de fazer parte da especificação final dos produtos.

2.4 Mistura de líquidos

A mistura é uma das operações unitárias mais comuns de ser encontrada tanto em processos envolvendo mudanças químicas quanto físicas. Apesar de grande parte do conhecimento que se tem sobre essa operação ser oriundo da indústria química, a mistura desempenha um papel importante nos setores alimentício, farmacêutico, de papel e celulose, petroquímico, entre outros (HARNBY, EDWARDS, NIENOW, 1997).

Para a mistura e homogeneização de líquidos, foco do presente estudo, dois requisitos devem ser atendidos para que o processo seja bem-sucedido. Primeiramente, deve haver fluxo total ou convectivo no sistema, de modo a evitar a formação de regiões estagnadas. Além disso, é necessária a existência de uma região de mistura intensiva ou de alto cisalhamento que seja capaz de proporcionar a redução das não-homogeneidades do fluido. Tanques mecanicamente agitados por impelidores são a primeira escolha quando se fala em processos de mistura. Contudo, a mistura por jatos também pode ser empregada (HARNBY, EDWARDS, NIENOW, 1997).

Na mistura por jatos, uma corrente líquida em alta velocidade, o jato, é injetada em uma corrente em baixa velocidade ou estacionária. A diferença de velocidade existente entre os fluidos cria uma camada de mistura que se propaga dos limites do jato para o seu interior, misturando-os. Em tanques, esse método é geralmente utilizado para a incorporação de uma alimentação fresca ao conteúdo do tanque ou para a homogeneização da mistura contida em seu interior (HARNBY, EDWARDS, NIENOW, 1997).

Diversos parâmetros são importantes quando se fala em mistura por jatos. As dimensões e a geometria do tanque, a velocidade e a posição do jato, a viscosidade e a densidade dos fluidos, entre outros parâmetros, influenciam diretamente na eficiência de mistura. Para o caso da densidade, quando a relação apresentada na Expressão 1 é satisfeita, significa que a diferença de massa específica entre os fluidos a serem misturados é bastante significativa e que existe uma velocidade crítica do jato abaixo da qual formam-se camadas de líquido de alta e baixa densidades e a mistura não ocorre da forma correta. Esse fenômeno é conhecido como estratificação (HARNBY, EDWARDS, NIENOW, 1997).

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} > 0,05 \quad (1)$$

Onde ρ_1 e ρ_2 são as massas específicas dos líquidos mais leve e mais pesado, respectivamente.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da empresa

O presente estudo foi desenvolvido em uma empresa alimentícia que atua na produção de proteínas e outros produtos de processamento de soja para fabricação de alimentos. A planta considerada compreende as instalações de recepção e silos, preparação e extração de óleo de soja, produção de proteínas, produção de lecitinas, caldeira e torres de resfriamento, estação de tratamento de água e estação de tratamento de efluentes. A unidade de produção de proteínas, por sua vez, é composta por quatro plantas distintas: i) planta de proteínas isoladas; ii) planta de proteínas concentradas; iii) planta de proteínas texturizadas e; iv) planta de envase. O presente estudo se concentra no sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de proteínas isoladas e concentradas e originou-se de uma demanda interna, visando mapear os problemas existentes e propor melhorias.

3.2 Descrição do sistema atual

A Figura 7 e a Tabela 2 apresentam, respectivamente, o fluxograma e a lista de medidores do sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de proteínas isoladas e concentradas.

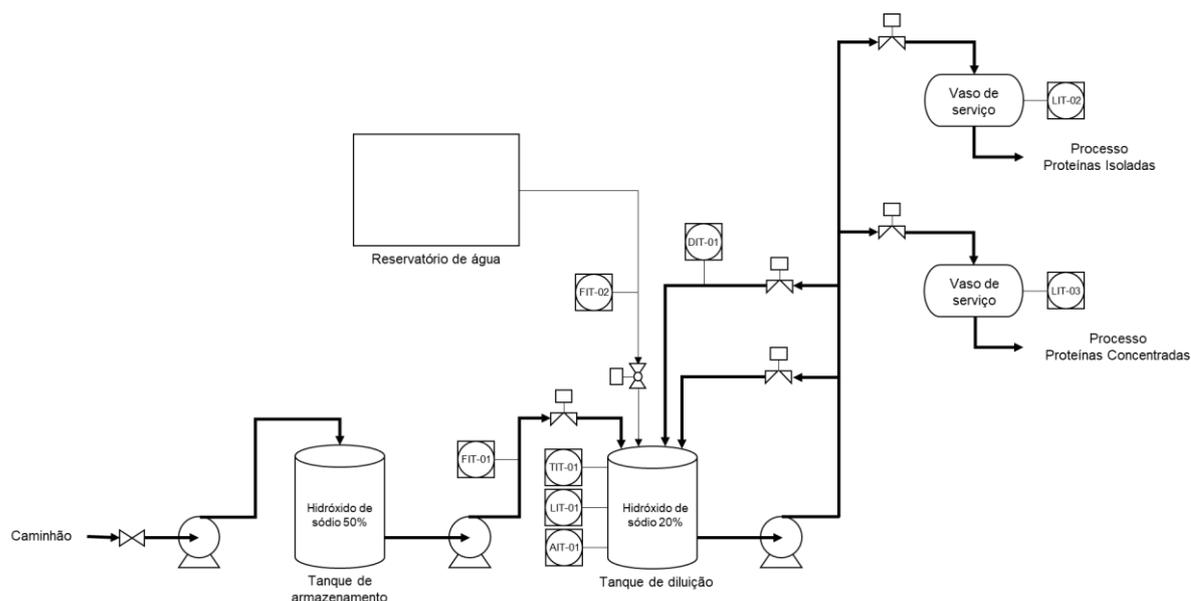


Figura 7. Fluxograma do sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio das plantas de proteínas isoladas e concentradas

Fonte: Do autor

Tabela 2. Lista de medidores do sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio

TAG	Variável medida	Descrição
FIT-01	Vazão	Vazão de hidróxido de sódio concentrado para o tanque de diluição
FIT-02	Vazão	Vazão de água potável para o tanque de diluição
TIT-01	Temperatura	Temperatura da solução de hidróxido de sódio no tanque de diluição
LIT-01	Nível	Nível do tanque de diluição
DIT-01	Densidade	Densidade da solução de hidróxido de sódio no tanque de diluição
AIT-01	Concentração	Concentração da solução de hidróxido de sódio no tanque de diluição calculada via TIT-01 e DIT-01
LIT-02	Nível	Nível do vaso de serviço de solução de hidróxido de sódio do processo de proteínas isoladas
LIT-03	Nível	Nível do vaso de serviço de solução de hidróxido de sódio do processo de proteínas concentradas

Fonte: Do autor

Hidróxido de sódio 50% é recebido em caminhões e é descarregado no tanque de armazenamento, cujo volume total é igual a 20 m³. Uma bomba centrífuga é responsável por fazer a sua transferência para o tanque de diluição, de volume total igual a 31,5 m³, onde sua concentração mássica será reduzida até aproximadamente 20%. Água potável escoia do reservatório para o tanque de diluição por gravidade. Duas linhas de recirculação presentes no tanque de diluição são responsáveis por

fazer a homogeneização da solução. A concentração real do hidróxido de sódio presente no tanque de diluição é calculada pelo AIT-01 a partir dos dados de temperatura e densidade informados pelos medidores TIT-01 e DIT-01, respectivamente. A reformulação do tanque de diluição ocorre, em média, a cada 40 horas, e o sistema é automatizado. A lógica de diluição funciona da seguinte forma:

- i. Quando o nível do tanque de diluição, medido pelo LIT-01, atinge valores inferiores a 25%, inicia-se a reformulação;
- ii. Dois controladores utilizam o nível medido pelo LIT-01 e o *set point* de concentração definido pela operação para calcular os volumes de hidróxido de sódio 50% e de água que devem ser transferidos para o tanque de diluição;
- iii. Após essa primeira transferência, é disparado um temporizador que aguarda entre 500 e 1500 segundos para que haja a homogeneização da solução. Logo, no momento da reformulação, a recirculação do tanque de diluição não é interrompida;
- iv. Quando o tempo de homogeneização chega ao final, controladores comparam a concentração real da solução com o *set point* definido pela operação e, conforme o valor medido, faz-se uma segunda transferência de hidróxido de sódio 50% ou água.

Após a diluição, o envio de hidróxido de sódio 20% para os vasos de serviço de cada planta, que ocorre, em média, 15 vezes por semana, é feito mediante a interrupção da recirculação e com o auxílio de uma bomba centrífuga. Essa bomba centrífuga é a mesma responsável por manter a recirculação no tanque de diluição e foi projetada para fornecer uma vazão de até 10 m³/h. Atualmente, opera-se com uma vazão compreendida entre 4 e 6 m³/h.

3.3 Descrição dos problemas encontrados

Primeiramente, a equipe de operação relata que o volume do tanque de armazenamento neste sistema é muito pequeno, o que acarreta a necessidade de se operar com estoques reduzidos e de receber mais de uma carga de solução por semana. A doca de recebimento de químicos é capaz de acomodar cargas de até 32 m³. Contudo, atualmente, em função deste gargalo de armazenamento, recebem-se

cargas de 15 a 25 m³. Quando o volume da carga excede o volume do tanque, duas estratégias são utilizadas para solucionar este problema: i) com o objetivo de liberar espaço no tanque de armazenamento, transfere-se o hidróxido de sódio 50% para o tanque de diluição, mesmo que isso afete a concentração da solução que irá ser utilizada no processo ou; ii) descarrega-se o restante da carga na estação de tratamento de efluentes, para utilização em suas atividades.

Durante o ano de 2022, foram recebidos, no total, 1054,74 m³ de hidróxido de sódio, o que configura uma média mensal de 87,90 m³ de solução, distribuídos em cinco cargas. Caso o volume do tanque de armazenamento fosse maior e toda a capacidade da doca de recebimento fosse explorada, o número de cargas mensais poderia ser reduzido a três.

O segundo problema observado na unidade de recebimento e diluição relaciona-se à reformulação e homogeneidade do tanque de diluição. A operação relata sempre fazer esse processo em modo manual de controle, pois a leitura do medidor de densidade DIT-01, utilizada, como visto anteriormente, para calcular a concentração da solução, apresenta atraso considerável, o que resulta em concentrações finais incorretas caso o processo seja realizado em modo automático.

Como pode-se observar na Figura 8, existe um atraso de quase 1 hora entre o início da transferência de hidróxido de sódio 50% para o tanque de diluição e a alteração da densidade medida pelo DIT-01. Conforme mencionado anteriormente, a concentração da solução, em laranja, é calculada a partir da densidade, em azul claro, e da temperatura, em amarelo. Quando se inicia a transferência de solução para o tanque de diluição, a temperatura aumenta, pois esse é um processo exotérmico, e observa-se um ligeiro aumento da concentração medida, resultante, justamente, desse aumento de temperatura. A segunda, e mais relevante, alteração da concentração acontece quando o DIT-01 detecta a mudança da densidade da solução. Conforme descrito anteriormente, a lógica de diluição envolve uma segunda transferência de hidróxido de sódio 50% ou de água, que acontece após decorrido o tempo de homogeneização. Esse tempo, contudo, é menor do que o tempo que o medidor leva para detectar a alteração de densidade e, por esse motivo, essa segunda transferência é feita de forma incorreta, resultando em uma solução com concentração diferente da desejada.

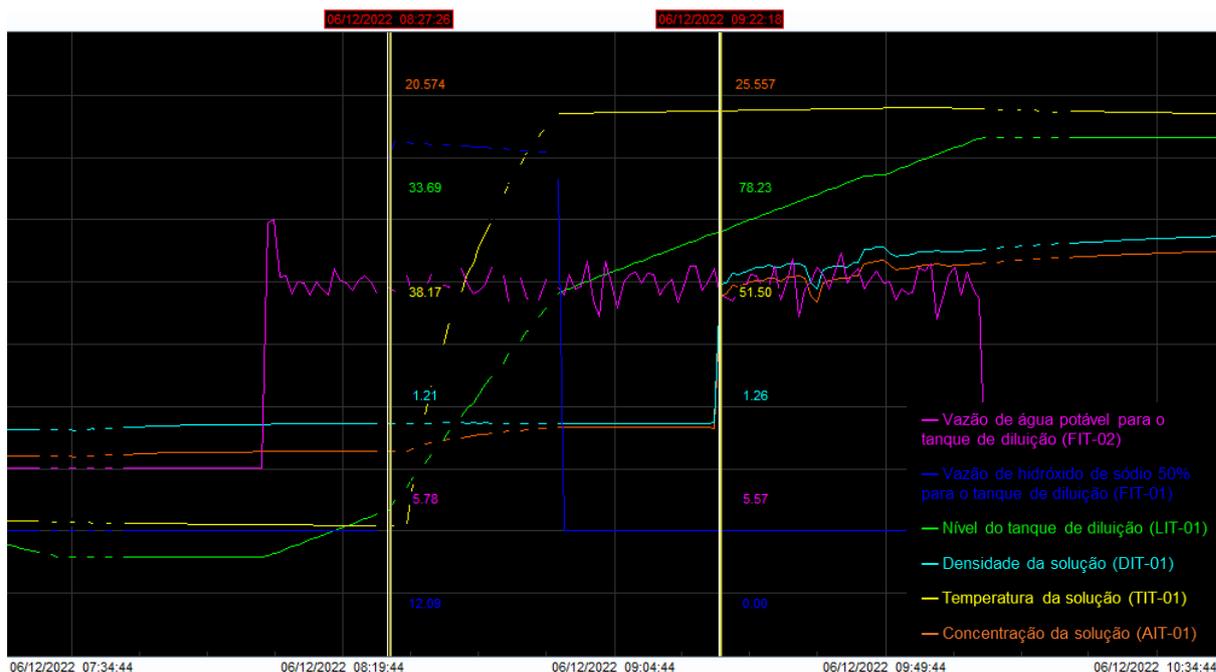


Figura 8. Exemplo de reformulação do tanque de diluição a partir de dados de processo

Fonte: Do autor

Duas hipóteses são levantadas para explicar esse atraso na medição de densidade: i) algum problema ou característica intrínseca do instrumento está ocasionando essas inconsistências ou; ii) a vazão de recirculação não é suficiente para manter a homogeneidade da solução no tanque.

O medidor de densidade em questão é um medidor do tipo Coriolis, de diâmetro nominal de 1½" e faixa de operação compreendida entre 0 e 45000 kg/h e -50 e 200 °C. Neste instrumento, a corrente a ser medida passa através de um ou mais tubos oscilatórios que, de acordo com a vazão e a densidade do fluido, tem sua frequência de oscilação alterada, permitindo realizar medições simultâneas dessas duas grandezas. Durante as últimas décadas, o interesse nos medidores do tipo Coriolis tem aumentado continuamente e hoje eles são amplamente utilizados em diversos setores da indústria. A alta precisão, a larga faixa de operação e a repetibilidade desses medidores são os principais motivos para a sua alta aceitação. Na verdade, o Coriolis é frequentemente utilizado como padrão para verificação de outros tipos de medidores (O'BANION, 2013).

Além da robustez do Coriolis, dados de processo ajudam a reforçar a ideia de que a vazão de recirculação não é suficiente para garantir a homogeneidade do tanque de diluição, como pode-se visualizar na Figura 9, que apresenta o processo de transferência de hidróxido de sódio 20% para as plantas. Observa-se que, após cada transferência, isto é, após o nível do tanque de diluição, em verde, diminuir, a concentração da solução, em laranja, também diminui, indicando que existe um gradiente de concentração no tanque. O hidróxido de sódio, por ser mais denso do que a água, acaba se acumulando na parte inferior do reservatório, o que resulta em concentrações maiores do que na parte superior. Em relação à medição de densidade, pode-se visualizar que, neste caso, a alteração da propriedade é percebida pelo medidor de forma quase imediata, descartando-se a hipótese de o atraso na medição ser oriunda do instrumento.

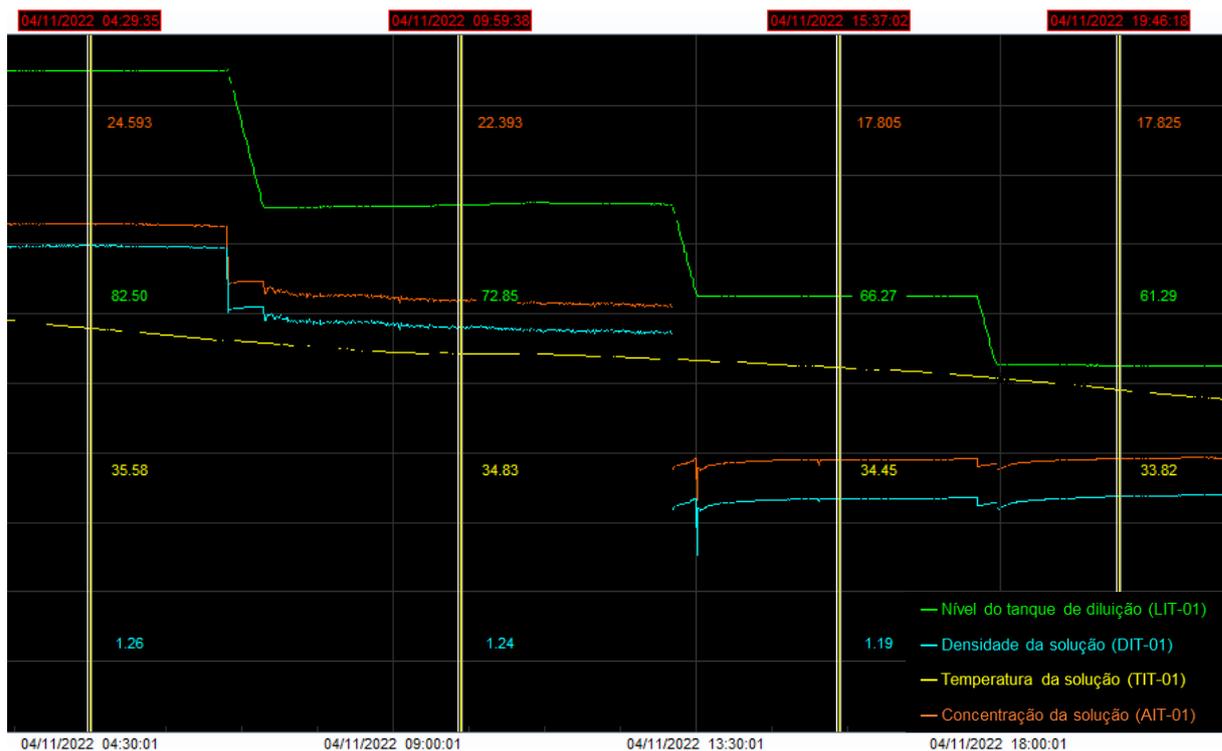


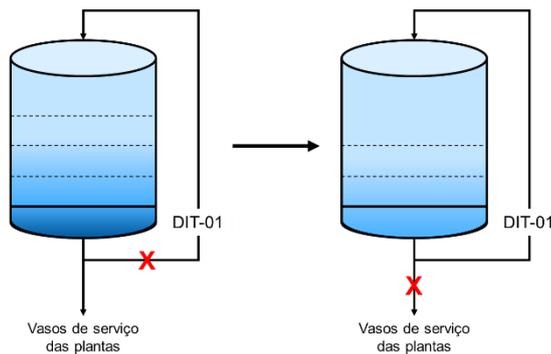
Figura 9. Dados de processo ilustrando a transferência de hidróxido de sódio 20% para as plantas

Fonte: Do autor

Vale lembrar que o DIT-01 se encontra na linha de recirculação do tanque de diluição e que, durante a transferência de solução para as plantas, a recirculação é

interrompida e, conseqüentemente, a medição de densidade também. Partindo-se da hipótese de que existe um certo grau de estratificação no tanque de diluição, após realizarmos a transferência de solução para as plantas, uma nova camada de fluido, de concentração bastante distinta da anterior, se encontra no fundo do tanque e, quando a recirculação é reativada, esse novo fluido é enviado imediatamente para o medidor, que detecta instantaneamente essa alteração. O processo de diluição, por outro lado, apresenta uma característica de continuidade, uma vez que tanto a água quanto o hidróxido de sódio estão sendo incorporados a uma massa maior de solução. Nesse caso, é necessário um tempo maior até as camadas de solução mais concentradas se deslocarem ao fundo do tanque e serem percebidas pelo medidor, ocasionando, assim, o atraso na medição. Ambos os processos estão ilustrados na Figura 10.

(a) Transferência de hidróxido de sódio para as plantas



(b) Reformulação do tanque de diluição

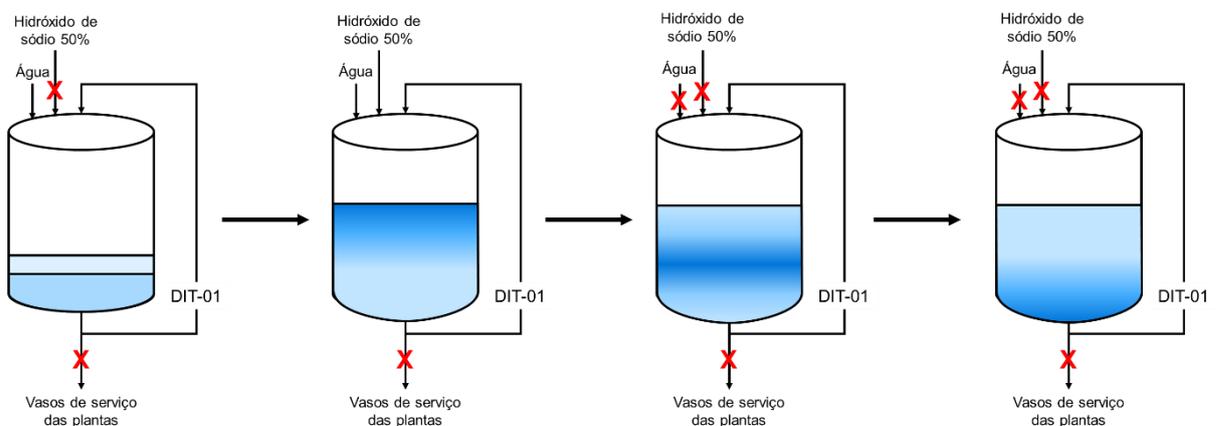


Figura 10. Representação simplificada do comportamento das camadas de fluido do tanque de diluição e sua interação com o medidor DIT-01

Fonte: Do autor

Finalmente, o último problema relatado relaciona-se ao valor da concentração da solução de hidróxido de sódio utilizada no processo. As plantas de proteínas isoladas e concentradas foram projetadas para trabalhar com uma concentração de hidróxido de sódio de 10%. Em função das limitações na capacidade de armazenamento, mencionadas anteriormente, optou-se por trabalhar com uma solução de concentração mais alta, o que resultaria em uma menor quantidade a ser dosada no processo. Contudo, a operação relata haver dificuldades para controlar pequenas vazões de solução devido aos instrumentos terem sido projetados para operar em faixas de vazão mais altas, situação que muitas vezes pode dificultar a estabilização do processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Descrição do sistema proposto

Uma alternativa para solucionar os problemas descritos anteriormente seria a substituição do sistema de diluição em batelada por um sistema de diluição em linha. Conforme Patterson (2009), a diluição em linha é um processo no qual duas correntes líquidas são misturadas de maneira controlada visando obter uma solução diluída de concentração definida. Esse processo pode ajudar a resolver gargalos de armazenamento e problemas de qualidade que as indústrias possuem. Além disso, se for bem dimensionado, pode apresentar faixas maiores de operação.

Três componentes básicos fazem parte dos sistemas de diluição em linha: i) tubulações; ii) dispositivos de bombeamento e; iii) dispositivos de mistura. No que diz respeito às tubulações, o principal ponto a ser observado é a compatibilidade entre o material dos tubos e a solução. Os dispositivos de bombeamento, por sua vez, serão geralmente bombas de deslocamento positivo, bombas dosadoras ou bombas centrífugas. Finalmente, dentre os dispositivos de mistura, tem-se os módulos de mistura e os misturadores estáticos. Os módulos de mistura nada mais são do que pequenas câmaras, isto é, tanques ou tubos de seção larga, localizadas entre as correntes de entrada e de saída do sistema (PATTERSON, 2009). Os misturadores estáticos, por outro lado, são constituídos por elementos defletores montados no interior de trechos de tubulação. Ao passar por esses defletores, o fluido é homogeneizado pela ação de difusão do escoamento e a energia utilizada para a mistura é decorrente da perda de carga gerada no sistema. Devido a esse fato, os misturadores estáticos consomem menos energia do que os misturadores dinâmicos (SANT'ANNA, 2012).

Além dos componentes básicos, também fazem parte dos sistemas de diluição em linha os instrumentos de medição de fluxo e os instrumentos analíticos. É através das informações coletadas por esses medidores que os controladores atuarão sobre bombas e válvulas do sistema, regulando a vazão de cada corrente líquida de modo a obter a concentração desejada da solução diluída (PATTERSON, 2009).

Tendo isso em conta, a Figura 11 apresenta o fluxograma do sistema de diluição em linha proposto.

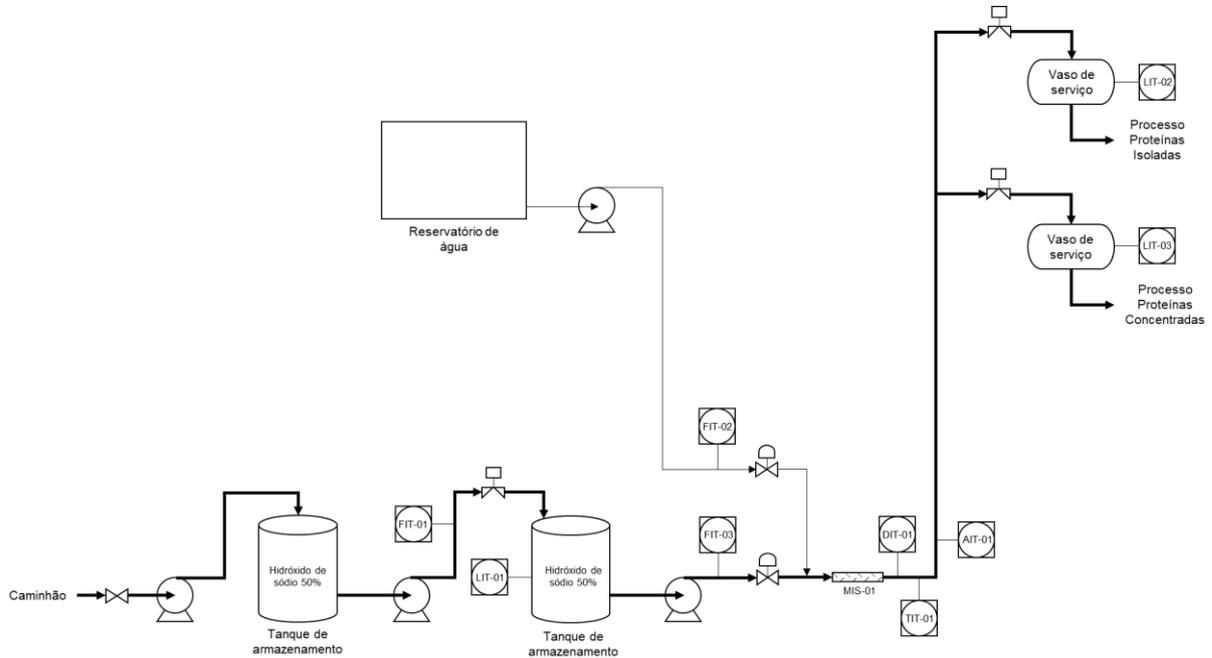


Figura 11. Fluxograma do sistema de diluição em linha proposto

Fonte: Do autor

Nesse sistema, o atual tanque de diluição seria utilizado como um segundo tanque de armazenamento e a diluição do hidróxido de sódio 50% ocorreria no momento da transferência da solução para os vasos de serviço de cada planta. A concentração da solução para aplicação nas plantas seria reduzida a 10%, conforme a especificação de projeto. Um misturador estático (MIS-01) seria responsável por fazer a homogeneização da solução. Os medidores de densidade e temperatura – DIT-01 e TIT-01, respectivamente – seriam posicionados após o misturador estático e a concentração da solução seria calculada em um procedimento análogo ao atual. Além disso, medidores de vazão e válvulas de controle seriam adicionados às linhas de hidróxido de sódio 50% e água potável, objetivando o controle do fluxo de cada corrente.

4.1.1 Seleção do modelo do misturador estático

Atualmente, existem diversos tipos de misturadores estáticos disponíveis no mercado. A escolha do melhor modelo para uma determinada aplicação depende, principalmente, do objetivo final – mistura laminar, mistura turbulenta, dispersão líquido-líquido, dispersão gás-líquido, transferência de calor – e da natureza dos fluidos – pouco ou muito viscosos (SANT'ANNA, 2012). Para a aplicação em questão, busca-se um misturador para regime turbulento e fluidos pouco viscosos.

Tendo isso em conta, o modelo escolhido é composto por elementos de mistura helicoidais com torção alternada, justapostos a um ângulo de 90°, conforme ilustrado na Figura 12. Esse tipo de misturador pode ser utilizado em aplicações de fluxo laminar, transitório e turbulento para a maioria dos problemas de mistura ou dispersão envolvendo líquidos ou gases (SANT'ANNA, 2012; NOV, 2016).



Figura 12. Misturador estático de elementos de mistura helicoidais com torção alternada

Fonte: NOV, 2016

Conforme Sant'Anna (2012), o desempenho do misturador estático de elementos helicoidais foi investigado numericamente para fluxos tridimensionais por diversos autores, colocando-o sempre entre os melhores misturadores para regime turbulento, tanto no que diz respeito ao consumo de energia quanto à eficiência de mistura. Além disso, a queda de pressão através desses misturadores é a mais baixa da indústria, o que contribui para a redução dos custos operacionais e para o aumento da capacidade do processo (NOV, 2016).

Conforme o catálogo do fornecedor, para razões volumétricas de até 100:1, razões de viscosidade de até 1000:1 e razões de densidade de até 2:1, um modelo mínimo contendo dois elementos de mistura pode ser utilizado. Ainda, a introdução do fluxo lateral na corrente principal normalmente não requer considerações especiais, podendo ser realizada por qualquer método conveniente, incluindo conexões do tipo "T" ou "Y" padrão. Contudo, para certas aplicações envolvendo razões volumétricas extremas ou viscosidades muito distintas, ou aquelas nas quais modelos mínimos são utilizados, como é o caso do presente estudo, a introdução pode ser mais crítica e configurações especiais são recomendadas.

O ponto de introdução do fluxo lateral deve estar o mais próximo possível do primeiro elemento de mistura, preferencialmente não mais do que 1 a 2 diâmetros de tubo a montante. A introdução deve ser feita no centro do tubo, paralelamente à borda de ataque do primeiro elemento, conforme mostrado na Figura 13. Além disso, a velocidade da corrente lateral deve ser no mínimo duas vezes a velocidade da corrente principal.

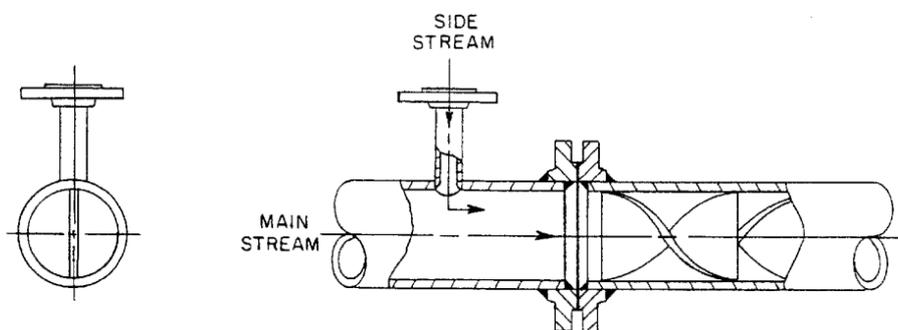


Figura 13. Configuração adequada para a introdução do fluxo lateral na corrente principal para misturadores de elementos helicoidais de modelos mínimos

Fonte: Manual do equipamento

4.1.2 Dimensionamento das bombas

O arranjo de bombas proposto para o sistema em questão consiste em duas bombas centrífugas operando em paralelo, sendo uma delas destinada ao transporte de água e a outra ao transporte de hidróxido de sódio. A presença de escoamentos em paralelo, além da grande quantidade de cotas e acessórios existentes na instalação proposta, dificulta o dimensionamento das bombas através de cálculos

manuais. Por esse motivo, optou-se pelo emprego do software Pipe Flow Expert, uma ferramenta focada na modelagem de sistemas de tubulações que fornece como resultados das simulações valores de vazão, velocidade de escoamento, pressão e perda de carga para cada ponto do sistema. Por meio das suas funcionalidades, o software permite simular desde sistemas simples até grandes redes de transporte de fluidos. É possível, além disso, realizar estudos tanto de redes bidimensionais quanto tridimensionais.

Primeiramente, tomando como base as medições e os levantamentos feitos em campo, desenhou-se, na tela de edição do aplicativo, o sistema proposto. Em seguida, definiu-se o material, o diâmetro nominal, a espessura e o comprimento dos tubos, sendo que, conforme o material selecionado, o software atribui ao tubo um valor de rugosidade absoluta, posteriormente utilizado no cálculo da perda de carga distribuída. Após definir-se as dimensões da tubulação, adicionaram-se as cotas e os acessórios, como joelhos, tês e válvulas, existentes em cada ponto do sistema. Pelo fato do misturador estático e do medidor de densidade serem acessórios bastantes específicos, sua seleção não estava disponível na biblioteca do aplicativo. Para esses casos, o Pipe Flow Expert permite a adição de perdas de carga pontuais ao sistema. Sendo assim, calculou-se a perda de carga do misturador estático e do medidor de densidade manualmente e adicionou-se ao modelo. As fórmulas e referências utilizadas nos cálculos podem ser encontradas no Apêndice A.

Após adicionarem-se todas as perdas de carga, selecionou-se a zona de escoamento de cada fluido. Nesta etapa também é necessário informar as propriedades de cada corrente, como temperatura, massa específica, viscosidade e pressão de vapor. As temperaturas da água e do hidróxido de sódio 50% foram definidas de acordo com dados de processo. Já, a temperatura da solução diluída foi definida com base em diagramas de entalpia-concentração encontrados na literatura (DOW, 2004), visto que a diluição de hidróxido de sódio em água é um processo exotérmico e depende não só da concentração da solução resultante, mas também das concentrações e temperaturas das correntes iniciais. Finalmente, a pressão de vapor é um parâmetro importante de ser avaliado quando se fala em escoamento de líquidos, uma vez que está diretamente relacionada ao fenômeno de cavitação em bombas centrífugas. Considerando que a solução de hidróxido de sódio 10%, no entanto, não passa por nenhuma bomba, a sua pressão de vapor foi aproximada pela

pressão de vapor da água, de modo a permitir a execução da simulação. Todos os valores das propriedades podem ser encontrados no Apêndice B.

A última etapa necessária à construção do modelo foi a seleção das bombas. Para realizar o dimensionamento de bombas centrífugas, o manual do Pipe Flow Expert recomenda que sejam utilizadas nas simulações bombas do tipo vazão fixa, de modo a determinar-se o *head* inicial dos equipamentos. Assim sendo, definiu-se uma vazão mássica arbitrária para cada bomba, respeitando-se, contudo, a proporção adequada entre as correntes para a produção de uma solução de concentração igual a 10%. A representação final do modelo pode ser visualizada na Figura 14.

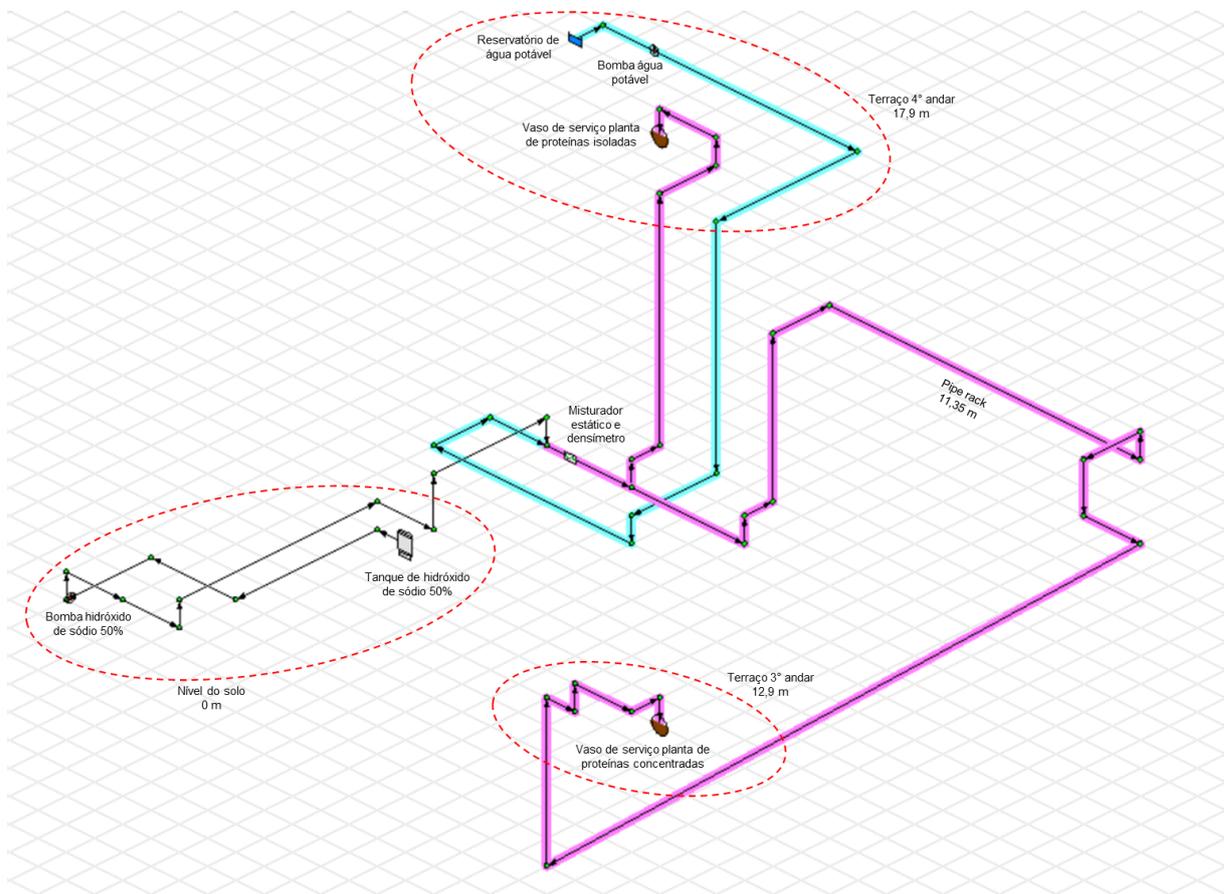


Figura 14. Tubulações do sistema de diluição proposto representadas no software Pipe Flow Expert

Fonte: Do autor

Durante a execução da simulação, constatou-se que existe uma vazão mínima de água e de hidróxido de sódio que resulta em um *head* mínimo para cada bomba

que possibilita a transferência de solução para ambas as plantas simultaneamente. Tendo isso em conta, as vazões de água e hidróxido de sódio foram aumentadas gradativamente a cada nova simulação até a obtenção deste ponto mínimo de operação, que verificou-se encontrar-se em 11,90 m³/h de solução, o que configura um *head* de 7,82 m para a bomba de água e de 22,94 m para a bomba de hidróxido de sódio. A partir desse ponto mínimo, testaram-se outras vazões de solução, visando obter-se as curvas do sistema para cada equipamento, conforme mostrado na Figura 15. Deve-se ressaltar que os sistemas que contêm bombas em paralelo, como neste caso, possuem múltiplos caminhos possíveis para o fluxo e, por esse motivo, cada bomba pode ter que suprir o *head* total do sistema, resultando em uma soma que pode ser muito maior do que a mudança de elevação ao longo de um determinado caminho do escoamento. Maiores detalhes sobre a metodologia de cálculo utilizada pelo software Pipe Flow Expert podem ser encontrados no Apêndice C.

Finalmente, para determinar-se o ponto de trabalho das bombas, deve-se combinar a curva do sistema com a curva da bomba. Para o sistema proposto, pretende-se utilizar bombas já existentes na instalação, de modo a reduzir os custos de implementação do projeto.

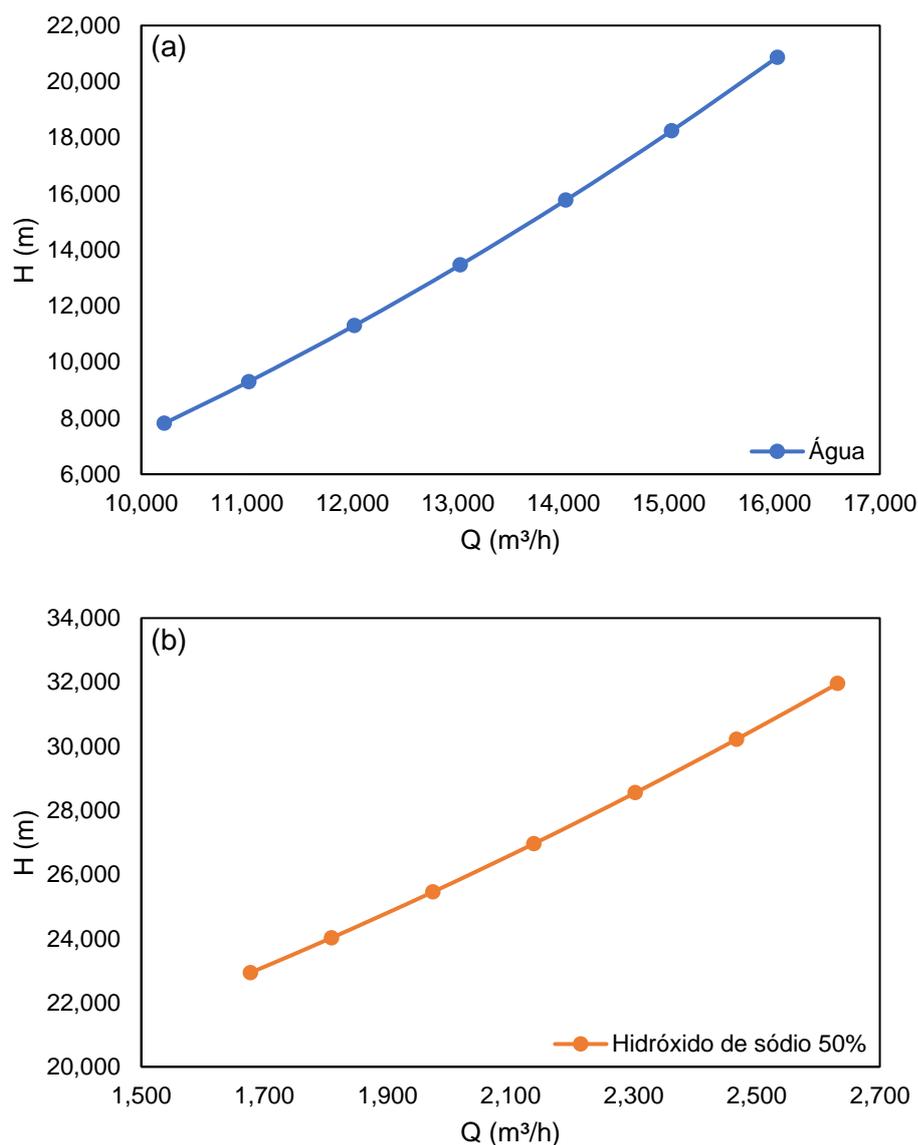


Figura 15. Curvas do sistema para as bombas de (a) água e (b) hidróxido de sódio 50%

Fonte: Do autor

4.1.3 Escolha da estratégia de controle

O controle da concentração da solução diluída poderia ser realizado através da combinação das estratégias de controle de razão e controle em cascata, conforme ilustrado na Figura 16. Sistemas de controle de razão, também chamados *ratio control*, são aplicados quando há a necessidade de manter a relação entre duas variáveis em um valor especificado. Já, o controle em cascata consiste na utilização de pelo menos dois controladores em série com um único valor de *set point* independente inserido no controlador primário – também chamado controlador mestre. O sinal de saída do

controlador primário é utilizado como *set point* para o controlador secundário – também denominado controlador escravo. Cada controlador tem sua própria entrada por meio da medição de uma variável do processo, mas somente o controlador primário pode ter um valor de *set point* independente e apenas o controlador secundário atua sobre o processo (GARCIA, 2019).

Para o sistema proposto, o controlador AIC-01 receberia a concentração de processo e o *set point* definido pela operação e escreveria no bloco R qual a razão hidróxido de sódio/água necessária para levar a variável de processo ao *set point*. Com base na vazão de água, que seria mantida livre, o bloco R calcularia qual deveria ser a vazão de hidróxido de sódio 50% para atingir o *set point* de concentração. O controlador FIC-03 receberia a vazão de hidróxido de sódio 50% e a vazão calculada pelo bloco R e atuaria na válvula de controle.

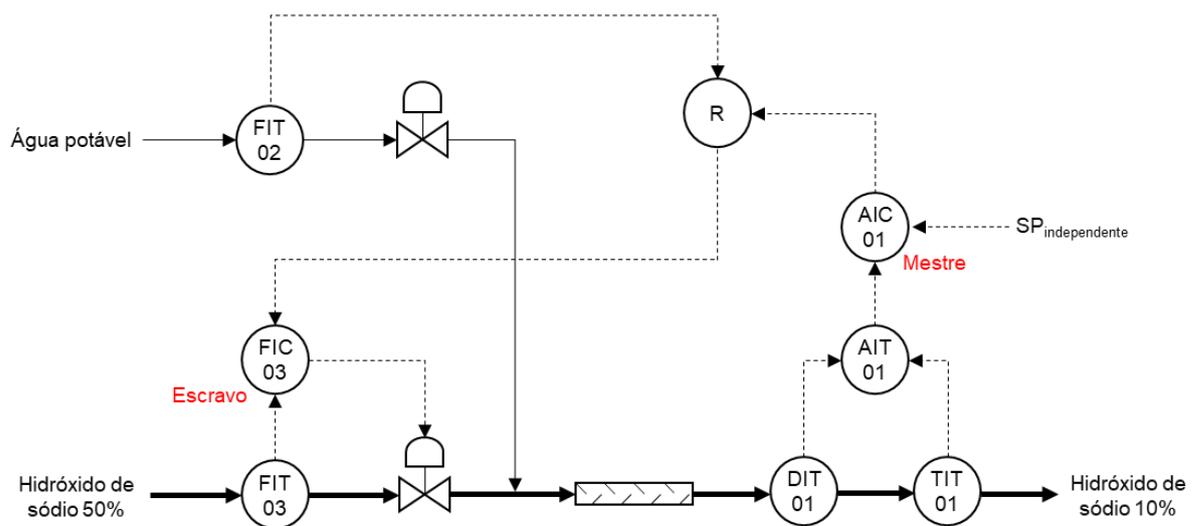


Figura 16. Estratégia de controle da concentração da solução diluída

Fonte: Do autor

4.2 Benefícios da implementação do sistema proposto

O primeiro benefício advindo da implementação do sistema proposto seria o aumento da capacidade de armazenamento de hidróxido de sódio 50% de 20 m³ para 51,5 m³, o que permitiria a resolução do gargalo de armazenamento existente. Um gargalo pode ser definido como qualquer obstáculo que possa influenciar o andamento e o resultado dos processos em uma empresa. Ele pode surgir em qualquer etapa, resultando em queda de desempenho e, conseqüentemente, em

custos elevados, equipes menos produtivas e redução da lucratividade e da competitividade, por exemplo (RIGON, 2014). O hidróxido de sódio é um material auxiliar de grande importância na fabricação de proteínas de soja. Na sua falta, o processo é interrompido e o produto deixa de ser produzido. Operar continuamente com um estoque baixo torna-se desvantajoso para a empresa pois mediante qualquer problema ou perturbação que aconteça no fornecimento de solução, ocorrerá a falta do material e a parada das plantas.

Adicionalmente, com o aumento da capacidade de armazenamento, seria possível diluir-se a solução de aplicação no processo até a sua concentração original de projeto, isto é, 10%, reduzindo o desgaste de equipamentos. Quando se fala em desgaste de válvulas e atuadores, por exemplo, os indicadores de percurso e reversão são de grande relevância. O percurso compreende o somatório de todas as mudanças de posição do atuador. Já, a reversão nada mais é do que a quantidade de vezes em que houve alteração na direção do atuador. Ao trabalhar fora da faixa de operação das válvulas, podemos estar acelerando o seu desgaste, pois ela necessita de uma atuação mais intensa para conseguir manter o processo no *set point* desejado, e isso se reflete no aumento dos indicadores de percurso e reversão.

Um outro benefício que o novo sistema de diluição traria à empresa seria a obtenção de soluções de concentração mais estáveis ao longo do tempo, o que reduziria a variabilidade do processo e permitiria uma operação mais regular. Um processo com alta variabilidade peca não apenas em atender as demandas necessárias de qualidade, mas também acaba tendo um custo consideravelmente maior que o necessário. O processamento da soja, por si só, já é uma atividade que possui uma alta variabilidade, uma vez que as propriedades dos grãos nunca são as mesmas, podendo variar radicalmente de acordo com a região de cultivo e com a safra. Assim sendo, manter as demais variáveis o mais estável e previsíveis possível é essencial para o bom desempenho do processo.

Uma outra vantagem que a instalação proposta apresenta relaciona-se ao custo de implementação e, posteriormente, de operação do sistema. Benefícios semelhantes aos citados anteriormente poderiam ser obtidos, por exemplo, mediante a aquisição de um tanque de armazenamento de maior volume e de um sistema de agitação mecânica para o tanque de diluição. Contudo, essa alternativa necessitaria

de um investimento inicial maior para ser colocada em prática. Além disso, os custos de manutenção e operação de um sistema de impelidores são mais elevados do que os de um misturador estático.

Por último, mas não menos importante, esse sistema reduziria o tempo de serviço repetitivo da operação, visto que a diluição passaria a ser realizada em modo automático de controle, disponibilizando esse colaborador para atuar em outras tarefas de maior relevância.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível avaliar o sistema de recebimento e diluição de hidróxido de sódio de uma empresa produtora de proteínas de soja, evidenciando os problemas existentes e a necessidade da realização de melhorias à instalação. A partir dos levantamentos e análises realizadas, foi possível concluir que o armazenamento e a diluição de hidróxido de sódio são pontos que merecem atenção quando se fala na produção de proteínas de soja. Operar com uma baixa capacidade de armazenamento pode levar à falta da solução e, conseqüentemente, à interrupção da produção, o que implica em desequilíbrios no estoque, atraso de entregas e desperdício de recursos materiais e humanos. Além disso, uma diluição ineficiente e uma concentração de trabalho fora da faixa de projeto da planta podem resultar no aumento da variabilidade do processo, no aumento do desgaste dos equipamentos e em dificuldades de estabilização do processo mediante a presença de distúrbios.

Adicionalmente, concluiu-se que o dimensionamento inadequado de sistemas de mistura por jatos pode levar à formação de camadas líquidas de densidades distintas dentro do tanque, em um fenômeno conhecido como estratificação. Nesse contexto, sistemas de diluição em linha podem ser extremamente benéficos para as indústrias, uma vez que são capazes de resolver não só problemas de capacidade e armazenamento, mas também de qualidade, o que reflete em ganhos financeiros para a empresa. Para o sistema estudado, um misturador estático de modelo mínimo com dois elementos de mistura helicoidais seria suficiente para promover a homogeneização necessária. Ainda, constatou-se que existe um ponto mínimo de

operação das bombas abaixo do qual a transferência simultânea de hidróxido de sódio para as plantas de proteínas isoladas e concentradas é inviabilizada.

Para trabalhos futuros, sugere-se a modelagem, através da fluidodinâmica computacional, dos sistemas descritos neste trabalho, visando validar as hipóteses levantadas. Além disso, cabe a realização de um estudo econômico, visando analisar o investimento necessário, os custos de operação e o benefício financeiro do sistema proposto.

REFERÊNCIAS

- CHEFTEL, Jean Claude; CUQ, Jean-Louis; LORIENT, Denis. Amino acids, peptides, and proteins. In: FENNEMA, Owen R.. **Food Chemistry**. Marcel Dekker Inc., 2ª edição, Nova York, 1985.
- DALL'AGNOL, Amélio; ROESSING, Antonio Carlos; LAZZAROTTO, Joelsio José; HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; OLIVEIRA, Arnold B.. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Embrapa Soja, Circular Técnica 43, Londrina, 2007.
- DOW. **The Caustic Soda Solution Handbook**. The Dow Chemical Company, Midland, 2004.
- EMBRAPA. **Soja em números (safra 2021/22)**. Embrapa Soja, Londrina, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>> Acesso em: 07/04/2023.
- GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais: estratégias modernas**. Editora Blucher, volume 2, São Paulo, 2019.
- HAYNES, W.M.; LIDE, David R.; BRUNO, Thomas J.. **CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data**. CRC Press, 95ª edição, Florida, 2014.
- HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; LAZZAROTTO, Joelsio José. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Embrapa Soja, Documentos 349, Londrina, 2014.
- LIN, Hong; WU, Lisha; WANG, Shuhui. Proteins. In: WANG, Dongfeng; LIN, Hong; KAN, Jianqian; LIU, Linwei; ZENG, Xiaoxing; SHEN, Shengrong. **Food chemistry**. Nova Science Inc., Nova York, 2012.
- MANDARINO, José Marcos Gontijo; HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; ROESSING, Antonio Carlos. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. Embrapa Soja, Documentos 171, Londrina, 2015.
- MATTOS, Edson Ezequiel de; FALCO, Reinaldo de. **Bombas industriais**. Editora Interciência, 2ª edição, Rio de Janeiro, 1998.
- MERCK. **Solução 50% de hidróxido de sódio para análise EMSURE®**. Ficha de informação de segurança de produto químico, Merck S.A., São Paulo, 2021.
- NOV. **Kenics™ Static Mixer Technology**. National Oilwell Varco, Houston, 2016
- HARNBY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W.. **Mixing in the Process Industries**. Butterworth-Heinemann, 2ª edição, Oxford, 1997.
- PATTERSON, Brandon J.. **A Closer Look at Automated In-Line Dilution**. BioPharm International, v. 22, n. 10, p. 52 – 65, Iselin, 2009
- RICKERT, David A.; JOHNSON, Lawrence A.; MURPHY, Patricia A.. **Improved fractionation of glycinin and β -conglycinin and partitioning of phytochemicals**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, n. 52, p. 1726 – 1734, 2004.
- SANT'ANNA, Mikele Cândida Sousa. **Otimização de um misturador estático para produção de biodiesel**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2012
- TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: cálculo**. LTC, 9ª edição, Rio de Janeiro, 1999.
- THRANE, M.; PAULSEN, P. V.; ORCUTT, M. W.; KRIEGER, T. M.. Soy protein: impacts, productions and applications. In: NADATHUR, Sudarshan R.; WANASUNDARA, Janitha P. D.; SCANLIN, Laurie. **Sustainable protein sources**. Academic Press, Londres, 2016.

TIAN, Huafeng; GUO, Gaiping; FU, Xuewei; YAO, Yuanyuan; YUAN, Li; XIANG, Aimin. ***Fabrication, properties and applications of soy-protein-based materials: a review***. International Journal of Biological Macromolecules, n. 120, p. 475 – 490, 2018.

United States Department of Agriculture. ***Soybeans: World Supply and Distribution***. 2022. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>> Acesso em: 18/02/2023.

VERFAILLIE, Diète; JANSSEN, Frederik; VAN ROYEN, Geert; WOUTERS, Arno G. B.. ***A systematic study of the impact of the isoelectric precipitation process on the physical properties and protein composition of soy protein isolates***. Food Research International, n. 163, 2023.

WHITE, Frank M. ***Mecânica dos Fluidos***. AMGH Editora, 8ª edição, Porto Alegre, 2018.

APÊNDICE A. Fórmulas utilizadas para o cálculo de queda de pressão do misturador estático e do medidor de densidade

A queda de pressão gerada por um determinado misturador estático é expressa como a relação entre a queda de pressão gerada pelo misturador e a queda de pressão gerada pelo tubo vazio, ambas nas mesmas condições de escoamento (SANT'ANNA, 2012). As Equações 1 e 2 apresentam, respectivamente, a queda de pressão do misturador estático em regime laminar e turbulento.

$$\Delta P_{misturador} = K_L \Delta P_{vazio} \quad (1)$$

$$\Delta P_{misturador} = K_T \Delta P_{vazio} \quad (2)$$

Onde $\Delta P_{misturador}$ é a queda de pressão gerada pelo misturador (Pa), ΔP_{vazio} é a queda de pressão gerada pelo tubo vazio (Pa) e K_L e K_T são parâmetros adimensionais que variam conforme o modelo do misturador. Os valores de K_L e K_T podem ser encontrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de queda de pressão para misturadores estáticos

Misturador	K_L	K_T
Tubo vazio	1	1
KMS	6,9	150
KVM	-	24
SMX	37,5	500
SMXL	7,8	100
SMV	-	100 a 200
SMF	5,6	130
SMR	46,9	-

Fonte: SANT'ANNA, 2012

A queda de pressão do medidor de densidade, por sua vez, foi calculada conforme o manual do instrumento. As Equações 3 e 4 apresentam, respectivamente, a queda de pressão do medidor de densidade em regime laminar e turbulento.

$$\Delta P_{densímetro} = K_1 \nu \dot{m} + \frac{K_2 \nu^{0,25} \dot{m}^2}{\rho} \quad (3)$$

$$\Delta P_{densímetro} = K \nu^{0,25} \dot{m}^{1,85} \rho^{-0,86} \quad (4)$$

Onde $\Delta P_{densímetro}$ é a queda de pressão (mbar), ν é a viscosidade cinemática (m^2/s), \dot{m} é a vazão mássica (kg/s), ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3) e K , K_1 e K_2 são constantes dependentes do diâmetro nominal do equipamento. Os valores de K , K_1 e K_2 podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4. Constantes para cálculo de queda de pressão para densímetros do tipo Coriólis

Diâmetro nominal	Diâmetro (m)	K	K_1	K_2
8	$5,35 \times 10^{-3}$	$5,70 \times 10^7$	$9,60 \times 10^7$	$1,90 \times 10^7$
15	$8,30 \times 10^{-3}$	$5,80 \times 10^6$	$1,90 \times 10^7$	$10,60 \times 10^5$
25	$12,00 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^6$	$6,40 \times 10^6$	$4,50 \times 10^5$
40	$17,60 \times 10^{-3}$	$3,50 \times 10^5$	$1,30 \times 10^6$	$1,30 \times 10^5$
50	$26,00 \times 10^{-3}$	$7,00 \times 10^4$	$5,00 \times 10^5$	$1,40 \times 10^4$
80	$40,50 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^4$	$7,71 \times 10^4$	$1,42 \times 10^4$
100	$51,20 \times 10^{-3}$	$3,54 \times 10^3$	$3,54 \times 10^4$	$5,40 \times 10^3$
150	$68,90 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^3$	$2,04 \times 10^4$	$6,46 \times 10^2$
250	$102,26 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^2$	$6,10 \times 10^3$	$1,33 \times 10^2$

Fonte: Manual do equipamento

APÊNDICE B. Propriedades dos fluidos empregadas na simulação com o software Pipe Flow Expert

A Tabela 5 apresenta as propriedades utilizadas na simulação com o software Pipe Flow Expert, visando o dimensionamento das bombas do sistema.

Tabela 5. Propriedades dos fluidos empregadas na simulação com o software Pipe Flow Expert

Fluido	Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica (Pa.s)	Pressão de vapor (kPa)
Água	20	998,21	$1,002 \times 10^{-3}$	2,3393
Hidróxido de sódio 50%	20	1520	$71,8 \times 10^{-3}$	0,2
Hidróxido de sódio 10%	35	1102	$1,40 \times 10^{-3}$	5,6365 ²

Fonte: DOW, 2004; HAYNES, LINE, BRUNO, 2014; MERCK, 2021

² Dado aproximado pela pressão de vapor da água a 35°C, conforme explicado ao longo do texto.

APÊNDICE C. Metodologia de cálculo de perda de carga empregada pelo software Pipe Flow Expert

A perda de carga distribuída é calculada através da relação de Darcy-Weisbach (Equação 5) com fator de atrito obtido através da equação de ColeBrook-White (Equação 6).

$$h_{fd} = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Onde h_{fd} é a perda de carga distribuída (m), f é o fator de atrito (adimensional), L é o comprimento do tubo (m), d é o diâmetro interno do tubo (m), v é a velocidade do escoamento (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), ε é a rugosidade absoluta do material do tubo (m) e Re é o número de Reynolds (adimensional).

A perda de carga localizada, por sua vez, é calculada através do método direto, conforme Equação 7.

$$h_{fl} = K \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Onde h_{fl} é a perda de carga localizada (m), K é uma constante que varia em função do acessório (adimensional), v é a velocidade do escoamento (m/s) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).