

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**MELHORIA DO NÍVEL DE CONTROLE DA
SEPARAÇÃO PRIMÁRIA ENTRE AMIDO E GLUTEN EM
UMA REFINARIA DE MILHO**

Aluna: Vitória de Oliveira, 744841

E-mail: vitoria.oliveira@estudante.ufscar.br

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan

São Carlos - SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 12 de setembro de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Professor Orientador: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, DEQ/UFSCar

Professor Convidado: Prof. Dr. Thiago Pádua, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Jose Maria C. Bueno, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me abençoado em toda a minha trajetória e ter me ajudado a superar todos os obstáculos ao longo destes anos. Em sequência, agradeço a minha família, em especial aos meus pais Andréia Maria Moreira e Agnes Muniz de Oliveira que me deram todo o suporte e incentivo para prosseguir com meu sonho de cursar uma Universidade Federal.

Agradeço também aos meus avôs, com destaque ao Francisco Martins de Oliveira, com quem eu pude desfrutar momentos incríveis.

Agradeço à *Ingredion Incorporated* pelas diversas experiências e oportunidades, assim como, por fornecer as informações para que fosse possível a realização desse trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus professores e a todos os integrantes dos departamentos e secretarias da Universidade Federal de São Carlos que foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

RESUMO

A *Ingredion Incorporated* é uma empresa *Business to Business* (B2B) que atua no ramo de processamento e refino de ingredientes industriais de origem agrícola, principalmente a base de milho. O primeiro processo na cadeia de refino de milho é a Moagem e o objetivo desta etapa é efetuar a separação dos componentes do grão (casca, germe, amido e glúten) com máximo grau de pureza, mínimo uso de energia e mínimas perdas. Deste modo, determina-se o rendimento de produção (*production yield*) atribuído a cada componente. Com o intuito de melhorar o desempenho operacional, a confiabilidade da etapa de Moagem e aumentar o rendimento em glúten da fábrica situada no município de Mogi-Guaçu, São Paulo, foi prevista a inserção e substituição de instrumentos com melhor desempenho e tecnologia. A operação seria, então, conduzida de forma automática empregando um Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Na Moagem, a separação do amido e do glúten é realizada através de centrífugas de separação e, portanto, para garantir uma boa qualidade do processo é necessário realizar o controle das correntes de *underflow* e *overflow*. Normalmente, controla-se a densidade do *underflow* a partir de instrumentação. A separação não adequada acarreta baixo rendimento final em glúten, além da perda de amido. Como recomendação para a instalação de medidores de densidade é imprescindível o acompanhamento dos seguintes fatores: aeração do fluido (existência de bolhas de ar) e acúmulo de material nas linhas e no instrumento. Neste trabalho, será apresentada a aplicação de um sistema de medição de densidade, a fim de realizar um controle mais rigoroso do *underflow* das centrífugas de separação. Este sistema foi composto por uma caixa desaeradora, um densímetro mássico - que atua a partir do princípio do Efeito Coriolis - e uma válvula de controle v-ball. Além disso, foi previsto um sistema de *Clean in Place* (CIP), uma vez que a limpeza do instrumento se mostrou bastante relevante para o seu desempenho. Utilizando as recomendações da Engenharia Corporativa da Ingredion, criou-se um procedimento operacional padrão para coletar diversas amostras do *underflow* e aferir a sua densidade em $^{\circ}\text{Be}$ através de procedimento analítico padronizado. Ao final do projeto tratou-se os dados obtidos, buscando comparar a medição em bancada e aquela indicada por instrumentos com princípios de funcionamento diferentes (Coriolis e diferença de pressão). Verificada a credibilidade dentro do processo, selecionou-se a melhor opção de densímetro levando em consideração além dos fatores já discutidos questões de segurança, operação, intertravamentos e parada/queda de energia as quais afetam o sistema de medição de densidade desenvolvido pela Ingredion.

Palavras-chaves: refino de milho; amido e glúten; centrífugas de separação; instrumentação; densímetro mássico.

ABSTRACT

Ingredion Incorporated is a Business to Business (B2B) company that operates in the field of processing and refining industrial ingredients of agricultural origin, mainly corn-based. The first process in the corn refining chain is Wetmilling and the objective of this step is to separate the grain components (husk, germ, starch and gluten) with maximum purity, minimum energy use and minimum losses. In this way, the production yield of each component is determined. In order to improve operational performance, the reliability of the Grinding stage and increase the gluten yield of the factory located in the municipality of Mogi-Guaçu, São Paulo, the insertion and replacement of instruments with better performance and technology was planned. The operation would then be carried out automatically using a Proportional Integral Derivative Controller (PID). In Wetmilling, the separation of starch and gluten is carried out through separating centrifuges and, therefore, to ensure a good quality of the process, it is necessary to control the underflow and overflow currents. Normally, underflow density is controlled through instrumentation. Inadequate separation leads to low final gluten yield, in addition to starch loss. As a recommendation for the installation of density meters, it is essential to monitor the following factors: fluid aeration (existence of air bubbles) and accumulation of material in the lines and in the instrument. In this work, the application of a density measurement system will be presented, to carry out a more rigorous control of the underflow of the separation centrifuges. This system was composed of a deaeration box, a mass density meter - which operates on the principle of the Coriolis Effect - and a v-ball control valve. In addition, a Clean in Place (CIP) system was foreseen, since the cleaning of the instrument proved to be very relevant to its performance. Using the recommendations of Ingredion's Corporate Engineering, a standard operating procedure was created to collect several samples from the underflow and measure its density in °Be through a standardized analytical procedure. Subsequently, the data obtained was treated, seeking to compare the measurement on the bench and that indicated by instruments with different operating principles (Coriolis and pressure difference). After verifying the credibility within the process, the best hydrometer option was selected considering the aspects previously discussed and other points involving issues of safety, operation, interlocks and stop/outage that affect the density measurement system developed by Ingredion discussed.

Keywords: corn refining; starch and gluten; separation centrifuges; instrumentation; mass densimeter.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	2
AGRADECIMENTOS	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Moagem Úmida	13
2.2. Separação Primária do Amido e Glúten.....	16
2.3. Yield de Glúten.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1. Materiais	22
3.2. Equipamento	23
3.2.1. Centrífuga de Separação;	23
3.2.2. Caixa de Desaeração;	25
3.2.3. Densímetro Mássico.....	26
3.2.4. Densímetro de Diafragma	30
3.2.5. Válvula V-Ball.....	32
3.3. Procedimento Experimental	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1. Densímetro Mássico	38
4.2. Densímetro de Diafragmas.....	42
5. CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação simplificada do processo de moagem úmida	11
Figura 2	Fluxograma do processo de moagem úmida.	15
Figura 3	Fluxograma simplificado do sistema de medição de densidade automática.	21
Figura 4	Desenho típico da cuba de uma centrífuga separadora de bico com sistema de recirculação de sólidos.	24
Figura 5	Desenho mecânico com respectivas dimensões do modelo Merco CH-38 GOF com motor.	25
Figura 6	Esquema simplificado da disposição dos equipamentos e fluxo do fluido no sistema de medição de densidade.	26
Figura 7.1	Densímetro mássico e seus componentes – vista frontal.	27
Figura 7.2	Densímetro mássico e seus componentes – vista lateral.	28
Figura 8	Comparação entre oscilação detectada pelos sensores sem vazão mássica e com vazão mássica nos tubos.	29
Figura 9	Curva da frequência de oscilação do conjunto em função da densidade do fluido escoando.	30
Figura 10	Densímetros de diafragma	31
Figura 11	Parte interna de um transmissor de densidade de diafragma	32
Figura 12	Válvula esfera	33
Figura 13	Válvula V-Ball	34
Figura 14	Válvula V-Ball e seus componentes em posição fechada e aberta	35
Figura 15	(a) Exemplo de coleta de amostra e aferição de densidade (b) instantânea, (c) com 30 segundos de espera e (d) com 5 minutos de espera.	36
Figura 16	Acúmulo de suspensão de amido e glúten nos diafragmas do medidor de densidade.	37
Figura 17	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido densímetro mássico dos meses de setembro e outubro.	38
Figura 18	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro mássico dos meses de setembro e outubro, destacando os dados atribuídos a falta de limpeza.	39
Figura 19	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro mássico dos meses de setembro e outubro, excluindo os dados atribuídos a falta de limpeza.	40
Figura 20	Curvas para o °Be da Moagem versus °Be do underflow da Separação Primária exibido pelo densímetro mássico dos meses de setembro e outubro.	41
Figura 21	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro.	42
Figura 22	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro, destacando os dados atribuídos a falta de limpeza.	43

Figura 23	Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro, excluindo os dados atribuídos a falta de limpeza.	44
Figura 24	Curvas para o °Be da Moagem versus °Be do underflow da Separação Primária exibido pelo densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro.	45
Figura 25	Curvas e fatores de correlação para o °Be do aerômetro versus o °Be exibido nos densímetros.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Consumo de milho humano e industrial do Brasil em 2022.	13
Tabela 2	Rendimentos dos produtos de moagem úmida de milho derivados do modelo de Ramirez (2008).	18
Tabela 3	Comparação de dados de rendimento industrial com dados de estudo em escala de laboratório e de planta piloto.	19

1. INTRODUÇÃO

A *Ingredion Incorporated*, conhecida anteriormente por *Corn Products International* é uma empresa americana fundada em 1906 com sede em Westchester, Illinois, nos Estados Unidos. A *Ingredion Incorporated* é uma empresa *Business to Business* (B2B) - uma organização que tem como clientes outras organizações - que atua no ramo de processamento e refino de ingredientes industriais de origem agrícola, principalmente a base de milho (CARREIRAS INGREDION, 2021)

A *Ingredion Incorporated* é uma empresa líder em soluções em ingredientes de origem natural. Com clientes em mais de 40 países, atende mais de 60 diferentes setores da indústria, como por exemplo: alimentos; bebidas; papel; nutrição animal; farmacêutico; higiene pessoal; entre outros (DEVELOPING IDEAS. DELIVERING SOLUTIONS, 2021).

A empresa está presente no Brasil desde 1929, quando instalou a primeira planta em São Paulo, ainda sob o nome de Refinações de Milho Brasil, tornando-se depois *Corn Products Brasil* (CARREIRAS INGREDION, 2021). A Ingredion Brasil é a sede brasileira da estadunidense *Ingredion Incorporated* e possui cinco unidades no país. Este estudo contém dados provenientes da fábrica situada em Mogi-Guaçu/SP, sendo esta a terceira maior do grupo Ingredion em todo o mundo (DEVELOPING IDEAS. DELIVERING SOLUTIONS, 2021).

A fábrica de Mogi-Guaçu possui uma capacidade de moagem úmida de milho de 3000 toneladas por dia (TPD). O processo de moagem úmida visa a extração da maior quantidade possível de amido, efetuando a separação dos componentes do grão de milho com máximo grau de pureza, mínimo uso de energia e mínimas perdas. O milho é a principal fonte de amido refinado em todo o mundo devido à sua disponibilidade, custo relativamente baixo, alto teor de amido (>65%) e valor de seus coprodutos (FERREIRA et al. 2014). Além disso, é fonte de energia, proteína, gordura e fibras; sua composição (em base seca) é de aproximadamente 72% de amido, 9,5% proteínas, 9% fibra e 4% de óleo (REGITANO-D'ARCE et al. 2015).

Os produtos resultantes do processo de moagem úmida (casca, germe, amido e glúten) entram como matéria-prima nas seguintes aplicações:

Amido: usado em indústrias de papel, cartões, cartolinas, alimentícia e farmacêutica. Pode também ser convertido para fabricação de glucose.

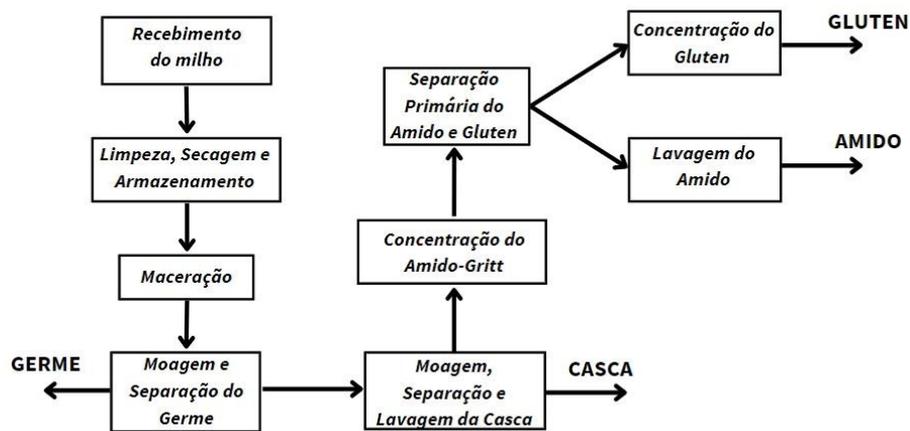
Casca: Usada como ração animal para gado e preparação de pet-food.

Glúten: Usado principalmente como fonte de proteínas em nutrição animal.

Germe: Depois de extraído o óleo, a torta de germe é utilizada na fabricação de rações.

Após a colheita e recebimento do milho, os grãos passam por limpeza, secagem e armazenamento. Em sequência, inicia-se o processo de moagem úmida, o qual é composto pela maceração e moagem do grão. Esta última é dividida nas seguintes etapas: Moagem e Separação do Germe; Moagem, Separação e Lavagem da Casca; Concentração do Amido-Gritt; Separação Primária do Amido e Glúten; Concentração do Glúten e Lavagem do Amido (INGREDION, 2022). O processo é representado pelo diagrama apresentado na Figura 1.

Figura 1: Representação simplificada do processo de moagem úmida.



Fonte: Acervo pessoal.

Este trabalho apresenta em detalhe um estudo sobre a Separação Primária, uma vez que esta é a primeira etapa em que realmente ocorre a separação do amido dos

demais componentes do grão. Sendo todas as etapas de separação elencadas acima baseadas nas propriedades físicas dos componentes do grão de milho, principalmente nas diferenças entre tamanho e densidade, centrífugas de disco são comumente utilizadas na fábrica de Mogi-Guaçu (INGREDION, 2022).

Na etapa de Separação Primária, cinco centrífugas separadoras (ou de disco) são responsáveis por concentrar a corrente de amido no *underflow* e de glúten no *overflow*. Para garantir a especificação de cada uma das correntes, eram conduzidas rotinas de operação que consistiam na coleta de amostras do *underflow* e análise do seu spin – fator utilizado para determinar a quantidade de glúten dentro da corrente de *underflow* – Com o resultado do spin o operador alterava a posição de abertura da válvula borboleta, esta localizada na saída do *underflow*, controlando a densidade da corrente (INGREDION, 2022).

A especificação de cada uma das correntes da Separação Primária é importante, pois são elas que ajudam a determinar o rendimento do Amido e o rendimento do Glúten. Os *Yields* (ou rendimentos) são calculados para indicar qual fração do milho adquirido é transformada em um produto. Os rendimentos dos coprodutos, que é o caso do Glúten, geralmente são medidos diretamente, enquanto o rendimento do amido é calculado a partir da venda de muitos produtos diferentes. Principalmente porque, os produtos à base de amido têm diferentes teores de umidade (INGREDION, 2022).

Dito isso, a fim de reduzir o tempo de resposta, manter as variáveis de saída da Separação Primária (*underflow* e *overflow*) estáveis e aumentar o *Yield* de Glúten - fatores que antes eram determinados e controlados manualmente pelos operadores - buscou-se inserir um sistema de medição de densidade, este composto por caixa de desaeração, densímetro e válvula de controle. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar o sistema de controle de densidade automático mais adequado para o processo de moagem úmida da fábrica de Mogi-Guaçu, considerando diferentes tecnologias de densímetros e válvulas de controle.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Moagem Úmida

O milho pode ser utilizado para uma extensa gama de aplicações. Dito isso, sendo o milho um cereal bastante versátil, até julho de 2022 o volume destinado à alimentação humana representou menos de 10% do milho produzido nacionalmente, sendo outros 36,8% destinado a produção de subprodutos por grandes indústrias, de múltiplas áreas, tais como: alimentícia, de bebidas, de papel, química, farmacêutica, de combustível e até mesmo, de mineração (ABIMILHO, 2022).

Também em 2022, segundo a Associação Brasileira das Indústrias do Milho (Abimilho), o consumo girava em torno de 2,5 milhões de toneladas na indústria de moagem úmida; 4,0 milhões de toneladas na indústria de moagem a seco; e 1,6 milhão de toneladas para o consumo *in natura*. A Tabela 1 abaixo mostra os valores em 1.000 toneladas do consumo de milho no Brasil, atualizado em julho de 2022. (ABIMILHO, 2022).

Tabela 1: Consumo de milho humano e industrial do Brasil em 2022.

Moagem a Seco	4.000
Moagem a Úmido	2.500
Etanol	7.840
Consumo Humano	1.625
Consumo “In natura”	1.709
Consumo Total	17.674

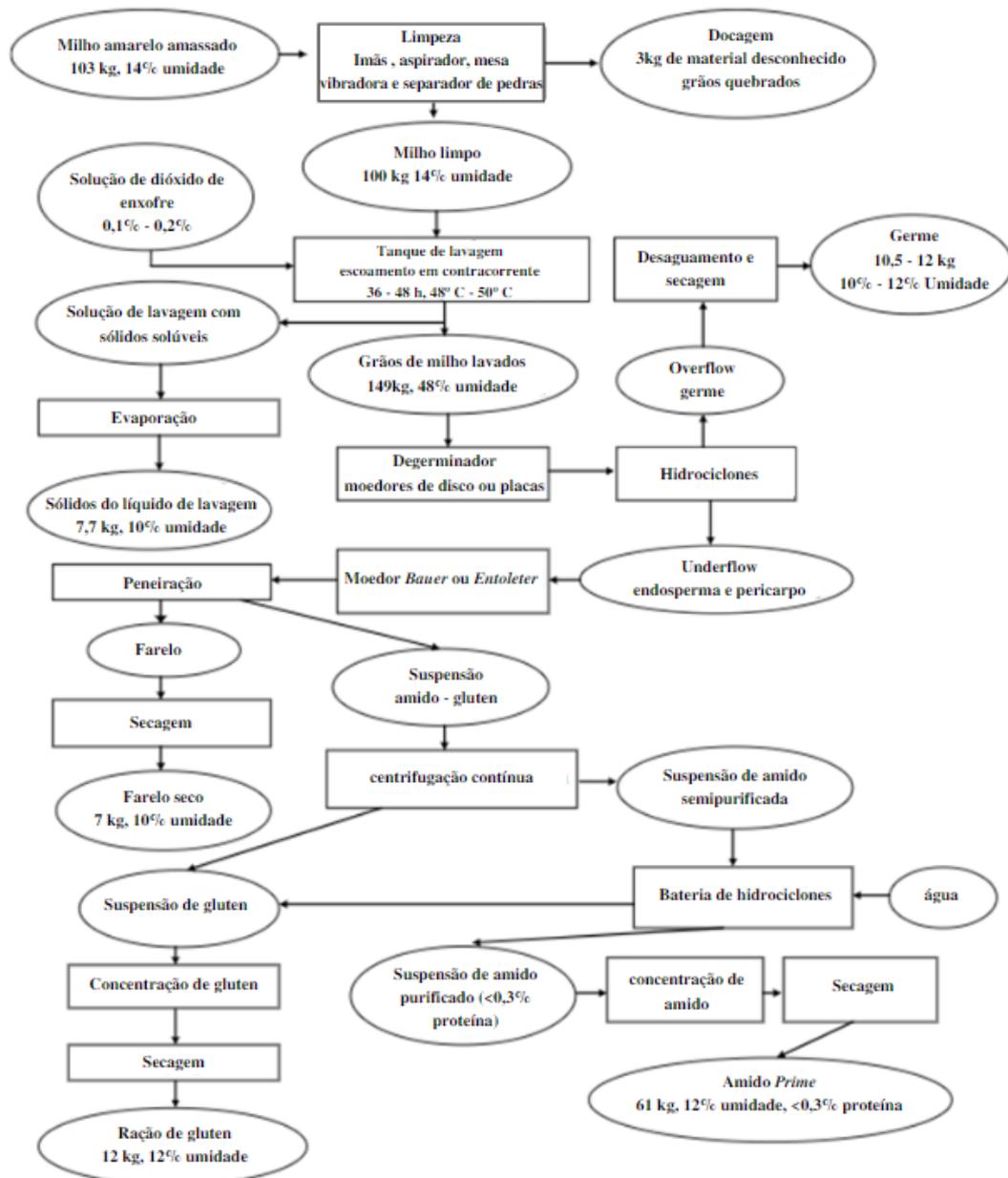
Fonte: Adaptação Abimilho, 2022

Historicamente, o etanol de milho tem sido produzido através da moagem a seco e a úmido. No entanto, a maior parte da produção de etanol dos EUA, por exemplo, é realizada através do processo de moagem a seco. No processo tradicional de moagem a seco, o grão de milho é moído e misturado com água, essa mistura é cozida para

dissolver o amido. Posteriormente, o mosto é resfriado e misturado com enzimas, a fim de converter os polímeros de açúcar em glicose antes de fermentar em etanol. Os componentes do grão não fermentado são vendidos como coprodutos (CINELLI, B. 2012)

A moagem úmida envolve a maceração do milho com SO_2 por até 48 horas. A maceração auxilia na separação das componentes do grão de milho, uma vez que o SO_2 absorvido pelo grão de milho rompe as ligações químicas dos componentes de forma que a separação possa se processar adequadamente. Após macerados, os grãos de milho são submetidos à moagem, onde ocorre a liberação do germe. Efetuada a desgerminação, os componentes passam por diversas operações físicas para separar a fibra, o amido e o glúten. Os equipamentos de separação são baseados nas propriedades físicas dos constituintes, principalmente nas diferenças entre tamanho e densidade (INGREDION, 2022). Apresenta-se através da Figura 1 um fluxograma simplificado do processo de moagem úmida utilizando dióxido de enxofre para a produção de amido e glúten em uma refinaria de milho.

Figura 2: Fluxograma do processo de moagem úmida.



Fonte: Adaptação FERREIRA, R. et al. 2014.

A moagem úmida de milho é um processo destinado à recuperação e purificação do amido e de diversos coprodutos (RAMIREZ, E. et al. 2008). A indústria de moagem úmida de milho tem, ao longo dos anos, gasto recursos consideráveis para melhorar a eficiência de seus processos, concentrando-se no controle do processo e, portanto, investindo em equipamentos e instrumentos mais eficientes. Contudo, o processo ainda

não atingiu o nível de eficiência de muitas outras indústrias de processamento de grãos, isto devido à variabilidade na qualidade da moagem (SINGH, N. et al. 1996).

2.2. Separação Primária do Amido e Glúten

Dentre as etapas da moagem úmida, a da Separação Primária tem como objetivo promover a separação das moléculas de amido e glúten. O glúten de milho é um subproduto obtido, no qual fica concentrada a principal parte proteica. Desta forma, este último é também designado de proteína do milho. Aqui é válido ressaltar que, dentre as propriedades funcionais das proteínas estão: o espessamento; a formação de espuma; a emulsificação e a geleificação (GARCIA, V. 2020).

O glúten é separado do amido por diferenças de densidade em uma centrífuga discos. Antes da separação, o amido é desmineralizado para remover quaisquer partículas estranhas, como areia, ferrugem ou incrustações de tubos (RAMIREZ, E. et al. 2008). Recomenda-se que todas as centrífugas de separação possuam em sua alimentação um filtro rotativo para a retirada destes materiais que podem vir a entupir seus bicos (INGREDION, 2022).

Inicialmente, a corrente de alimentação das centrífugas separadoras é resfriada. Caso a temperatura esteja acima do valor recomendado, a separação é prejudicada, isso porque, o aumento de temperatura eleva a miscibilidade entre o glúten e o amido assim parte do amido deixará a concentradora pelo *overflow* juntamente com glúten, desequilibrando os *Yields* estipulados (INGREDION, 2022).

A alimentação, é realizada na porção superior central do equipamento e a corrente é forçada para baixo em direção aos discos separadores. Nos espaços dos discos se processa a separação do amido e do glúten, onde o glúten menos denso ($1,1 \text{ g/cm}^3$) é separado do amido ($1,6 \text{ g/cm}^3$) (RAMIREZ, E. et al. 2008). A corrente de *underflow* de amido contendo certa quantidade de glúten é descarregada por meio dos bicos da separadora, sendo direcionada para as caixas de espuma. A corrente de *overflow* de glúten sai da separadora pela parte superior. Para a retirada do excesso de glúten da corrente de amido que deixa as centrífugas separadoras, utilizam-se as baterias de

Dorrcclone para a lavagem do amido (INGREDION, 2022). Esta última etapa pode ser verificada também na Figura 1.

Portanto, o controle da qualidade do *overflow* das separadoras é influenciado diretamente pelo controle da densidade. Para uma boa qualidade do *overflow*, normalmente se controla a concentração do *underflow* (INGREDION, 2022), uma vez que este fornece uma leitura mais precisa pela maior quantidade de massa por volume.

Variações na concentração e vazão da corrente de alimentação afetam a quantidade de sólidos enviada para a centrífuga separadora que, por sua vez, interfere na quantidade de sólidos na descarga desta. Altas concentrações na corrente de alimentação acarretam maior quantidade de amido saindo pela corrente de glúten, resultando em um glúten de baixa qualidade, ou seja, com baixa porcentagem de proteína (INGREDION, 2022).

O glúten é vendido, geralmente, para alimentação animal como farinha de glúten de milho. A farinha de glúten de milho final tem um teor de proteína de aproximadamente 60% em peso seco e contém xantofilas que lhe conferem uma cor amarela (RAMIREZ, E. et al. 2008).

2.3. Yield de Glúten

O processo convencional de moagem úmida inclui muitas etapas para a recuperação e purificação do amido e de todos os coprodutos (germe, farinha de glúten e ração de glúten de milho).

De acordo com Ramirez et. al. (2008), todas as plantas de moagem úmida nos EUA ou em todo o mundo são bastante semelhantes em instalações de maceração e moagem. Dependendo do produto final da refinaria de milho em questão, podendo este ser amido modificado, glicose, xarope de milho, etanol ou outros produtos de fermentação, existem diferenças após a moagem nas operações unitárias entre as plantas. Dito isso, o modelo de custo para uma instalação de moagem elaborado por Ramirez et. al. (2008), foi projetado apenas para instalações de maceração e moagem, até recuperação de amido, conforme a Figura 1. Os rendimentos dos produtos gerados a partir deste modelo são mostrados na Tabela 2. Os rendimentos dos produtos estão de

acordo com as referências da Ingredion (2022), constatado através de comunicação pessoal.

Tabela 2: Rendimentos dos produtos de moagem úmida de milho derivados do modelo de Ramirez (2008).

Produto	Rendimento (base seca %)
Germe	7,7
Casca (água pesada e fibras)	19,4
Glúten (proteína)	6,2
Amido	66,7

Fonte: Adaptação RAMIREZ, E. et. al. (2008).

Agora, apresenta-se a partir da Figura 2 um comparativo entre os dados de rendimentos industriais e os dados de rendimentos em escala laboratorial para a moagem a úmido. Dentre os fatores que são mais determinantes para estabelecer os rendimentos, estão o tempo, a temperatura e o teor de SO₂ na etapa de maceração, anterior a moagem. Segundo o estudo de SINGH et al. verificou-se a influência do tempo de maceração, mantendo a temperatura e o teor de SO₂ constante. Manipulando apenas esta variável foi possível aferir o seu impacto nos rendimentos dos componentes da moagem.

Tabela 3: Comparação de dados de rendimento industrial com dados de estudo em escala de laboratório e de planta piloto.

	Frações da Moagem (%)							
	Solúveis ^a	Germe	Fibra	Amido	Proteína ^b	Fração Recuperada ^c	Proteína no Amido	Tempo de banho de SO ₂ (h)
Rendimento Industrial								
Knight (1969)	6,8	8,0	9,7	68,5	6,0	99,0	0,3	36-50
May (1987)	7,0	7,9	13,0	66,0	5,7	99,6	0,3-0,35	22-50
Blanchard (1992)	6,5	7,5	12,0	68,0	5,6	99,6	0,3-0,35	30-50
Rendimento em laboratório: Batelada Estática								
Steinke e Johnson (1991)	7,2	6,6	19,2	58,4	8,9	100,3	0,6	48,0
Eckhoff et al (1996)	6,8	5,2	10,2	67,3	8,8	98,3	na	24,0

^a Soma da água pesada, filtrado do gluten eoutras frações de águas do processo
^b Soma da fração de proteína e água do processo contendo proteínas quando aplicável
^c Soma das frações de moagem

Fonte: Adaptação SINGH et al. 1996.

Para atender o *rate* de moagem de 3.000TPD, ocorrem desvios nos fatores da etapa de maceração, representando variações nas correntes de processo e, consequentemente, afetando a separação do amido e glúten. Por isso, utilizar instrumentações que tenham um bom desempenho e que se ajustem as diferentes condições do processo é importante para atingir os rendimentos estabelecidos pela fábrica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

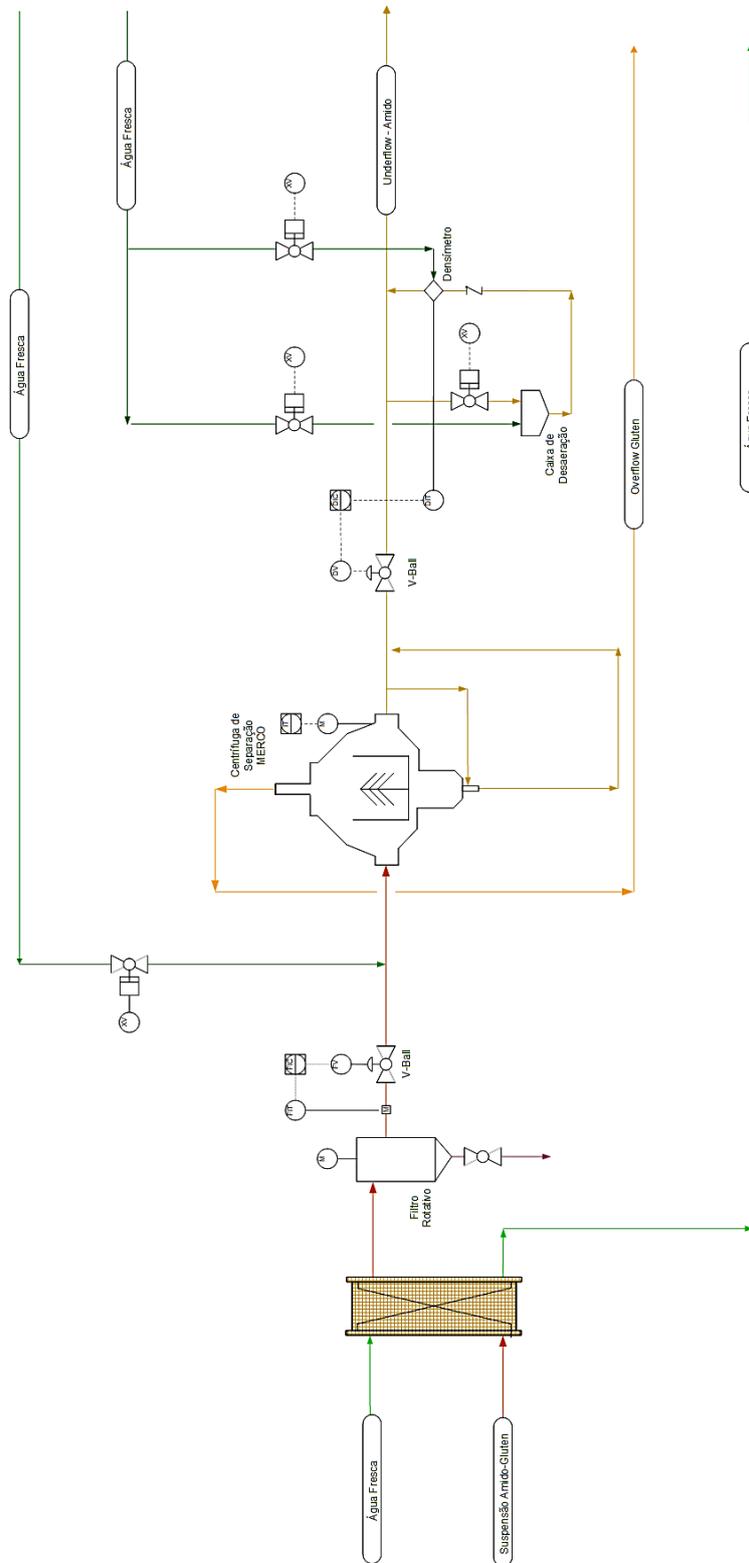
Como a Separação Primária está atrelada à diferença de densidade do amido e do glúten, para que a separação seja efetiva, buscou-se introduzir um medidor de densidade que contribuísse para o controle do processo e para a qualidade do produto processado. Anteriormente, uma amostra da suspensão de amido era retirada da linha de processamento e a medição da densidade era realizada manualmente com o auxílio de um densímetro de vidro. Essa medição era utilizada para a tomada de decisões de rotina. Caso fosse constatada dificuldades de realizar a medição e comunicá-la a quem manifesta as ações dentro da sala de operação, tornava-se, portanto, um fator limitante para o procedimento.

Dessa forma, assegurando a funcionalidade do instrumento, a resposta às variações da moagem úmida seria dada de forma automática e com maior rapidez, sendo a separação entre o amido e glúten mais bem controlada, podendo aumentar o Yield de Glúten, visto que este componente (ou proteína) não se perderia na corrente de amido.

A fim de escolher o instrumento mais apropriado e garantir a sua funcionalidade dentro do processo, a princípio foram selecionados dois instrumentos com tecnologias distintas. O primeiro funciona a partir do Efeito Coriolis, chamado de densímetro mássico. Já o segundo, funciona através da diferença de pressão, conhecido como densímetro de diafragmas. Ambos os instrumentos (transmissores de densidade) foram colocados em análise de performance, seguindo o mesmo *layout* de instalação.

Para oferecer condições de funcionalidade aos instrumentos, atentando-se aos fatores indicados pelos fornecedores, como: aeração do fluido (existência de bolhas de ar) e acúmulo de material nas linhas e no instrumento, determinou-se um sistema de medição de densidade, onde foram inseridos junto com os densímetros, caixas desaeradoras e um sistema de limpeza. Apresenta-se o sistema de Separação Primária e controle de densidade através de um fluxograma simplificado na Figura 3. Foram instalados dois transmissores de densidade no total, um de cada tecnologia, em centrífugas de mesmo modelo e tamanho.

Figura 3: Fluxograma simplificado do sistema de medição de densidade automática.



Fonte: Acervo pessoal.

Agora, tratando-se da coleta e aferição da densidade em bancada, além de considerar a existência de bolhas na amostra do *underflow*, a temperatura e o tempo de espera para a leitura do resultado também causavam interferência significativa na coleta de dados. Portanto, viu-se necessário padronizar a coleta de amostras – evitando a aeração da amostra - e a leitura da densidade – realizando a leitura de forma instantânea. Também foi estabelecida uma padronização para a limpeza.

Os dados coletados para a densidade estão expressos em °Baumé, uma escala hidrométrica criada pelo farmacêutico francês Antoine Baumé em 1768 para medição de densidade de líquidos. No caso deste estudo, tratando-se de uma suspensão de amido, ou seja, de uma solução mais densas que a água (densidade maior que 1), tem-se a relação descrita através da Equação 1 abaixo (LOPES, C. 2012).

$$^{\circ}Be = 145 - \left(\frac{145}{\rho}\right) \quad (1)$$

Sendo ρ a massa específica dada por g/cm³.

Para não compartilhar e/ou divulgar nenhum dado confidencial da empresa que possibilitou este estudo, todos os valores correspondentes à densidade e vazão foram multiplicados por um fator α . Sendo α um número pertencente ao conjunto dos números racionais.

3.1. Materiais

- Aerômetro Baumé;
- Proveta;
- Béquer;
- Ficha de acompanhamento;
- EPI's (luvas, óculos, capacete, protetor auricular e sapato de segurança).

3.2. Equipamento

3.2.1. Centrífuga de Separação;

A tecnologia de separação envolvendo uma separadora, também conhecida como centrífuga de discos, é utilizada para centrifugação de diferentes fases de sólidos e líquidos, que são separadas umas das outras com base na diferença de densidade. A rápida rotação da centrífuga separadora substitui o efeito da gravidade por uma força centrífuga controlável de até 10.000 vezes maior (ALFA LAVAL, 2022).

Para aumentar a eficiência da separação os discos são empilhados dentro do equipamento para fornecer mais área de superfície de separação. As chamadas de pilhas de discos, aceleram drasticamente a precipitação dos sólidos do líquido. Dito isso, a separação usando uma centrífuga separadora não só ocorre significativamente mais rápido, mas resulta em maior qualidade e maior rendimento (ALFA LAVAL, 2022).

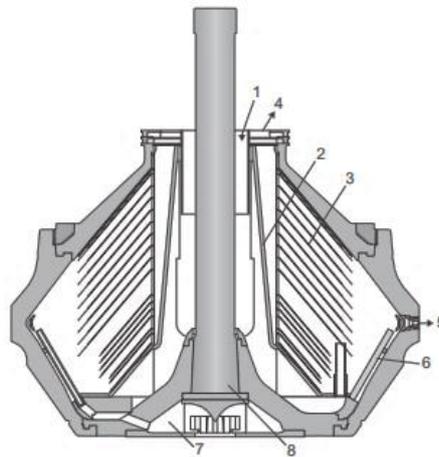
A Alfa Laval é a principal fornecedora de equipamentos para a indústria de amido em todo o mundo. Um pouco mais da metade do amido produzido por ano ao redor do mundo é processado através das separadoras Merco da Alfa Laval. Esse equipamento foi desenvolvido, em especial, para a produção de amido (ALFA LAVAL, 2022).

De acordo com a Alfa Laval (2022), “a Merco é uma centrífuga com bocal projetada para descarga contínua de sólidos [...]. A centrífuga é equipada com um motor, um filtro autolimpante para os sensores de alimentação, velocidade e vibração, sensores de temperatura do óleo para os mancais do fuso e bobina do motor, uma unidade de energia hidráulica para a talha de elevação, um conjunto de ferramentas especiais e um conjunto padrão de peças sobressalentes”.

Na Figura 4 é apresentado um desenho típico da cuba de uma centrífuga separadora de bico com sistema de recirculação de sólidos e as partes que a constituem de forma numerada, esses serão usados para descrever seu funcionamento; a alimentação, consistindo em líquidos e sólidos, é conduzida para a cuba de centrifugação rotativa a partir de uma entrada estacionária no topo (1). A alimentação é acelerada através de um distribuidor (2), antes de entrar nos discos (3). O processo de separação ocorre entre os discos, com a fase líquida movendo-se pelos discos em direção a parte central do equipamento. Quando o líquido atinge o centro, é

descarregado através de um anel de potência (4). Os sólidos, mais pesados, acumulam-se na periferia e são continuamente descarregados através dos bicos (5). Parte dos sólidos concentrados podem ser reciclados para a área periférica da cuba através dos tubos de recirculação (6), via câmara de recirculação (7). A água de lavagem usada para liberar solúveis e outras impurezas dos sólidos também podem ser reciclados da mesma maneira. A cuba é montada em um eixo vertical (8) que é acionada pelas correias do motor (ALFA LAVAL, 2022).

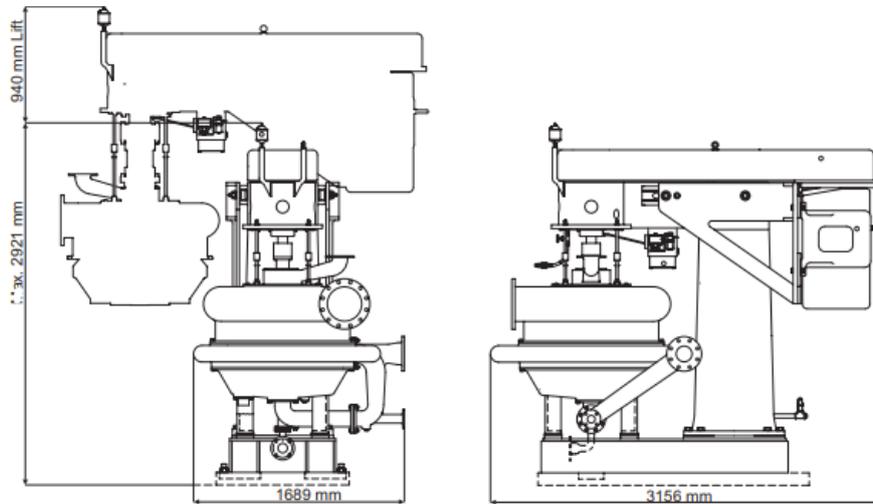
Figura 4: Desenho típico da cuba de uma centrífuga separadora de bico com sistema de recirculação de sólidos.



Fonte: ALFA LAVAL, 2022.

As separadoras Merco da Alfa Laval para a indústria de amido estão disponíveis em tamanhos e configurações diferentes, cada um dos projetos é adaptado para lidar com as condições de separação amplamente variadas de cada indústria. Os modelos da Merco são projetados para diversas aplicações na área de moagem úmida de milho e seguem o desenho mecânico descrito abaixo pela Figura 5 (ALFA LAVAL, 2022).

Figura 5: Desenho mecânico com respectivas dimensões do modelo Merco CH-38 GOF com motor.



Fonte: ALFA LAVAL, 2022.

No entanto, ressalta-se que as dimensões e pequenas adaptações são modeladas para atender as especificidades de cada cliente. Os detalhes do modelo Merco CH-38 GOF com motor descrito na Figura 5 não correspondem à centrífuga Merco utilizada pela Ingredion e que foi utilizada para a realização desse estudo.

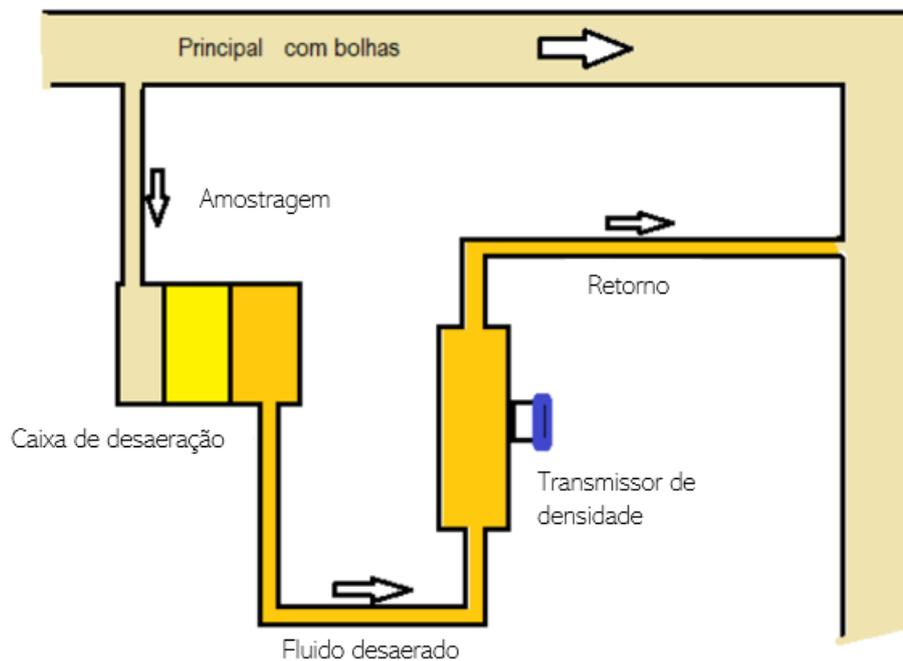
3.2.2. Caixa de Desaeração;

Com o objetivo de controlar a quantidade de ar na amostra encaminhada ao densímetro, uma vez que a presença de ar influencia na incerteza das medições de densidade, instalou-se uma caixa de desaeração de forma anterior ao instrumento, conforme indicado pela Figura 6.

Este equipamento consiste em uma caixa quadrada dividida em três repartições. Parte da corrente do *underflow* é direcionada para a primeira divisão do equipamento. À medida que o fluido escorre pelas paredes e preenche o primeiro compartimento, as bolhas de ar - menos densas que o fluido - sobem e transbordam para a saída. Parte do líquido com quantidade de ar inferior passa para o próximo compartimento através de uma seção e o procedimento se repete até que o fluido, com o mínimo de bolhas de ar, seja direcionado para o transmissor de densidade de diafragma.

O processo de desaeração descrito acima foi ilustrado através da mudança de coloração do fluido indicado também na Figura 6. O desenho mecânico e demais informações sobre a caixa de desaeração não podem ser compartilhadas, visto que a tecnologia que compõe este equipamento foi desenvolvida pela Ingredion.

Figura 6: Esquema simplificado da disposição dos equipamentos e fluxo do fluido no sistema de medição de densidade.



Fonte: Acervo pessoal.

3.2.3. Densímetro Mássico

O densímetro mássico é um equipamento que permite a medida de diversas variáveis operacionais tendo como princípio de funcionamento o Efeito Coriolis, o qual determina que uma massa (m) sofre ação de uma força inercial denominada Pseudoforça de Coriolis (f_c) ao deslocar-se com velocidade linear relativa (V_r) a um sistema de referência não inercial que, por sua vez, está deslocando-se a uma velocidade angular (ω) em um movimento de rotação. O efeito dessa força pode ser visto pela Equação 2. (ALFA EQUIPAMENTOS, 2022)

$$f_c = 2m(\omega \times V_r) \quad (2)$$

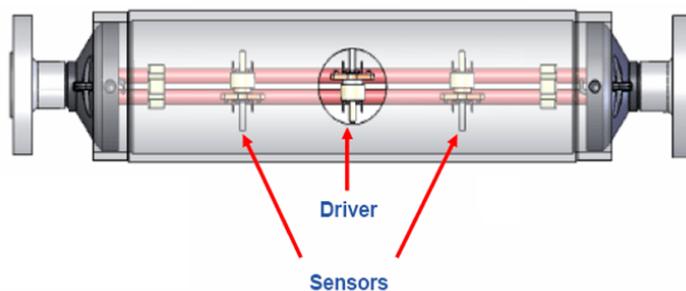
Esse efeito é um dos princípios que explicam o porquê de fluidos atravessando tubos ocasionarem a oscilação desses (ALFA EQUIPAMENTOS, 2022).

Os densímetros mássicos são compostos por tubos, unidades de oscilação (drivers), sensores e transdutores. O medidor pode possuir apenas um tubo ou um par, sendo o último caso o modelo mais preciso, é nele que os fluidos escorrem. Os tubos são retos ou em formato de U, variando conforme a aplicação para qual o medidor será utilizado (ALFA EQUIPAMENTOS, 2022).

As unidades de oscilação são responsáveis por fazer o tubo vibrar em uma frequência constante, essas eram constituídas inicialmente de agitadores mecânicos, porém nos equipamentos modernos são utilizados bobinas e ímãs. Os sensores estão no início e fim e fazem a aferição da oscilação na entrada e saída do sistema (ALFA EQUIPAMENTOS, 2022).

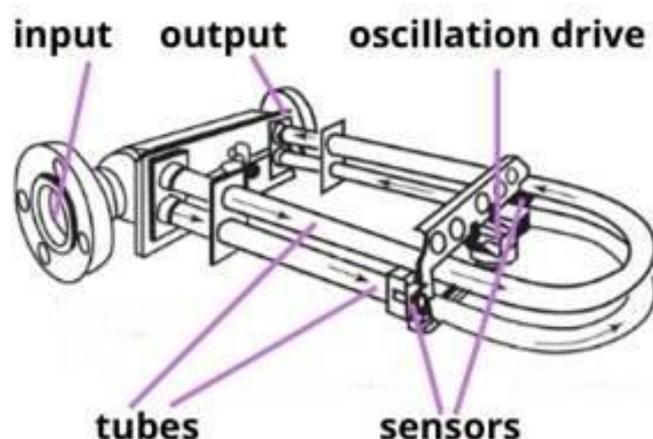
O Transdutor coleta os sinais dos sensores e os transforma em dados digitais ou analógicos possibilitando a leitura e acompanhamento do resultado e permitindo utilizar o medidor em sistemas de controle (ALFA EQUIPAMENTOS, 2022). As Figuras 7.1 e 7.2 mostram exemplos de densímetros mássicos.

Figura 7.1: Densímetro mássico e seus componentes – vista frontal.



Fonte: CONAUT, 2022.

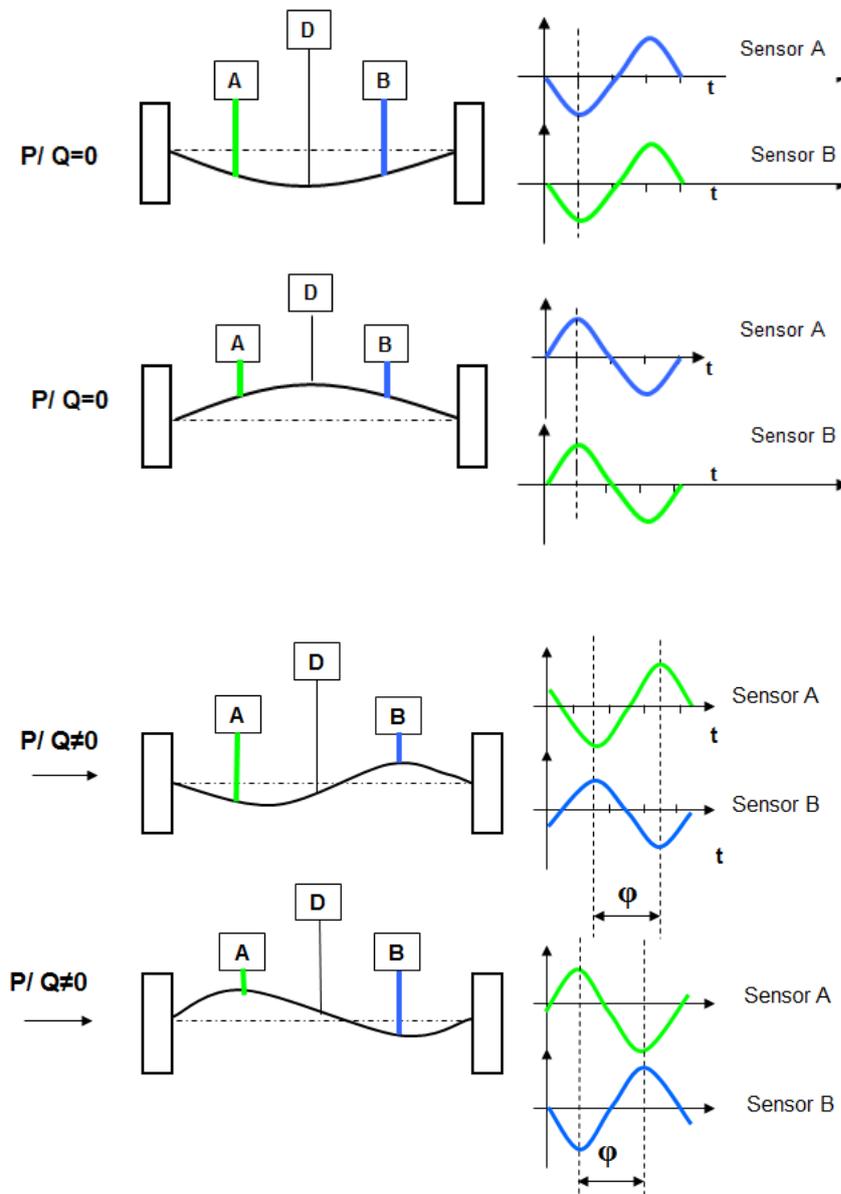
Figura 7.2: Densímetro mássico e seus componentes – vista lateral.



Fonte: ALFA EQUIPAMENTOS, 2022.

Utilizando como exemplo um tubo reto com A sendo o sensor de entrada e B o sensor de saída teríamos que enquanto a vazão mássica for nula, ou seja, enquanto o fluido do processo não estiver escoando pelo tubo não ocorrerá diferença na frequência de oscilação da entrada para a saída, porém assim que esse começar a escoar o fluido gera uma força que altera a oscilação do tubo na entrada e na saída (explicada pelo efeito Coriolis) fazendo com que os sensores A e B oscilem em diferentes frequências e permitindo ao densímetro determinar a vazão mássica (Q). O processo descrito pode ser visualizado na Figura 8 (CONAUT, 2022).

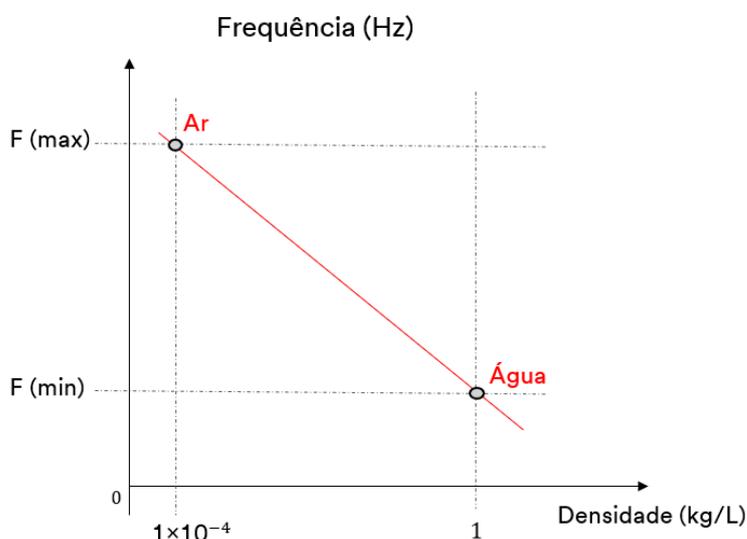
Figura 8: Comparação entre oscilação detectada pelos sensores sem vazão mássica e com vazão mássica nos tubos.



Fonte: CONAUT, 2022.

A frequência de ressonância do conjunto, por sua vez, está associada a massa total do conjunto com massas menores permitindo maiores frequências de vibração, essa alteração na frequência em função da massa é o que permite determinar a densidade do fluido escoando uma vez que o volume do medidor e a massa de seus materiais é constante (CONAUT, 2022). A Figura 9 traz um exemplo dessa relação.

Figura 9: Curva da frequência de oscilação do conjunto em função da densidade do fluido escoando.



Fonte: Adaptação CONAUT, 2022.

Os densímetros mássicos também podem ser equipados com sensores de temperatura em seus tubos permitindo em conjunto com os outros fatores medidos, vazão e densidade, determinar informações de concentrações (CONAUT, 2022).

3.2.4. Densímetro de Diafragma

O transmissor de densidade de diafragma é um equipamento que permite a medida contínua da densidade de operação de um líquido podendo também ser utilizado para medição de concentração em determinados sistemas, eles são utilizados amplamente nas indústrias podendo ser encontrados em aplicações de açúcar e álcool, cervejarias, laticínios, mineração, papel e celulose, petroquímicas, entre outras (INSTRUMATIC, 2022).

O transmissor de densidade de diafragma é composto por tanque, diafragmas, capilares e sensores. O tanque é um cilindro esférico que reveste o diafragma e capilares e no qual o líquido analisado será obtido (INSTRUMATIC, 2022).

Os diafragmas são superfícies redondas, geralmente um par, conectadas aos capilares e separadas por uma distância fixa (h) as pressões obtidas pelos sensores

fazem referência a posição dos capilares. Os capilares fazem a comunicação entre os diafragmas e os sensores (INSTRUMATIC, 2022).

Os sensores são de dois tipos o primeiro é um sensor de pressão diferencial do tipo capacitivo encontrando a diferença de pressão entre os diafragmas (Δp), o segundo é um sensor de temperatura que se encontra no ponto médio entre os diafragmas para poder ajustar os valores obtidos em função da temperatura do processo. Os dados obtidos pelos sensores podem ser lidos manualmente ou conectados a um sistema de controle para acompanhamento de forma contínua (INSTRUMATIC, 2022). Exemplos de transmissores de densidade com e sem o tanque estão apresentados na Figura 10.

Figura 10: Densímetros de diafragma.

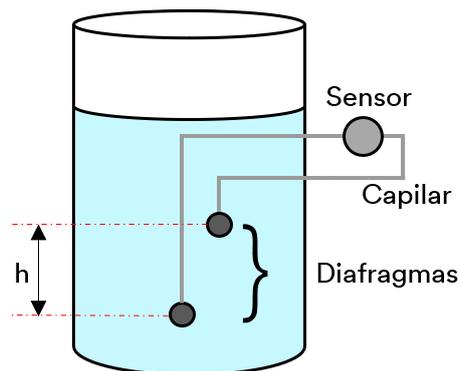


Fonte: Adaptação METROVAL, 2005.

O funcionamento do medidor está relacionado com o princípio da pressão hidrostática a qual indica que a variação de pressão entre dois pontos de um mesmo fluido é dada pelo produto de sua densidade, a gravidade no local e a diferença de altura entre os pontos em questão. Essa equação e sua forma rearranjada para isolar a densidade estão apresentadas como a Equação 3. Já a Figura 11 apresenta uma representação da parte interna de um transmissor de densidade de diafragma (INSTRUMATIC, 2022).

$$\Delta p = \rho gh, \quad \rho = \frac{\Delta p}{gh} \quad (3)$$

Figura 11: Parte interna de um transmissor de densidade de diafragma



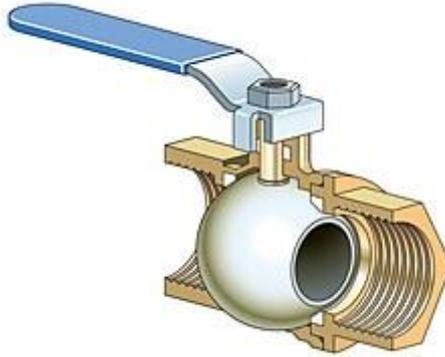
Fonte: Adaptação PROFIBUS, 2005.

Esse princípio de funcionamento com base na pressão hidrostática permite que as medições não sejam afetadas nem pelo nível de líquido no tanque, contanto que ambos os diafragmas estejam cobertos, nem pela vazão mássica do processo. A temperatura embora não apareça como parte da equação está relacionada com a calibração do transmissor e é considerada pelo software que executa o cálculo da densidade ou concentração desejada (INSTRUMATIC, 2022).

3.2.5. Válvula V-Ball.

As Válvulas de esfera em V ou válvulas V-Ball são um tipo específico de válvulas esféricas. As válvulas esféricas são aquelas cujo obturador é uma esfera oca, comumente elas fazem parte da família $\frac{1}{4}$ de volta possuindo apenas as posições abertas e fechadas e tendo como principal aplicação posições de segurança pela forte vedação que geram quando fechadas. A Figura 12 apresenta uma válvula esférica genérica. (MTI BRASIL, 2022)

Figura 12: Válvula esfera



Fonte: MTI BRASIL, 2022.

No caso da válvula V-Ball seu obturador apresenta um furo em V que pode apresentar ângulos de corte variando de 15° a 90° permitindo escolher a faixa de fluxo dessa. Assim as válvulas V-Balls, em contrapartida com válvulas esféricas comuns, podem ser utilizadas em sistemas de controles (NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022). A Figura 13 apresenta uma válvula de esfera em V aberta.

Figura 13: Válvula V-Ball



Fonte: NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022.

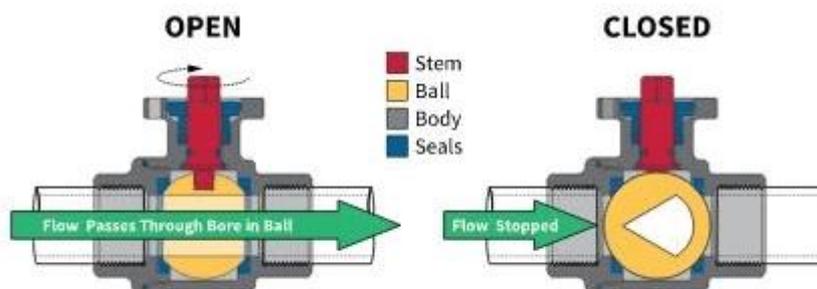
Assim como a maioria das válvulas podemos separar as principais partes da válvula V-Ball em corpo, selos, obturador, haste e manopla ou acionador (NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022).

O corpo é o material que revolve o obturador, os selos e a haste ele que é conectado as tubulações para que o fluido desejado escoe. Os selos são materiais utilizados para impedir que o fluido passe entre os vãos do corpo e obturador e do corpo e haste evitando qualquer problema que possa ocorrer devido a infiltração do fluido em partes não planejadas. O obturador é a parte da válvula que faz o controle do fluxo de fluido e como já visto para a válvula V-Ball ele consiste em uma esfera oca com um corte em V. A haste faz a conexão entre a manopla e o obturador (NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022).

A manopla ou acionador é o dispositivo usado para abrir ou fechar a válvula, ao girar a manopla a haste transmite essa rotação para o obturador alterando sua posição; por padrão a manopla ficará paralela a tubulação quando a válvula estiver aberta e perpendicular quando estiver fechada. Na Figura 14 estão apresentados os componentes

de uma válvula em sua posição aberta e fechada (NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022).

Figura 14: Válvula V-Ball e seus componentes em posição fechada e aberta



Fonte: NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022.

Para poder atuar com altas vazões essas válvulas são fabricadas com materiais de alta resistência permitindo sustentar os impactos dos fluidos em alta velocidade sem sofrer danos. As válvulas esferas em V produzem poucas provocações no escoamento do fluido permitindo escoamentos quase lineares e vem apresentando melhores resultados no controle de fluxo em comparação com outras válvulas maiores e válvulas de esferas mais caras (NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS, 2022).

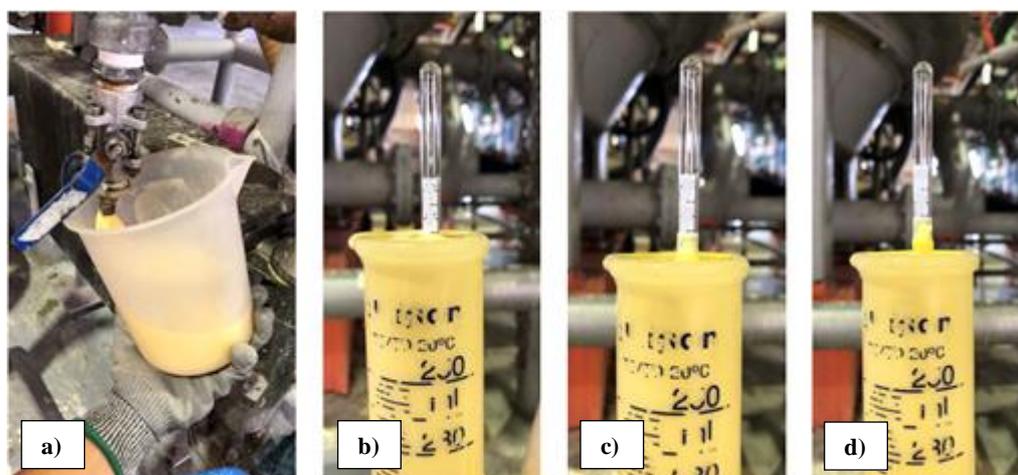
3.3. Procedimento Experimental

Coletaram-se amostras do *underflow* das centrífugas de separação primária através de um amostrador localizado após os instrumentos, respectivos a cada centrífuga, utilizando um coletor (béquer). Descartava-se a primeira coleta, a fim de homogeneizar o recipiente e coletar uma amostra sem acúmulo de decantado e de temperatura similar à de processo; buscava-se coletar uma amostra sem grande quantidade de bolhas de ar, inclinando o recipiente durante a atividade e deixando que a solução escorresse pelas suas paredes.

Utilizou-se um aerômetro para aferir o $^{\circ}\text{Bé}$ das amostras. Para isso, transferiam-se as amostras do recipiente para a proveta, em sequência, colocava-se o aerômetro

lentamente e aferia, de forma instantânea, a densidade das amostras, assegurando que a medição fosse feita na altura dos olhos. A Figura 15.a ilustra o procedimento de coleta das amostras e a Figura 15.b, 15.c e 15.d apresenta a interferência da temperatura sobre a aferição de densidade: instantânea; com 30 segundos de espera; e com 5 minutos de espera, respectivamente.

Figura 15: (a) Exemplo de coleta de amostra e aferição de densidade (b) instantânea, (c) com 30 segundos de espera e (d) com 5 minutos de espera.



Fonte: Acervo pessoal.

Em sequência, utilizava-se a ficha de acompanhamento para registrar os dados e as medições referentes à densidade. Além de documentar o $^{\circ}\text{Bé}$ aferido através da medição em campo eram também documentados os valores associados ao $^{\circ}\text{Bé}$ indicado na tela do instrumento e àquele referente ao $^{\circ}\text{Be}$ da moagem. Verificavam-se o valor associado à vazão de alimentação da centrífuga de separação primária e do próprio instrumento. Isso porque, através destas variáveis, seria possível observar qualquer alteração nas condições de processo.

Documentou-se, também, se houve limpeza no sistema de medição sinalizando se “Sim” ou “Não”. Para ilustrar a importância da rotina de limpeza do sistema, apresenta-se na Figura 16 o acúmulo de material nos diafragmas de um dos medidores.

Figura 16: Acúmulo de suspensão de amido e glúten nos diafragmas do medidor de densidade.



Fonte: Acervo pessoal

Todos os valores coletados eram documentados em uma planilha em Excel, a qual posteriormente veio a ser utilizada para o tratamento dos dados.

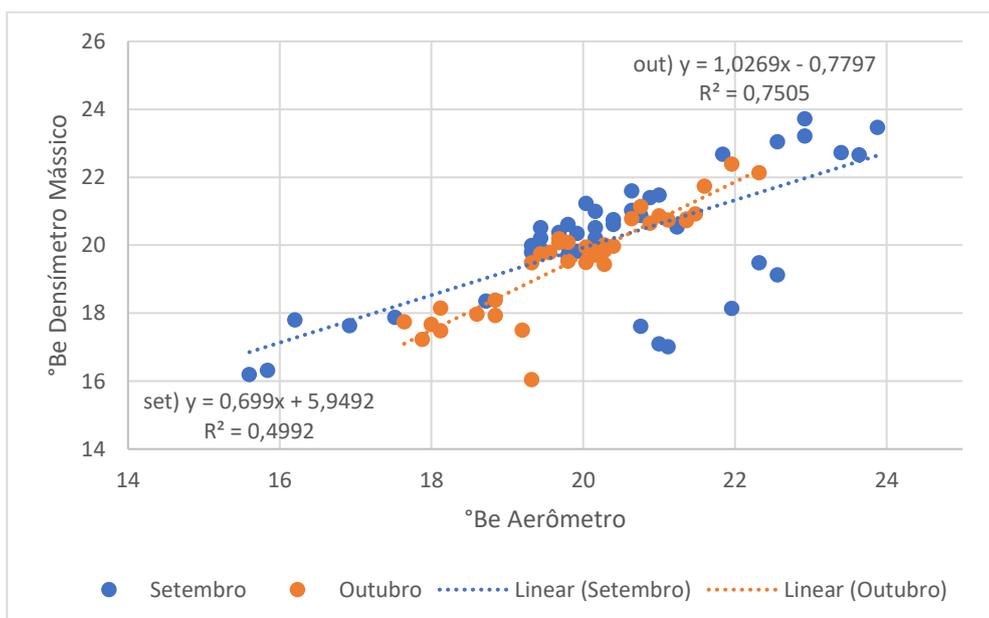
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O acompanhamento das duas tecnologias ocorreu de forma simultânea e se deu nos meses de setembro e outubro de 2021. A verificação dos pontos de densidade foi realizada a partir do visor dos instrumentos, de forma anterior à coleta das amostras do *underflow*.

4.1. Densímetro Mássico

A partir dos dados de densidade mostrada no visor do transmissor de densidade mássico (instrumento mássico); aferida em bancada (aerômetro) e referente ao tanque da primeira moagem, realizaram-se duas análises distintas. Para a primeira, buscou-se avaliar uma relação de linearidade entre o °Be indicado pelo instrumento e àquele aferido através do aerômetro. Com este objetivo, plotou-se o gráfico apresentado na Figura 17, com o °Be do aerômetro no eixo x e o °Be indicado pelo instrumento no eixo y.

Figura 17: Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro *versus* o °Be exibido densímetro mássico dos meses de setembro e outubro.

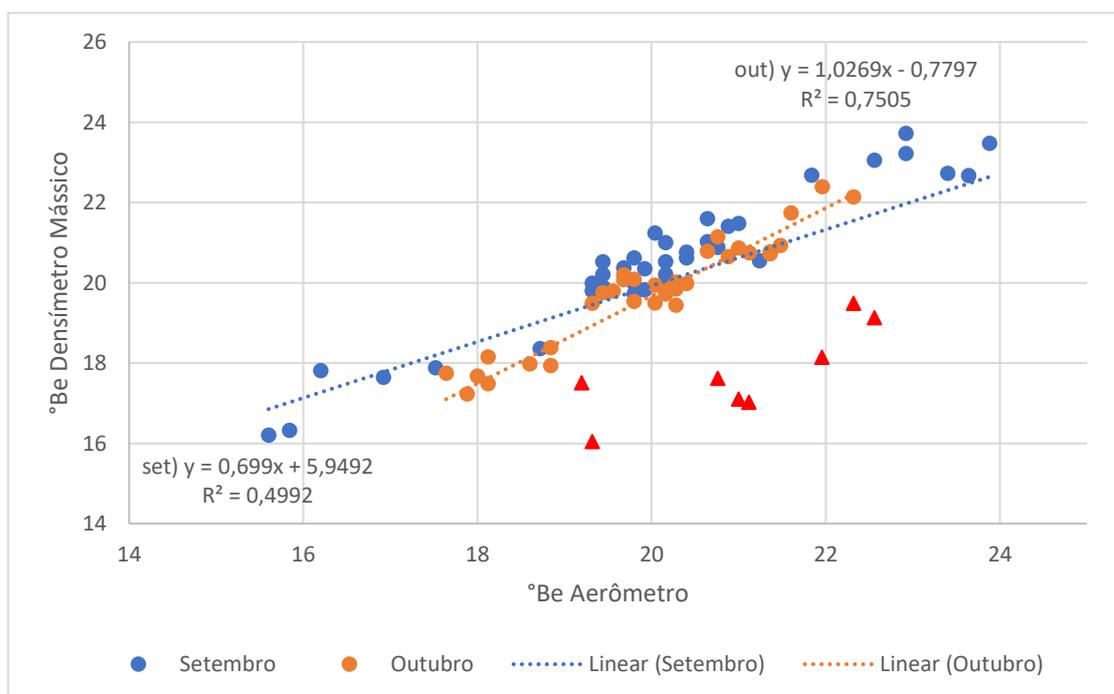


Fonte: Acervo pessoal.

Esperava-se que as curvas apresentadas na Figura 17 possuísem R^2 próximo a 1 e o coeficiente linear da equação fosse nulo, confirmando a concordância e relação de linearidade entre as duas medidas de densidade. No entanto, utilizando todos os dados coletados, verificou-se a partir da Figura 17 que as curvas não apresentam o comportamento linear esperado, com R^2 iguais a 0,4492 e 0,7505 para os meses de setembro e outubro, respectivamente.

Investigando os pontos utilizados com mais detalhe e examinando todas as informações preenchidas na ficha de acompanhamento, percebeu-se que os grandes desvios estavam atribuídos as medições que foram realizadas em turnos que não conduziram nenhuma limpeza no decorrer da operação. Esse fato se evidencia na análise da Figura 18, onde os pontos coletados nos turnos sem limpeza foram destacados como triângulos vermelhos.

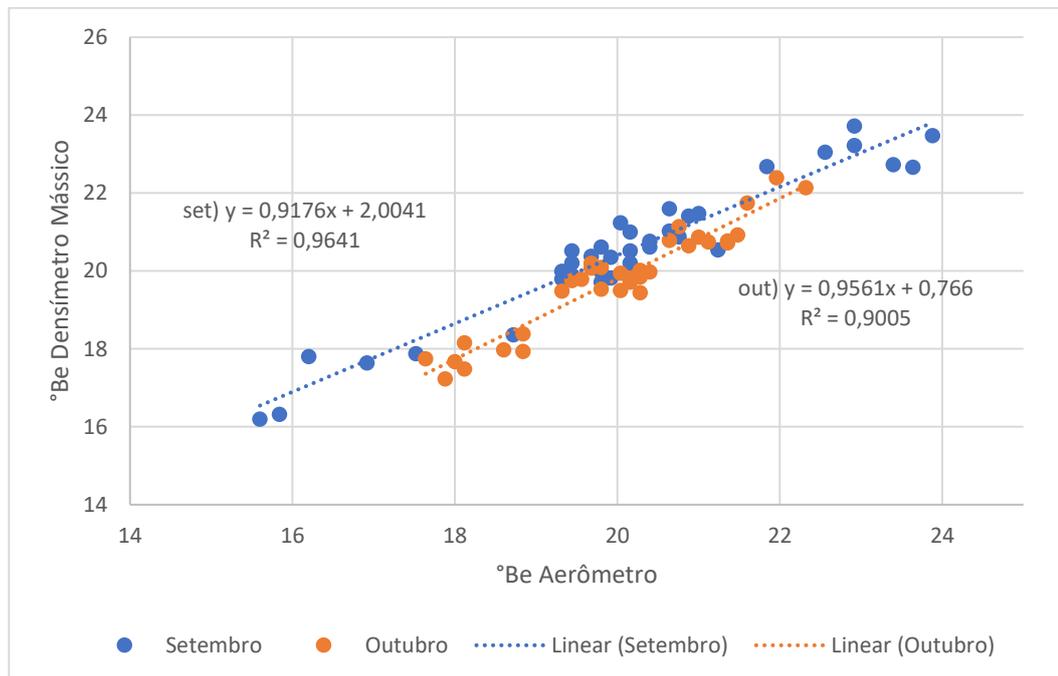
Figura 18: Curvas e fatores de correlação para o $^{\circ}\text{Be}$ aferido através do aerômetro *versus* o $^{\circ}\text{Be}$ exibido no densímetro mássico dos meses de setembro e outubro, destacando os dados atribuídos a falta de limpeza.



Fonte: Acervo pessoal.

Excluindo os valores atribuídos a falta de limpeza, ou seja, descartando os dados que apontavam “Não” no item “Limpeza” no começo dos turnos, buscou-se mais uma vez analisar a linearidade das curvas para os meses de setembro e outubro. Portanto, plotaram-se as curvas apresentadas na Figura 19.

Figura 19: Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro mássico dos meses de setembro e outubro, excluindo os dados atribuídos a falta de limpeza.



Fonte: Acervo pessoal.

Agora com R^2 iguais a 0,9641 e 0,9005 para os meses de setembro e outubro, respectivamente, nota-se um comportamento mais próximo da linearidade. E, portanto, assegura-se que as medições indicadas pelo transmissor de densidade mássico estão dentro da faixa de confiabilidade desejada para a operação.

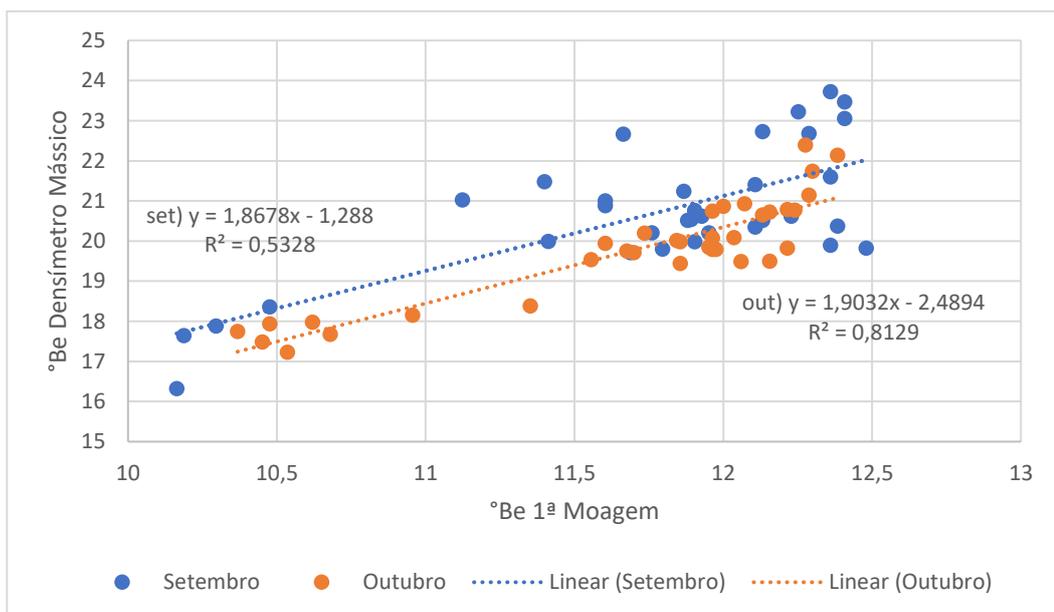
Anteriormente a este estudo, havia uma preocupação de que transmissores de densidade apenas operassem de forma satisfatória diante de um processo estável, uma vez que as variações nas condições de processo caracterizariam uma amostra com densidade menor e mais suscetível as interferências indicadas pelo fabricante. Ao

mesmo tempo, sabe-se que a moagem úmida de milho não segue esta característica. Portanto, entendeu-se como essencial analisar a performance dos transmissores de densidade diante das oscilações, principalmente no que se refere a baixa densidade no início do processo de moagem úmida, ou seja, na densidade registrada no tanque da primeira moagem, após a desgerminação do milho.

Desta maneira, para a segunda análise, procurou visualizar se o densímetro mássico iria acompanhar as variações nas condições de processo. Logo, se houvesse uma diminuição na densidade do tanque da primeira moagem, era previsto uma diminuição na densidade do *underflow* da Separação Primária. Isto porque, as condições de operação da centrífuga permanecem projetadas para uma certa faixa de vazão e concentração de sólidos na sua alimentação.

Para verificar este fato, plotou-se no eixo x o °Be referente a primeira moagem e no eixo y o °Be indicado pelo instrumento. Buscou-se analisar um comportamento crescente entre estas variáveis, ou seja, com R pertencente ao intervalo (0, 1]. Para isso, apresenta-se a Figura 20.

Figura 20: Curvas para o °Be da Moagem versus °Be do *underflow* da Separação Primária exibido pelo densímetro mássico dos meses de setembro e outubro.



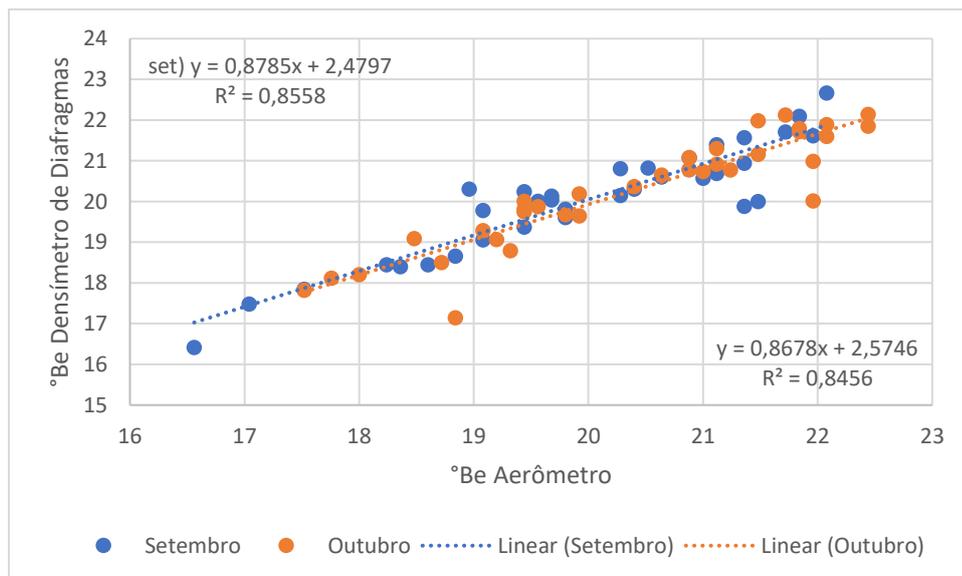
Fonte: Acervo pessoal

Diante da Figura 20, têm-se R^2 iguais a 0,5328 e 0,8129 para os meses de setembro e outubro, respectivamente. Desta maneira, confirma-se que a diminuição da concentração de sólidos na alimentação é notada pelo instrumento mássico, dado que R é positivo e maior que 0, o que pode ser verificado pelas curvas crescentes. Quanto a uma relação de linearidade ($R^2 \sim 1$), esta já não era esperada, visto que diversos fatores podem interferir na densidade da corrente de *underflow*, como por exemplo, a vazão de alimentação e a taxa de reciclo do *underflow* a partir dos bicos de retorno da Merco Alfa Laval.

4.2. Densímetro de Diafragmas

As mesmas análises propostas no item anterior, “4.1. Densímetro Mássico”, foram replicadas para o transmissor de densidade de diafragmas (densímetro de diafragmas). Para a análise da relação de linearidade entre o $^{\circ}\text{Be}$ indicado pelo instrumento e àquele aferido através do aerômetro, apresentam-se as Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21: Curvas e fatores de correlação para o $^{\circ}\text{Be}$ aferido através do aerômetro versus o $^{\circ}\text{Be}$ exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro.

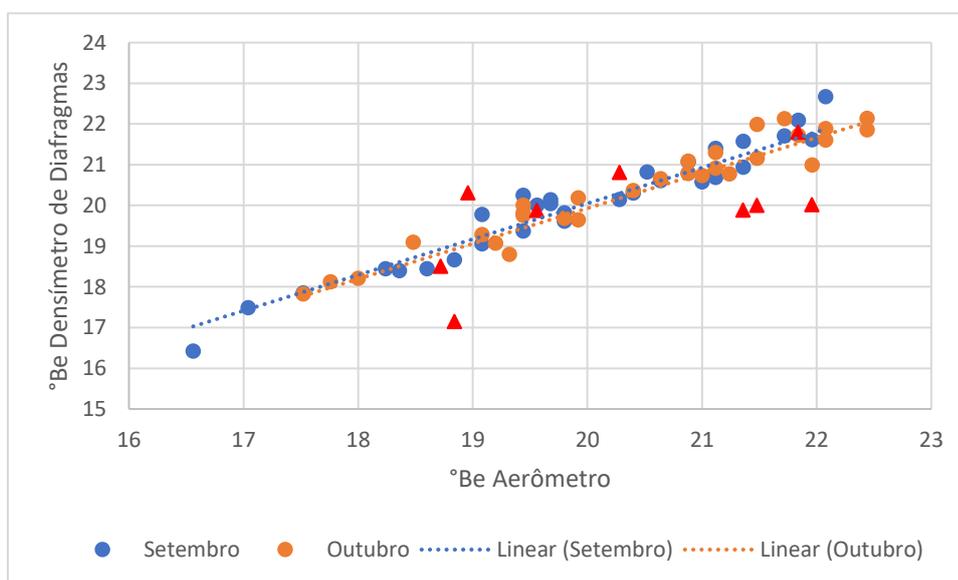


Fonte: Acervo pessoal.

Diferente do comportamento constatado pela Figura 17 para o densímetro mássico, as curvas e os fatores de correlação para o transmissor de densidade de diafragmas apresentados a partir da Figura 21 - com R^2 iguais a 0,8558 e 0,8456 para os meses de setembro e outubro, respectivamente - indicam que a falta de limpeza para o densímetro de diafragmas não é um fator tão expressivo quanto para o densímetro mássico.

No entanto, de forma análoga a análise anterior, percebeu-se que os desvios existentes ainda estavam atribuídos aos pontos que foram coletados em turnos que não conduziram nenhuma limpeza no decorrer da operação. Desta forma, apresenta-se na Figura 22 os pontos coletados nos turnos sem limpeza, destacando-os como triângulos vermelhos.

Figura 22: Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro, destacando os dados atribuídos a falta de limpeza.

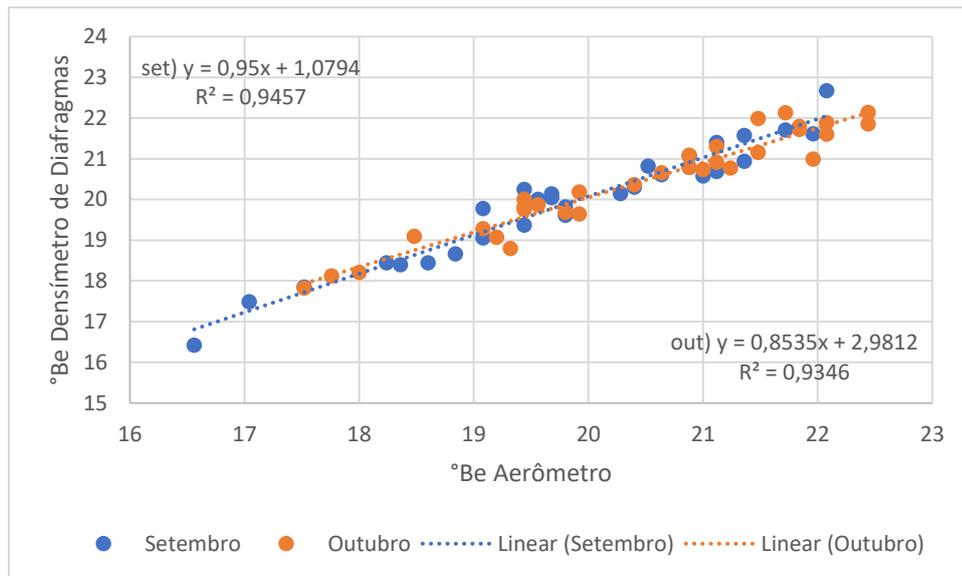


Fonte: Acervo pessoal

Nota-se também que existem valores atribuídos a falta de limpeza e que não apresentam desvios significativos. Porém, adotando procedimento análogo ao item

anterior, excluíram-se todos os dados que apontavam “Não” no item “Limpeza” no começo dos turnos. Plotaram-se as curvas apresentadas na Figura 23.

Figura 23: Curvas e fatores de correlação para o °Be aferido através do aerômetro versus o °Be exibido no densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro, excluindo os dados atribuídos a falta de limpeza.

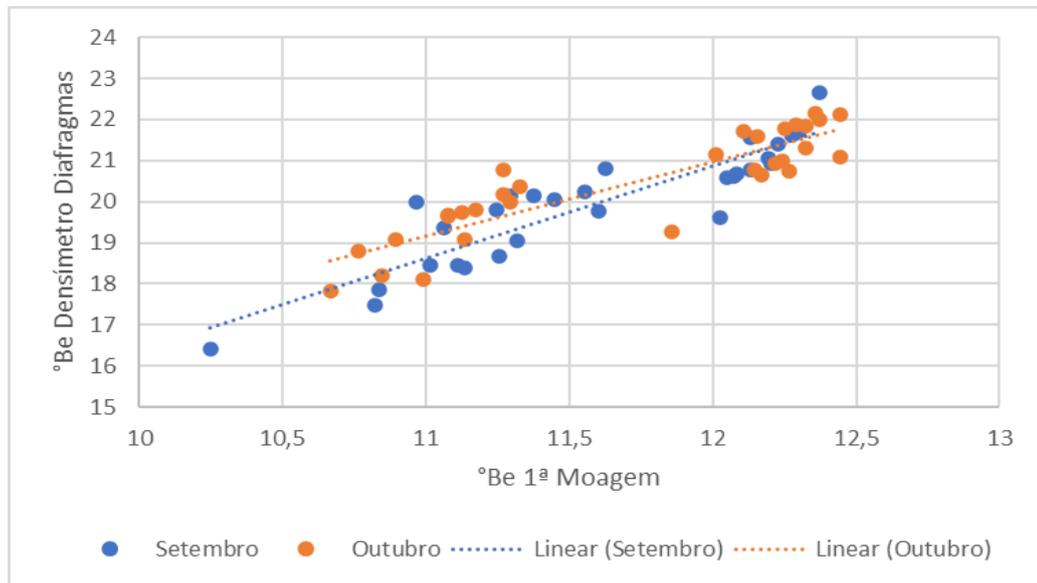


Fonte: Acervo pessoal

Agora com R^2 iguais a 0,9457 e 0,9346 para os meses de setembro e outubro, respectivamente, assim como para o densímetro mássico, nota-se um comportamento mais próximo da linearidade também para o densímetro de diafragmas. E, portanto, assegura-se que as medições indicadas pelo transmissor de densidade de diafragmas estão dentro da faixa de confiabilidade desejada para a operação.

Para a segunda análise, conforme realizado no item anterior, plotou-se no eixo x o °Be referente a primeira moagem e no eixo y o °Be indicado pelo instrumento. Buscando analisar o comportamento crescente entre estas variáveis, apresenta-se a Figura 24.

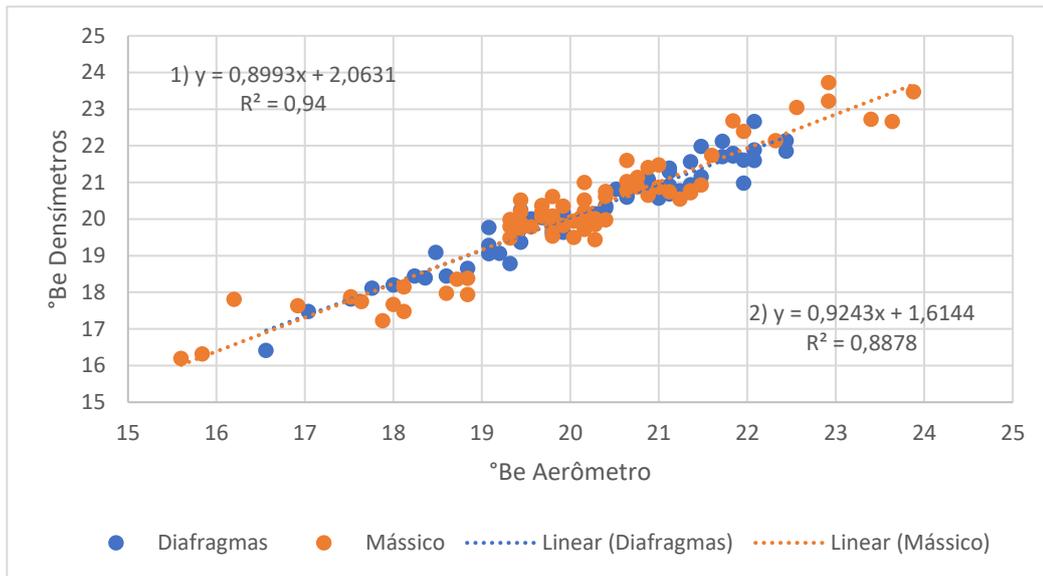
Figura 24: Curvas para o °Be da Moagem versus °Be do *underflow* da Separação Primária exibido pelo densímetro de diafragmas dos meses de setembro e outubro.



Fonte: Acervo pessoal

Por fim, plotaram-se duas curvas com os pontos unificados de setembro e outubro para cada uma das tecnologias, com o intuito de analisar o R^2 global para os transmissores e facilitar a comparação entre eles. Para isso, apresenta-se no eixo x o °Be referente ao aerômetro e no eixo y o °Be indicado pelos instrumentos. As curvas e os fatores de correlação podem ser vistos na Figura 25.

Figura 25: Curvas e fatores de correlação para o °Be do aerômetro versus o °Be exibido nos densímetros.



Fonte: Acervo Pessoal.

Os dados obtidos nos resultados e discussões mostram que o densímetro de diafragmas para a aferição da densidade, exclusivamente, é o melhor instrumento. Isso pode ser visto, a partir da análise da Figura 25 que apresenta R^2 iguais a 0,8878 e 0,94 para o densímetro mássico e de diafragmas, respectivamente.

Uma das razões para a medição mais precisa do transmissor de densidade de diafragmas está relacionada ao seu princípio de funcionamento baseado na pressão hidrostática. Dessa forma, contanto que ambos os diafragmas estejam cobertos pelo fluido, o seu funcionamento não será afetado por vibrações externas. Já o densímetro mássico, por aferir a densidade a partir das oscilações de seus tubos, é afetado pelas vibrações que ocorrem na planta. Ressalta-se que na fábrica em estudo os transmissores de densidade estão localizados no mesmo andar que diversas centrífugas, as quais durante sua operação vibram com alta intensidade, potencialmente interferindo na medição do densímetro mássico.

No entanto, visto que o objetivo deste estudo é determinar o melhor sistema de controle de densidade, é importante se atentar para o conhecimento de outras variáveis, como vazão e quantidade de ar presente no fluido em análise. Tais

informações são apenas oferecidas pelo transmissor que atua a partir do Efeito Coriolis.

A partir do acompanhamento da vazão do fluido que percorre o densímetro mássico, é possível automatizar o procedimento de limpeza. Uma vez que o processo transcorre, parte sólidas que estão presentes no fluido se prendem a tubulação ocasionando certa incrustação. Isto é representado por uma redução gradativa na vazão, que ao atingir um valor determinado, indica que o sistema deve ser limpo. A diminuição na vazão pode, também, significar que há um entupimento nas linhas.

Já com o acompanhamento da quantidade de ar presente no fluido, a partir da variável adimensional chamada “2 phase signal”, ou 2Ph, é possível garantir que não há ar na amostra desde que a variável esteja próxima a zero. Caso o 2Ph esteja acima de um valor estabelecido como recomendado é possível inserir um alarme que indique que a medição de densidade não está confiável. Dentre os principais motivos para a presença de grande quantidade de ar na amostra estão: tempo, temperatura e teor de SO₂ inadequados na etapa de maceração; excesso de temperatura do processo de Separação Primária; flutuação nas condições de entrada da centrífuga separadora e do transmissor de densidade. A relevância dos motivos indicados acima para o processo de Separação Primária e para o funcionamento do transmissor de densidade foram discutidos previamente no decorrer deste trabalho.

Outro fator importante para qualquer sistema de controle é o elemento final de controle, ou seja, a válvula que será responsável pela alteração da variável manipulada. No estudo em questão vimos que a variável medida é a densidade, com seu setpoint em °Be. Por sua vez, a variável manipulada é a vazão mássica e o equipamento escolhido para o seu controle foi a válvula v-ball, isto porque, como visto anteriormente, apesar de demonstrar grande resistência a válvula possui um corte em V no seu obturador, permitindo sua utilização em ângulos de abertura de 15 a 90°. Portanto, percorre uma faixa de operação suficiente para atender as necessidades do processo.

Em resumo, o densímetro de diafragmas se apresentou como o melhor equipamento para a medição exclusiva de densidade, porém este necessita de outro

equipamento para suprir a falta de capacidade de medir a vazão mássica e a quantidade de ar da corrente de *underflow* do processo. Assim, apresentando um custo adicional.

5. CONCLUSÕES

A comparação entre os transmissores de densidade permitiu verificar que o densímetro de diafragmas é o melhor para a medição de densidade, com R^2 igual a 0,94. Este instrumento também apresentou melhores resultados levando em consideração cenários em que a limpeza não foi realizada.

Em contrapartida, o densímetro mássico apresenta vantagens com relação a sua versatilidade, uma vez que permite o acompanhamento de outras variáveis, como vazão mássica e quantidade de ar na amostra (*2 phase signal*). Sendo assim, é importante realizar análise de custo para verificar quais instrumentos poderiam ser inseridos em conjunto com o densímetro de diafragmas para acompanhar as variáveis citadas anteriormente.

Em estudos futuros, recomenda-se a análise da densidade a partir da média de um conjunto de pontos coletados em um determinado intervalo. Isso porque, registros manuais dados a partir do visor do instrumento podem apresentar erros devido à variação do valor exibido entre o momento em que a amostra é coletada e o valor é registrado.

Outra recomendação seria realizar um estudo fazendo um acompanhamento simultâneo da variável 2Ph e da densidade, a fim de verificar o efeito da quantidade de ar presente na corrente nas medições de densidade, garantindo que não há nenhum desvio de forma análoga ao que foi realizado para os pontos em que não houve limpeza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INGREDION INCORPORATED. **Carreiras na Ingredion**. São Paulo, 2017. Documento em meio eletrônico. Disponível em: <https://www.ingredion.com/sa/pt-br/institucional/carreiras-na-ingredion.html>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- INGREDION INCORPORATED. **Developing ideas. Delivering Solutions**. São Paulo, 2017. Documento em meio eletrônico. Disponível em: <https://www.ingredion.ca/content/ingredion/sa/brasil.html>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- FERREIRA GUINE, R.D.P., & CORREIA, P.M.D.R. (Eds.). (2013). **Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products (1st ed.)**. CRC Press. Documento em meio eletrônico. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b15246>. Acesso em: 2 jul. 2022.
- REGITANO-D`ARCE, M.A.B., SPOTO, M.H.F., & CASTELLUCCI, A.C.L. **Processamento e industrialização do milho para alimentação humana**. [S. l.], jul 2015. Artigo em meio eletrônico. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Industrializacao-artigo2.pdf. Acesso em: 2 jul. 2022.
- ABMILHO. **Estatísticas – Consumo**. [S. l.], jul. 2022. Documento em meio eletrônico. Disponível em: <http://www.abimilho.com.br/estatisticas/consumo>. Acesso em: 6 jul. 2022
- CINELLI, BERNARDO ALVES. **Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. Monografia em meio eletrônico. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/BernardoAlvesCinelli.pdf. Acesso em: 11 jul. 2022
- RAMIREZ, EDNA & JOHNSTON, DAVID & MCALOON, ANDREW & YEE, WINNIE & SINGH, VIJAY. **Engineering process and cost model for a conventional corn wet milling facility**. [S. l.], jan. 2008. Documento em meio eletrônico. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43268866_Engineering_process_and_cost_model_for_a_conventional_corn_wet_milling_facility. Acesso em: 13 jul. 2022.

GUSTAFSON, COLE, & FEWELL, JASON. **Ethanol Production - Dry versus Wet Grind Processing**. Dakota do Norte, 2008. Artigo em meio eletrônico. Disponível em: <https://www.ag.ndsu.edu/energy/biofuels/energy-briefs/ethanol-production-dry-versus-wet-grind-processing#:~:text=While%20dry%20milling%20is%20less,parts%20of%20the%20corn%20kernel>. Acesso em: 17 jul. 2022.

N. SINGH, S. R. ECKHOFF. **Wet Milling of Corn: A Review of Laboratory-Scale and Pilot Plant-Scale Procedures**. Cereal Chemistry, 1996.

GARCIA, VITOR AUGUSTO. **Química dos Alimentos: Proteínas**. Universidade de São Paulo, 2020. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5770804/mod_resource/content/1/Aula%2011%20%2820-10%29.pdf Acesso em: 17 jul. 2022.

EDSON, CARLOS. Trata-se de uma Miscelânea Sobre a Engenharia Química e Áreas Afins: **Densidade Baumé**. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://carloosedison.blogspot.com/2012/01/densidade-baume.html>. Acesso em: 18 jul. 2022.

BAYER, FERNANDO M. & ARAÚJO, OLINTO C. B. **Controle Automático de Processos**. e-Tec Brasil. Escola Técnica do Brasil. Santa Maria – RS, 2011. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/11_controle_automatgico_processos.pdf. Acesso em: 18 jul. 2022.

ALFA LAVAL. **CH-38 GOF Separator: Nozzle Centrifuge**. Disponível em: [Merco-CH38.pdf \(alfalaval.com\)](#). Acesso em: 2 jul. 2022.

ALFA LAVAL. **Como funciona uma centrífuga de discos**. Disponível em: <https://www.alfalaval.com.br/produtos/separacao/separadoras-centrifugas/separadoras/merco/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

ALFA EQUIPAMENTOS. **Medidor de Vazão Mássico Coriolis: Mais Detalhes Sobre o Medidor de Vazão Mássico Coriolis**. Disponível em: <https://alfaequipamentos.ind.br/medidor-de-vazao-massico-coriolis/conaut>. Acesso em: 18 jul. 2022.

NTGD VÁLVULAS INDUSTRIAIS. **Válvula de esfera de porta V**. Disponível em: <https://www.ntgdvalve.com/pt/v-port-ball-valve/>. Acesso em: 03 jul. 2022.