



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE MALHA DE CONTROLE DE
UMIDADE EM PENEIRA VIBRATÓRIA INDUSTRIAL**

ALFREDO CUSTODIO LIMA COTA

Uberlândia – MG

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



**ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE MALHA DE CONTROLE DE
UMIDADE EM PENEIRA VIBRATÓRIA INDUSTRIAL**

**Autor: Alfredo Custódio Lima Cota
Orientador: Rubens Gedraite**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso
de graduação em Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Aeronáutica.**

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia – MG

2025

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ALFREDO CUSTODIO LIMA COTA
SUBMETIDO AO PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHARIA
AERONÁUTICA, EM 09/05/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rubens Gedraite
Orientador – PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian – IFSP

Eng. Rafael Yuri Medeiros Barbosa – Doutorando PPGEQ/UFU

Eng. Vinicius Pimenta Barbosa – Doutorando PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, deixo aqui registrado meu amor à minha família, meus pais Belizete e Jter e minha irmã Alice. Agradeço o apoio incondicional deles nos momentos em que pensei em desistir, a preocupação com meu bem estar, e por todo esforço que fizeram para tornar possível a realização de um sonho.

Estendo minha gratidão à família que construí ao longo desses anos, composta por amigos que, de diferentes maneiras, contribuíram significativamente para essa jornada. Cada um deles deixou marcas, ensinamentos e me acolheram, tornando essa experiência mais leve e enriquecedora.

Registro aqui meu especial agradecimento a mãe que consegui durante a graduação, Leandra Paulista, acolhendo-me, dando conselhos e broncas quando necessário, preocupando-se com meu bem estar. Ao Matheus Torezan e Ísis Germiniani, meus primeiros amigos em Uberlândia, que me proporcionaram um espaço seguro de aceitação e foi fonte de inspiração para enfrentar desafios pessoais. Ao Lucas Cunha e ao Lucas Freitas, pela humildade, carinho e notável inteligência, tornando-me um grande fã deles. Às minhas amigas Natália Neris e Camila Almeida, pelas valiosas trocas de experiências que ampliaram minha compreensão sobre meu papel na sociedade – verdadeiras irmãs ao longo dessa caminhada. À Larissa Graziano e à Vitória Silveira, com quem aprendi a ser mais determinado e a buscar novas conquistas. À Yasmin Máximo e à Amanda Abigail, pela parceria incondicional em todos os momentos. Ao João Vicente, a quem confiei minhas maiores vulnerabilidades e que me ajudou a enfrentá-las com mais firmeza.

Sou igualmente grato a outros amigos e amigas que desempenharam papéis importantes em minha vida acadêmica e pessoal de maneira singular, como Enivaldo Filho, Maria Ezabella, Yohanna Magalhães, Advânia Alves, Lucas Alves, Lohanna Paiva, Murilo Martins, Nicolle Pires, Ana Lídia, Leonardo Corsini, Felipe Bufelli, Uelington Vieira, Phillemon Francis, Iago Nonaka, Daniel Ribeiro, João Vitor Silva, João Vitor Barbosa, Solano Jorenti e Rhuan Mendes.

Por fim – mas não menos importante –, expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Rubens Gedraite, que, mesmo diante das dificuldades que encontrei ao longo do curso, confiou em meu trabalho e ofereceu constante apoio. Agradeço pela oportunidade concedida e pela atenção dedicada ao desenvolvimento deste trabalho, sempre pautado pelo respeito e compromisso acadêmico.

*“Freedom! Freedom! I can’t move
Freedom, cut me Loose!
Singin’, freedom! Freedom! Where are you?
Cause I need freedom too!
I break chains al by myself
Wonn’t let my freedom rot in hell
Hey! I’m a keep running
Cause a winner don’t quito n themselves”*

Beyoncé ft. Kendrick Lamar- Freedom

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 9 |
| RESUMO..... | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 2.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO | 14 |
| 2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO..... | 14 |
| 2.2.1 Finalidades do fluido de perfuração | 14 |
| 2.2.2 Características desejáveis | 15 |
| 2.2.3 Tipos de fluidos de perfuração | 15 |
| 2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS | 15 |
| 2.3.1 Peneiras vibratórias | 16 |
| 2.3.2 <i>Mud cleaner</i> | 16 |
| 2.3.3 Centrífugas verticais (<i>Cuttings Dryers</i>) | 17 |
| 2.3.4 Centrífugas horizontais (Decantadoras) | 17 |
| 2.3.5 Degaseificadores | 18 |
| 2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO..... | 18 |
| 2.4.1 Funcionamento | 18 |
| 2.4.2 Tipos de movimentos | 19 |
| 2.4.3 Variáveis Operacionais | 20 |
| 2.4.4 Automação e controle de peneiras vibratórias | 23 |
| 2.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS | 26 |
| 2.6 SENsoRES DE UMIDADE | 32 |
| 2.6.1 Sensor de Umidade Resistivo..... | 32 |
| 2.6.2 Sensor de Umidade Capacitivo | 33 |
| 2.6.3 Sensores de umidade industriais | 34 |

| | |
|---|----|
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL..... | 36 |
| 3.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS NA FACILIDADE EXPERIMENTAL | 37 |
| 3.3. MODELAMENTO MATEMÁTICO APLICADO..... | 38 |
| 3.4. SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE UMIDADE..... | 38 |
| 3.5. CONTROLADOR DE UMIDADE PRORPOCIONAL INTEGRAL BASEDO NO MÉTODO IMC. | 47 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 4.1. COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DA UMIDADE..... | 50 |
| 4.2. MODELOS DO PROCESSO DE DESÁGUE | 50 |
| 4.3. MODELOS DOS CONTROLADORES PI..... | 52 |
| 4.4. DINÂMICA DO SISTEMA | 53 |
| 5. CONCLUSÃO | 56 |
| REFERÊNCIAS..... | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle otimizado. | 13 |
| Figura 2.1 - Conjunto de equipamentos de uma unidade de controle de sólidos tradicional. | 16 |
| Figura 2.2 - Centrífuga vertical. | 17 |
| Figura 2.3 - Centrífuga horizontal. | 18 |
| Figura 2.4 - Peneira vibratória típica. | 19 |
| Figura 2.5 - Tipos de movimentos vibratórios: | 19 |
| Figura 2.6 - Formas de abertura quadrada e retangular, simples e em camadas. | 21 |
| Figura 2.7 - Ilustração das regiões de piscina e de secagem de sólidos retidos. | 22 |
| Figura 2.8 - Vida útil dos equipamentos testados. | 24 |
| Figura 2.9 - Peneira vibratória equipada com o sensor de vibração. | 25 |
| Figura 2.10 - Processo representado a partir de um modelo. | 27 |
| Figura 2.11 - Sensor resistivo de umidade. | 33 |
| Figura 2.12 - Sensor capacitivo de umidade. | 33 |
| Figura 2.13 - Funcionamento de um sensor de umidade NIR. | 35 |
| Figura 3.1 - Ilustração da unidade experimental utilizada. | 36 |
| Figura 3.2 - Peneira vibratória Mongoose pro Shaker. | 37 |
| Figura 3.3 - Aspecto da solução formada. | 37 |
| Figura 3.4 - Diagrama de simulação no Xcos. | 40 |
| Figura 3.5 - Variação do set point da umidade no diagrama de simulação. | 41 |
| Figura 3.6 - Definição dos parâmetros referentes aos blocos tipo degrau. | 42 |
| Figura 3.7 - Aquisição dos dados durante o tempo de simulação. | 42 |
| Figura 3.8 - Ramificação do sinal de set point da umidade. | 43 |
| Figura 3.9 - Estrutura interna do diagrama de blocos simulado. | 44 |
| Figura 3.10 - Janela de definição de parâmetros para controlador PID. | 45 |
| Figura 3.11 - Visualização dos resultados das saídas do sistema no diagrama de blocos. | 46 |
| Figura 3.12 - Tabela de sintonia pelo método IMC. | 48 |
| Figura 3.13 - Valores típico de τ_c | 49 |
| Figura 4.1 - Comportamento temporal dos sinais de excitação e os sinais de saída. | 50 |
| Figura 4.2 - Definição gráfica das constantes de processo. | 52 |
| Figura 4.3 - Comportamento dinâmico do sistema. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Função de transferência de um sistema integrador..... | 29 |
| Tabela 2.2 - Função de transferência de primeira ordem..... | 29 |
| Tabela 2.3 - Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (<i>FOPDT</i>).. | 30 |
| Tabela 2.4 - Função de transferência de segunda ordem..... | 31 |
| Tabela 4.1 - Controladores PI sintonizados pelo método IMC..... | 53 |
| Tabela 4.2 - Índices de Erros do Sistema..... | 55 |

RESUMO

Durante o processo de perfuração de um poço de petróleo é utilizado o fluido de perfuração, cuja finalidade é resfriar e lubrificar a broca. Devido às questões ambientais e financeiras da indústria o reuso do líquido se faz necessário, submetendo-o a processos de separação de mistura sólido-líquido e restauração da sua composição original. Uma das etapas de separação é o peneiramento vibratório, parte fundamental desse ciclo pois a eficiência dos seus sucessores depende de sua efetividade. Com o avanço tecnológico é possível alcançar uma maior eficiência do processo através da implementação de microprocessadores no sistema afim de aplicar leis de controle através das variáveis de interesse, como umidade e rotação do motor, baseado em modelos empíricos que representam o sistema. Desse modo, o trabalho objetiva simular a ação de 8 controladores proporcional integral (PI) baseados no método *Internal Model Control* (IMC), utilizando 4 valores distintos para o parâmetro de projeto (τ_c), para o controle de umidade em peneira vibratória em escala industrial. Eles foram sintonizados a partir de dois modelos empíricos distintos que relacionam a rotação do motor de vibração do sistema e a umidade, um aliado ao aumento da rotação do motor com a umidade e o outro o inverso, onde esses foram modelados a partir do método gráfico e formulados como funções transferência. A ação de controle foi simulada no *software Scilab*, utilizando o ambiente *Xcos*. Nele foram desenhados dois ramais que representam as diferentes dinâmicas devida à distinção de modelos, e para não intervenção dos efeitos do controlador do ramal superior no ramal inferior, ou vice-versa, além de um sinal composto por dois degraus distintos como *set point*. Para o comportamento da umidade foi observado para todos os valores τ_c ela se comporta como algo similar a dinâmica de funções transferências de primeira ordem, sem oscilações, e a medida em que ele é aumentado o sistema demora mais para chegar ao estado estacionário. Enquanto, para o comportamento dinâmico da rotação do motor são notados picos para τ_c com valores menores, o que pode ultrapassar o limite físico do mesmo.

Palavras-chave: Peneiramento vibratório, Separação sólido- líquido, Perfuração de poços de petróleo, Controladores, Simulação, IMC.

ABSTRACT

During the drilling process of an oil well, a drilling fluid is used, whose purpose is to cool and lubricate the drill bit. Due to environmental and financial concerns in the industry, the reuse of this fluid becomes necessary, subjecting it to solid-liquid separation processes and restoration of its original composition. One of the separation stages is vibratory screening, a fundamental part of this cycle, as the efficiency of subsequent stages depends on its effectiveness. With technological advancements, it is possible to achieve greater process efficiency through the implementation of microprocessors in the system to apply control laws based on variables of interest, such as moisture and motor speed, using empirical models that describe the system. Thus, this work aims to simulate the action of eight proportional-integral (PI) controllers based on the Internal Model Control (IMC) method, using four distinct values for the design parameter (τ_c), for the moisture control in an industrial-scale vibrating screen. The controllers were tuned using two different empirical models that relate the vibration motor speed to the moisture: one in which moisture increases with motor speed, and the other with an inverse relationship. These models were developed using a graphical method and formulated as transfer functions. The control action was simulated using the Scilab software in the Xcos environment. Two branches representing the different dynamics—due to model distinction—were drawn, and to avoid interference between the controller effects from one branch to the other, a composite signal consisting of two distinct step changes was used as the setpoint. For the moisture behavior, it was observed that for all τ_c values, it behaved similarly to the dynamics of a first-order transfer function, with no oscillations, and as τ_c increases, the system takes longer to reach steady state. Meanwhile, for the motor speed dynamic response, peaks were noted for lower τ_c values, which may exceed the motor's physical limits.

Keywords: Vibratory screening, Solid-liquid separation, Oil well drilling, Controllers, Simulation, IMC.

1. INTRODUÇÃO

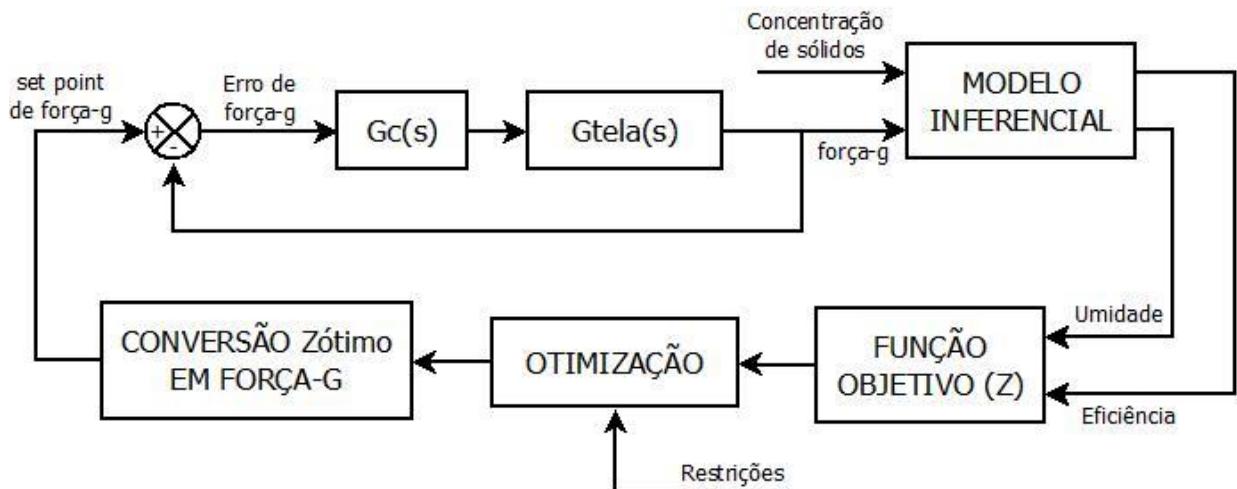
A utilização de sistemas eletrônicos digitais em controle e automação de processos se iniciou, praticamente, com o próprio advento dos computadores digitais. Já no começo dos anos 60, instalações industriais introduziram o computador como importante dispositivo para controle. Durante aproximadamente 20 anos, tais aplicações concentraram-se na concepção de controle centralizado, ou seja, com o computador reunindo em um único processador - eventualmente redundante - todas as suas tarefas (**SEBORG; EDGAR; MELLINCHAMP, 2003**) (**OGATA, 2012**). Atualmente, os modernos sistemas digitais de controle distribuídos, apresentam o recurso da distribuição do processamento das informações, viabilizados pelo baixo custo dos microprocessadores, permitindo assim uma confiabilidade similar àquela obtida pelos pioneiros sistemas analógicos convencionais, ao mesmo tempo em que se oferecia toda a potencialidade dos sistemas digitais, especialmente sua flexibilidade, conferida pelas funções reprogramáveis (**RONAES et al., 2009**).

Em processos de perfuração de poços de petróleo, o controle de sólidos é de extrema importância devido a fatores operacionais, ambientais e econômicos. Os equipamentos utilizados em uma unidade típica de controle de sólidos para separação sólido-líquido são divididos em três grupos sequenciais: peneiras vibratórias, bateria de hidrociclos (desareiadores e dessiltadores) e centrífuga decantadora (**LOBATO et al., 2011**). Tradicionalmente, o controle adequado e eficiente do funcionamento das peneiras vibratórias é feito de maneira simples, sem contemplar o emprego de modelos matemáticos que permitam predizer o comportamento das variáveis de processo de maior interesse para a operação, a saber: eficiência de separação e teor de umidade residual no material retido pela peneira (**GUERREIRO; GEDRAITE; ATAÍDE, 2016**).

É importante ressaltar o fato de que há significativa dificuldade de se obter modelos fenomenológicos que sejam capazes de descrever o comportamento da mistura sólido-líquido em um processo de separação em peneira vibratória. Isso se deve principalmente ao grande número de variáveis envolvidas no processo, entre as quais podemos citar: abertura de tela, frequência de vibração (força-g), inclinação da tela de peneiramento, distribuição de tamanho de partícula, concentração de sólidos na mistura alimentada, interações partícula-partícula e líquido-partícula, entre outras (**VARGAS et al., 2015**). O acoplamento de malha de medição de umidade residual do sólido retido com a malha de controle da força-g se mostrou uma possibilidade interessante de melhorar o rendimento do processo de deságue (**FREITAS et al., 2017**).

A busca de um ponto ótimo de operação que englobe modelos matemáticos semi-empíricos identificados é uma alternativa bastante atraente para melhorar o desempenho do processo em estudo. A maximização da eficiência de separação e a minimização do teor de umidade residual podem ser realizadas por meio do emprego de uma função objetivo (Z). A operação ótima deve apresentar uma eficiência elevada e uma umidade de sólidos retidos baixa. Portanto, para otimizar o processo é necessário conhecer o valor máximo de Z , o qual pode ser conseguido com o emprego de uma estratégia de controle que permita a otimização em tempo real do sistema (FREITAS et al., 2017). Na **Figura 1.1** é apresentado o diagrama de blocos correspondente. Este sistema de controle foi testado em um protótipo de peneira vibratória.

Figura 1.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle otimizado.



Fonte: Adaptação de FREITAS ET AL. (2017).

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do desempenho de uma malha de controle de umidade residual de material sólido granular retido em peneira vibratória em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

A perfuração das rochas para a extração de petróleo é feita através de uma sonda, que consiste em um conjunto de equipamentos que possibilitam aplicar uma ação rotativa de uma broca existente na extremidade da coluna de perfuração. Tal ação gera fragmentos de rocha, que devem ser removidos por bombeamento de um fluido de perfuração. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada, então, coloca-se uma coluna de revestimento em aço e executa-se a cimentação entre os anulares dos tubos de revestimento. Feito isso, uma nova coluna de perfuração de diâmetro menor deve ser inserida para prosseguir com o processo, assim sucessivamente até o final da perfuração (THOMAS, 2001).

O fluido de perfuração que retorna de um poço deve ser reutilizado para minimizar os custos e impactos ambientais do processo de perfuração. Para isso, tal fluido é passado em série através de vários dispositivos de separação sólido-líquido para maximizar a remoção de sólidos antes da reutilização.

2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

2.2.1 Finalidades do fluido de perfuração

Fluido de perfuração é qualquer fluido utilizado na operação de perfuração, na qual é injetado por bombas através da cabeça de injeção, ou *swivel*, para o interior da coluna de perfuração e ao atravessá-la, sai pela broca e retorna através do ânulo formado entre a coluna e a parede do poço (CHARLES; SAYLE, 2010).

O fluido desempenha diversos objetivos durante a perfuração (ASME, 2005):

- Resfriar e lubrificar a broca;
- Manter os sólidos em suspensão quando parar a circulação;
- Minimizar os impactos ambientais;
- Controlar a pressão e corrosão do poço;
- Remover os sólidos gerados pela broca.

A função mais crítica que um fluido de perfuração executa é minimizar a concentração de sólidos ao redor da broca e em todo o poço. Ao fazê-lo, o próprio fluido assume essa carga de sólidos e, se esses não forem removidos, rapidamente o fluido perde a sua função. Para permitir a reciclagem e reutilização no local do fluido de perfuração, os cascalhos desprendidos devem ser removidos de forma contínua e eficiente (ASME, 2005).

2.2.2 Características desejáveis

Para facilitar a perfuração, separação dos cascalhos na superfície e estabilização do poço, deve-se destacar as seguintes características desejáveis de um fluido de perfuração (**THOMAS, 2001**):

- Seja estável quimicamente;
- Aceite qualquer tratamento físico e químico;
- Seja bombeável;
- Apresente um custo compatível com a operação;
- Apresente baixo grau de corrosão e abrasão;
- Tenha viscosidade e densidade adequadas para manter os sólidos em suspensão.

2.2.3 Tipos de fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são classificados de acordo com o constituinte majoritário (**THOMAS, 2001**). Desse modo, os principais tipos são os fluidos de base aquosa ou WBFs (*Water Based Fluids*), formados pela água pura com ou sem a adição de sais, e os fluidos de base não aquosa ou NAFs (*Non Aqueous Fluids*), formados por emulsões invertidas. Além destes, há também os fluidos a base de ar, porém, são muito pouco utilizados, restrito apenas a situações com grandes perdas de circulação e formações produtoras com pressão muito baixa (**CAEM et al., 1995**).

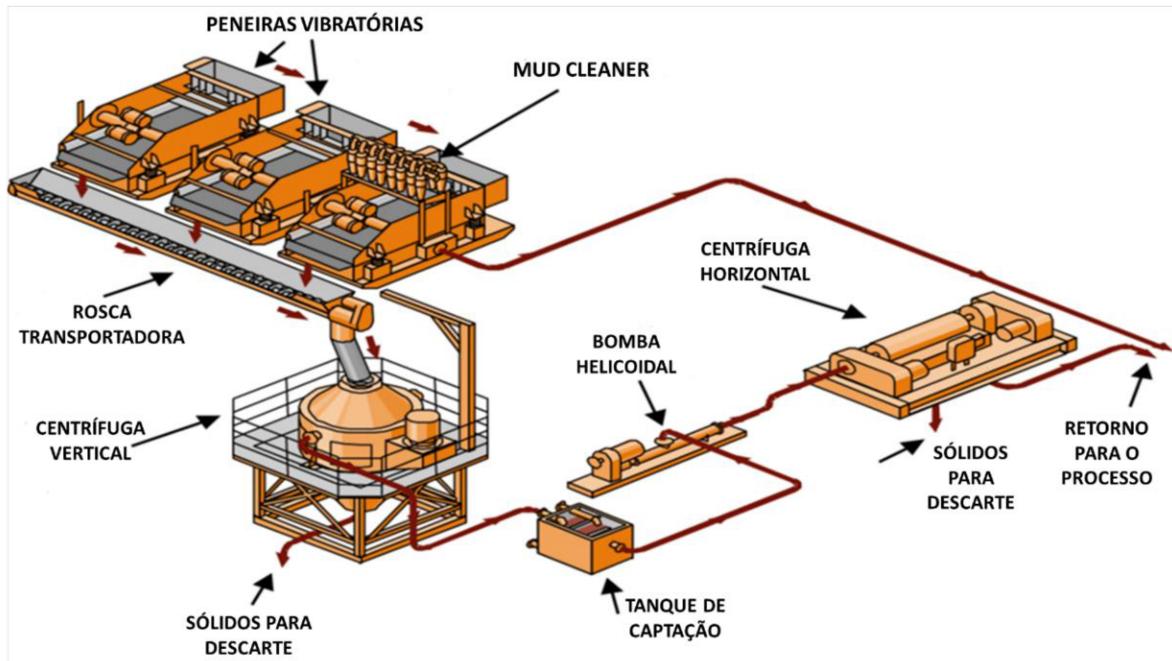
2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS

É possível reduzir os custos operacionais consideravelmente se forem utilizadas técnicas apropriadas de controle de sólidos, haja vista que fluido de perfuração é um insumo de alto valor agregado, e pode ser recuperado. Essa constatação provém do final do século XIX, quando observou-se a possibilidade de reutilizar o fluido de perfuração após a decantação natural dos sólidos (**THOMAS, 2001**).

Além disso, a unidade de controle de sólidos é de extrema importância no quesito ambiental, já que é necessário a adequação dos resíduos de perfuração às leis ambientais vigentes e cada vez mais restritas (**PEREIRA, 2013**).

Na **Figura 2.1** é mostrado um conjunto de equipamentos que compõem uma unidade de controle de sólidos tradicional. Esses e outros equipamentos serão detalhados a seguir.

Figura 2.1 - Conjunto de equipamentos de uma unidade de controle de sólidos tradicional.



Fonte: Adaptação de MI-SWACO (2017).

2.3.1 Peneiras vibratórias

As peneiras vibratórias são os primeiros dispositivos a processar o fluido, elas são responsáveis por remover as partículas maiores que, aproximadamente, $45 \mu m$ (cascalhos e grãos maiores que areia), a depender do tipo de material que a tela é feita e a aplicação industrial em que ela está inserida. Esses resíduos são retidos sobre a tela, deixando uma grande quantidade do fluido de perfuração passar pela mesma para seguir para as próximas etapas de remoção. Portanto, os outros equipamentos de separação de sólidos podem operar eficientemente apenas se as peneiras estiverem funcionando de forma adequada. Consequentemente, são considerados os dispositivos de controle de sólidos mais importantes em uma sonda de perfuração (HOBEROCK, 1980; RAJA, 2012).

2.3.2 Mud cleaner

O *Mud cleaner* é um equipamento híbrido constituído por hidrociclos montados sobre uma tela vibratória. Sua função é recuperar parte do material, composto por aditivos, e retorná-lo ao fluido de perfuração para reduzir custos (THOMAS, 2001).

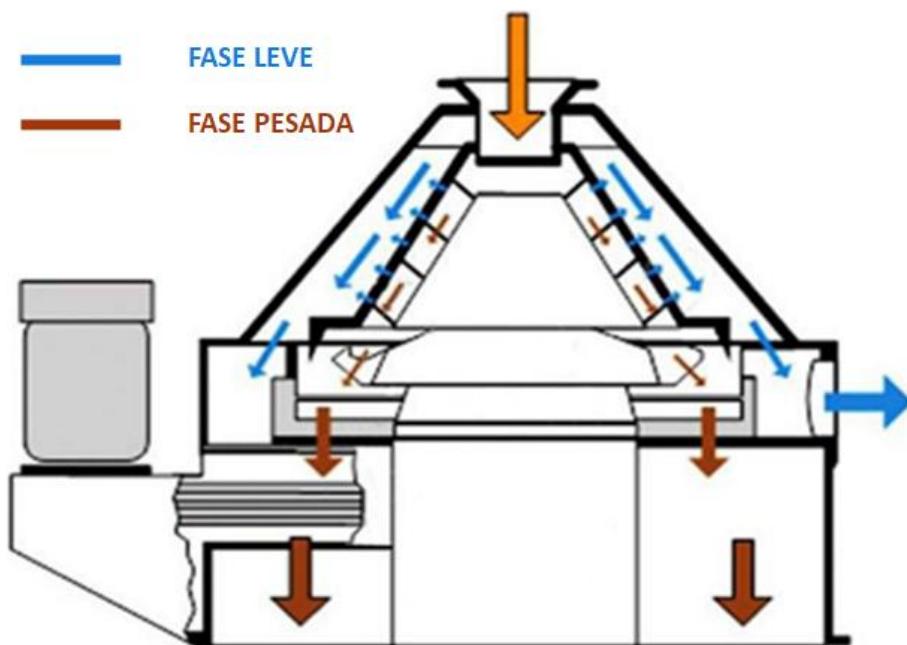
O fluido de perfuração passa por uma série de hidrociclos que separam as partículas finas e leves das partículas pesadas e grossas. A barita e outros sólidos perfurados pesados são

então transportados no subfluxo para uma peneira vibratória de 100 a 200 malhas. Lá, eles são separados, com a barita passando pela tela e retornando ao sistema ativo.

2.3.3 Centrífugas verticais (*Cuttings Dryers*)

As chamadas *Cuttings Dryers* são centrífugas verticais de alta velocidade que conseguem processar grandes volumes e alcançam uma ótima separação de líquido-sólidos (os sólidos secos descarregados geralmente têm um teor de líquido residual menor do que 5% em peso, em base úmida). Isso é importante no cumprimento de regras ambientais cada vez mais rigorosas para descarte de detritos no mar, além de melhorar a eficiência geral, visto que o líquido desprendido do sólido, muitas vezes valioso, se junta ao líquido separado nos demais equipamentos e retorna ao processo (MI-SWACO, 2017). Na **Figura 2.2** é apresentada uma representação simplificada de uma centrífuga vertical.

Figura 2.2 - Centrífuga vertical.



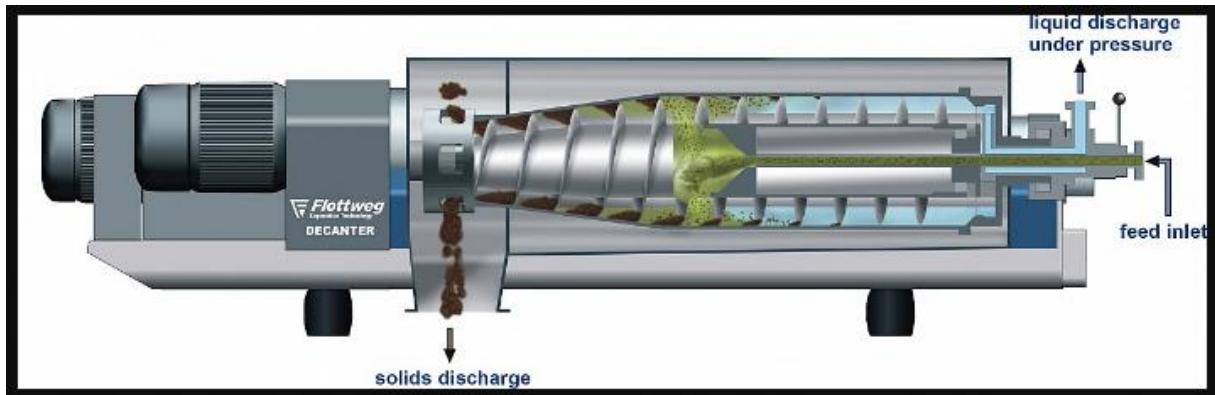
Fonte: Adaptação de TR SOLIDS CONTROL (2021).

2.3.4 Centrífugas horizontais (Decantadoras)

Algumas sondas utilizam centrífugas decantadoras, que removem partículas ainda menores que não tenham sido descartadas pelas etapas anteriores. Com capacidade de remover sólidos de até $2 \mu\text{m}$. Essas centrífugas, **Figura 2.3**, constituem a última etapa do processo antes de o fluido retornar para o poço. Tais equipamentos são capazes de manter a viscosidade em

um valor mínimo, operando de maneira prática, efetiva e econômica, além de reduzir custos com tratamentos químicos do fluido (**BOBO; HOCH, 1954**).

Figura 2.3 - Centrífuga horizontal.



Fonte: EINARSSON et. al, 2019.

2.3.5 Degaseificadores

Além dos equipamentos usuais, podem ser adicionados outros, por exemplo os degaseificadores, dispositivos que podem ser instalados antes de qualquer bomba centrífuga para ajudar a aumentar a eficiência da remoção de sólidos (**ASME, 2005**).

A remoção dos gases pode ser feita por dois tipos de equipamentos: Os degaseificadores atmosféricos, que atuam pulverizando o fluido numa câmara de separação, onde o fluido se choca com a parede e reduz o tamanho da gota, facilitando a remoção do gás, e os degaseificadores a vácuo, que removem os gases por um processo de redução da pressão do fluido enquanto escoa por chapas defletoras (**AADE, 1999**).

2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

2.4.1 Funcionamento

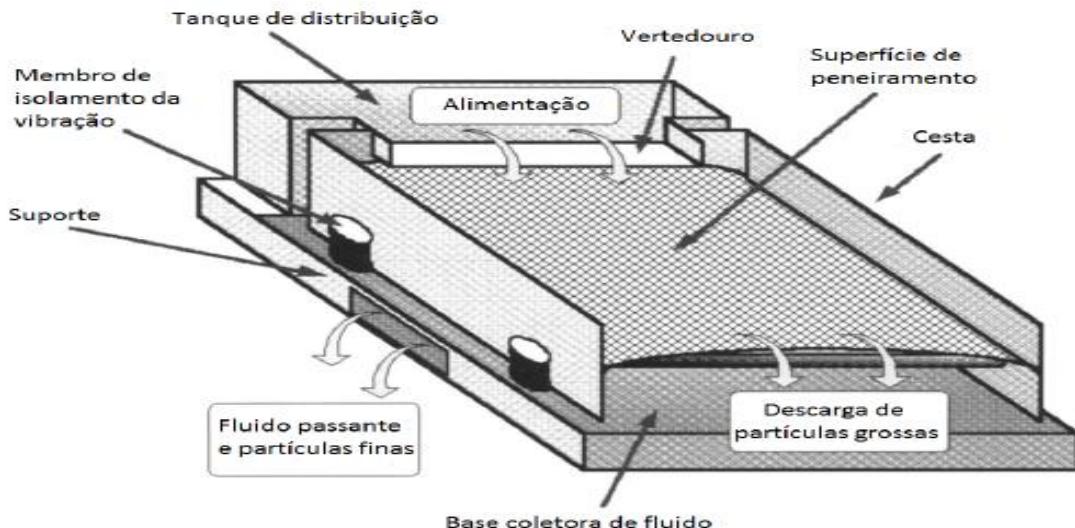
Conforme mencionado, a peneira vibratória é o objetivo principal desse estudo, portanto nesta seção será explicado de forma detalhada o funcionamento desse equipamento.

O movimento de vibração da tela de separação da peneira, gerado por motores vibratórios, promove o transporte das partículas maiores pela tela, desde a caixa de alimentação até a região coletora de sólidos. Ao mesmo tempo, a vibração promove um aumento da taxa de passagem de líquido e de partículas menores através das aberturas da tela. Na **Figura 2.4** é mostrado um exemplo típico de peneira vibratória.

O cascalho é então encaminhado para uma unidade de tratamento para eliminar os fluidos contaminantes antes de ser laçado ao fundo do mar e o fluido passante é enviado para

as demais etapas de recuperação antes de ser reutilizado na operação de perfuração (**RAJA et al., 2012**).

Figura 2.4 - Peneira vibratória típica.



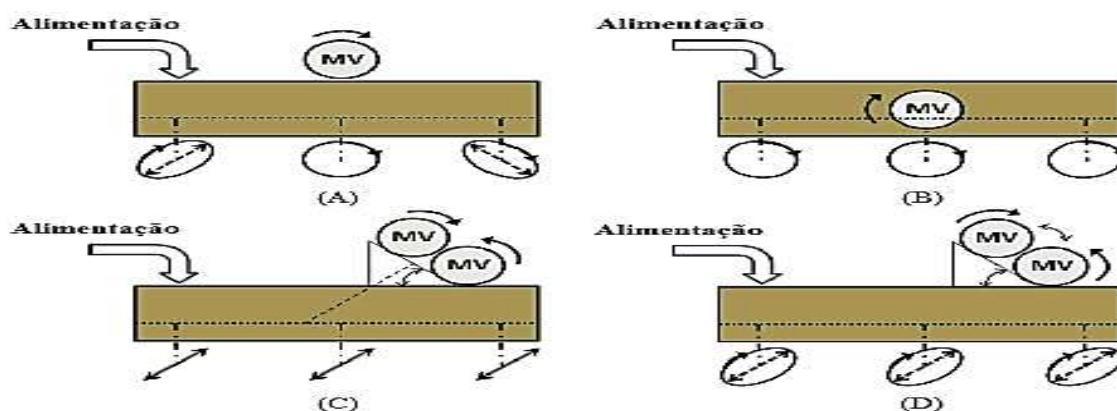
Fonte: Adaptação de AADE (1999).

2.4.2 Tipos de movimentos

O tipo de movimento que a peneira vibratória irá produzir dependerá de quantos motovibradores estiverem em operação, qual a localização dos mesmos em relação a tela da peneira e em qual velocidade estão operando. Os movimentos podem ser de quatro tipos: elíptico desbalanceado, circular, linear e elíptico balanceado. Na **Figura 2.5** são apresentados os tipos de movimentos que uma peneira vibratória pode apresentar.

Figura 2.5 - Tipos de movimentos vibratórios:

(A) Elíptico desbalanceado; (B) Circular; (C) Linear; (D) Elíptico balanceado.



Fonte: Adaptação de AADE (1999).

O movimento elíptico desbalanceado é proporcionado ao se instalar um único motor vibratório acima do centro de massa da peneira. Tal montagem produz movimentos elípticos nas extremidades da peneira. As elipses formadas possuem direções contrárias, sendo que aquela formada na região de alimentação impulsiona o material sólido para frente e a elipse formada na região de descarga impulsiona para o sentido oposto, atrasando o processo de descarte (AADE,1999).

Para corrigir o problema mencionado anteriormente, foi adaptado o motor vibratório não acima, mas no próprio centro de massa do equipamento. Assim, os movimentos elípticos desaparecem e toda a tela passa a reproduzir o movimento circular do motor vibratório, facilitando o transporte.

Em uma tentativa de otimizar ainda mais o processo foram desenvolvidas peneiras vibratórias com dois motores vibratórios, girando em sentido contrário, localizados entre o centro e a região de descarte, montados de forma paralela e mantendo uma inclinação de 45º com a tela. Isso melhora a capacidade de processamento de cascalho da peneira, permite o uso de telas com aberturas de passagem menores e reduz o desgaste delas. Portanto, atualmente, as peneiras vibratórias em sua maioria possuem essa configuração.

O que irá diferenciar entre um movimento elíptico balanceado e um movimento linear é a frequência de giro dos motores vibratórios. Normalmente as peneiras operam com uma frequência menor reproduzindo o modo elíptico balanceado em situações normais de operação, e quando ocorre um aumento da vazão de alimentação, é necessário que se aumente a rotação o que gera um movimento linear, aumentando ainda mais o deságue, mas em contrapartida aumentando o desgaste das telas. Portanto, assim que ocorre a estabilização do processo deve-se reduzir a rotação.

2.4.3 Variáveis Operacionais

2.4.3.1 Teor de sólidos da alimentação

Os sólidos competem com o fluido na passagem através das aberturas na tela da peneira. Assim, teoricamente, quanto maior o teor de sólidos, maior é a competição, causando um efeito negativo na capacidade e na eficiência da peneira (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

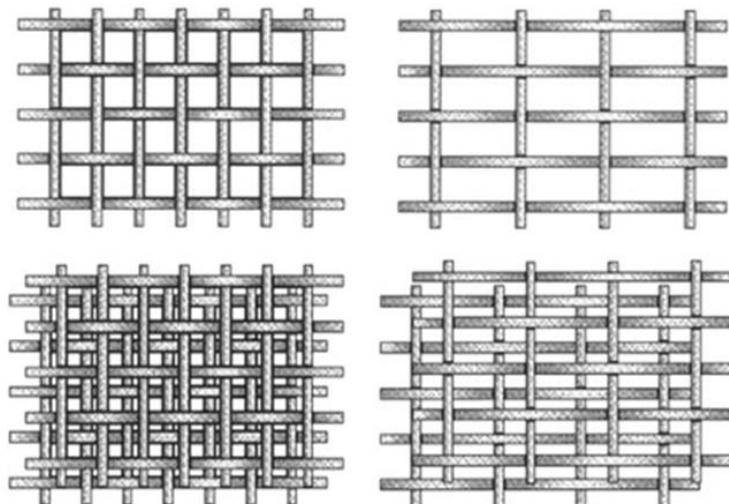
Guerreiro (2015) avaliou o teor de umidade do sólido retido e a eficiência de separação para alimentações com concentrações volumétricas (C_v) entre 1,0% e 3,0%. Com o aumento no valor da concentração da suspensão, notou-se uma diminuição da umidade de saída,

porém, também foi notada uma eficiência de separação menor. Essa relação também foi identificada experimentalmente por **Rogers; Brame (1985)**.

2.4.3.2 Tela de peneiramento

Um ponto importante em relação as telas de peneiramento é a geometria das aberturas da tela de separação, que é determinada pela maneira como esta é construída. Caso possua o mesmo número de fios na horizontal e vertical, por polegada linear, são caracterizadas como aberturas quadradas (**Figura 2.6**). Caso contrário possuem aberturas_retangulares. Além disso, as telas finas podem ser reforçadas por um ou mais tecidos de suporte. Este reforço protege a tela fina de ser danificada aumentando a vida útil das mesmas (**AADE, 1999**).

Figura 2.6 - Formas de abertura quadrada e retangular, simples e em camadas.



Fonte: Adaptação de AADE (1999).

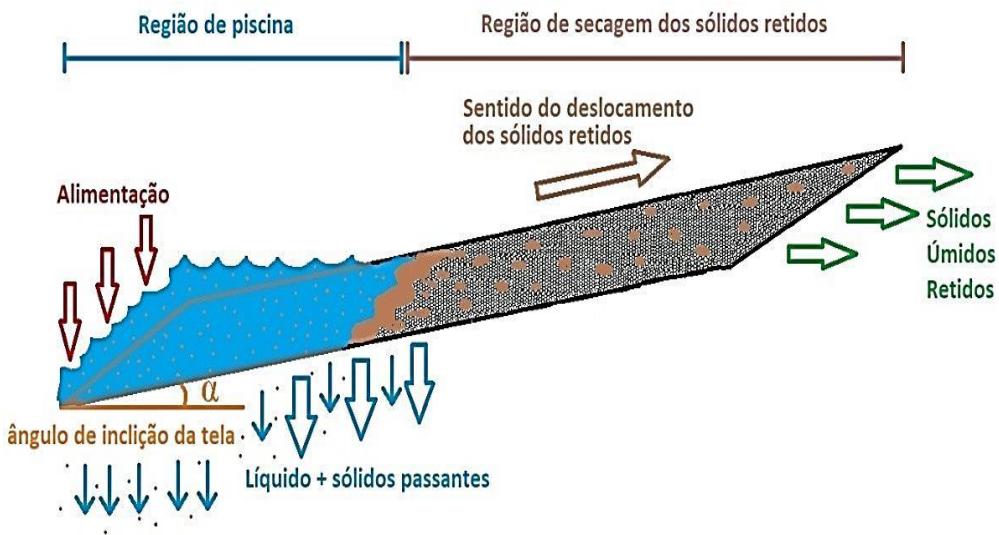
Outro ponto importante é o tamanho da abertura da tela, caracterizada pela distância entre os fios do tecido e expresso tipicamente em *microns* (μm). Essa abertura deve estar diretamente relacionada à granulometria e a característica do material que se deseja separar. A contagem do número de aberturas da tela por polegada de comprimento linear na direção dos fios da trama é denominada *mesh*. Telas com mesmo *mesh* podem ter diferentes aberturas, visto que essa variável também depende do diâmetro dos fios (**ASME, 2005**). Na **Equação 2.1** é apresentada uma forma de calcular o tamanho da abertura (ϕ) em *microns*, em função do número de *mesh* ($\#M$) e do diâmetro do fio da tela (d_W), em polegadas.

$$\phi = 25,4 \cdot \left(\frac{1}{\#M} - d_W \right) \quad (2.1)$$

2.4.3.3 Inclinação da tela

A inclinação da tela de separação está relacionada com o transporte dos sólidos e capacidade de passagem do líquido através dela. Quanto maior a inclinação da tela de separação, menor a região da tela ocupada pela suspensão (denominada como região de “piscina”), o que facilita a passagem de fluido pela tela; porém, oferece resistência maior ao deslocamento dos sólidos, tendendo a diminuir a vida útil da tela. Quanto menor a inclinação, mais a região de “piscina” avança sobre a tela de separação, favorecendo o deslocamento dos sólidos ao ponto de descarte, porém afetando o processo de separação, visto que o material terá menor tempo de secagem (ASME, 2005). Na **Figura 2.7** é ilustrada a formação das duas regiões citadas.

Figura 2.7 - Ilustração das regiões de piscina e de secagem dos sólidos retidos.



Fonte: Adaptação de BARBOSA (2018).

2.4.3.4 Vibração

O objetivo da vibração imposta em peneiras vibratórias é impulsionar as partículas sólidas, de modo a transportá-las até a região de descarga e fazer com que as partículas menores e o líquido agregado passem pelas aberturas da tela de separação. Porém, a vibração excessiva pode fazer com que o sólido seja transportado de forma mais vigorosa, prejudicando a separação. Adicionalmente, pode contribuir para que a vida útil da tela de separação seja

reduzida. Elevados valores de vibração são utilizados para altas vazões de alimentação (**WILLS; NAPIER-MUNN, 2006**).

Na literatura, uma forma usual de se medir a intensidade de vibração para o movimento circular é através do valor de Fg , definido pela razão entre a aceleração vibracional e aceleração gravitacional, como apresentado na **Equação 2.2**.

$$Fg = \frac{A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}{g} \quad (2.2)$$

Na qual, (f) é a frequência, (g) é a aceleração da gravidade e (A) é a amplitude do movimento circular, calculada pela **Equação 2.3**.

$$A = \frac{m \cdot e}{M} \quad (2.3)$$

Sendo (m) a massa do corpo excêntrico, (e) definida como a excentricidade e (M) a massa do cesto.

Portanto, para manter o valor do Fg constante durante os experimentos, fazendo com que os sólidos estejam sujeitos a mesma intensidade de aceleração, independentemente da massa sobre o cesto, é necessário a implementação de um sistema de controle do Fg que atue diretamente sobre a frequência de rotação dos motores vibratórios (**FREITAS, 2017**).

2.4.4 Automação e controle de peneiras vibratórias

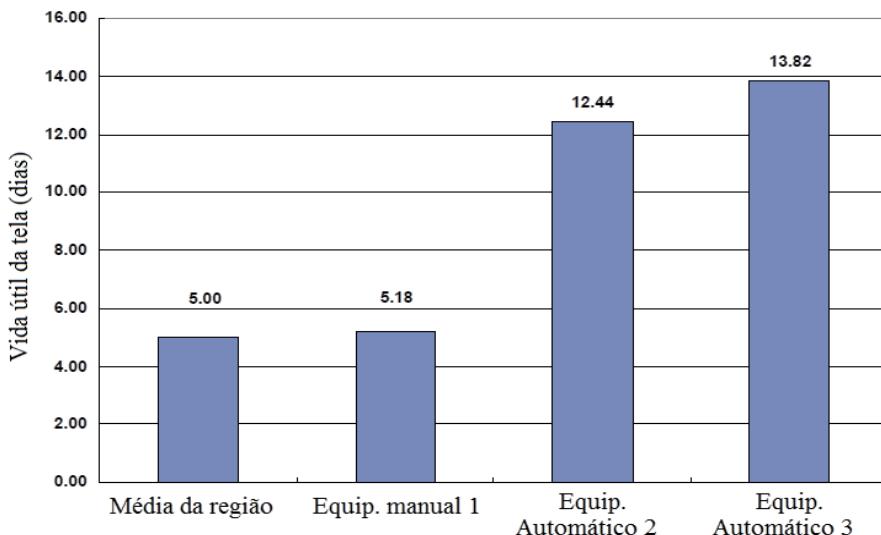
De uma maneira geral, com o aumento da competitividade, regulamentação ambiental e trabalhista, tornou-se mais difícil manter as especificações de qualidade do produto final. Nesse cenário se insere o controle de processos, que busca manter um sistema em uma desejada condição de operação, segurança e eficiência, satisfazendo normas ambientais e garantindo a qualidade (**SEBORG, EDGAR, MELLICHAMP, 2003**). A seguir são apresentadas técnicas de controle empregadas no peneiramento vibratório de fluido de perfuração bem como equipamentos automatizados já desenvolvidos.

Segundo **Scott (2006)**, a operação ótima da peneira vibratória ocorre quando 3/4 da área superficial da tela se encontra inundada pelo fluido de perfuração, restando apenas 1/4 da tela da peneira destinada para a secagem (deságue) do sólido retido. É comum que a operação da peneira vibratória com maior nível de fluido sobre a tela de separação cause perdas de

material. Bem como, se o equipamento for operado com menor nível de fluido do que o recomendado, a vida útil da tela de separação é reduzida, visto que a falta de lubrificação dela acarreta um maior desgaste do seu material de construção.

Buscando atingir o requisito citado no parágrafo anterior, Scott (2006) propôs um sistema de controle que ajusta o ângulo de inclinação da peneira. Sensores medem o nível de líquido sobre a tela de separação e, caso o nível seja diferente do respectivo *set point*, o sistema atua em câmaras de ar localizadas sob a peneira que ajustam o ângulo de inclinação da tela de separação. Se o nível de fluido está menor que o *set point*, o sistema de controle diminuirá o ângulo de inclinação. Caso contrário, se o nível de fluido está maior que o desejado, o sistema de controle aumentará o ângulo de inclinação. No caso de a inclinação já se encontrar no valor máximo permitível, o sistema aumentará também o valor do Fg aplicado aos motores vibratórios da peneira. Esse sistema foi testado por sete meses em sistemas de tratamento de sólidos de sondas de perfuração e se mostrou eficiente, visto que aumentou consideravelmente a vida útil das telas utilizadas. Na Figura 2.8 é apresentado um gráfico que ilustra – de forma comparativa – a vida útil de telas utilizadas por três equipamentos, sendo um deles operado de forma manual, considerando o valor médio estimado para a região onde o estudo foi realizado, e os outros operados de forma automatizada conforme proposto por Scott (2006).

Figura 2.8 - Vida útil dos equipamentos testados.



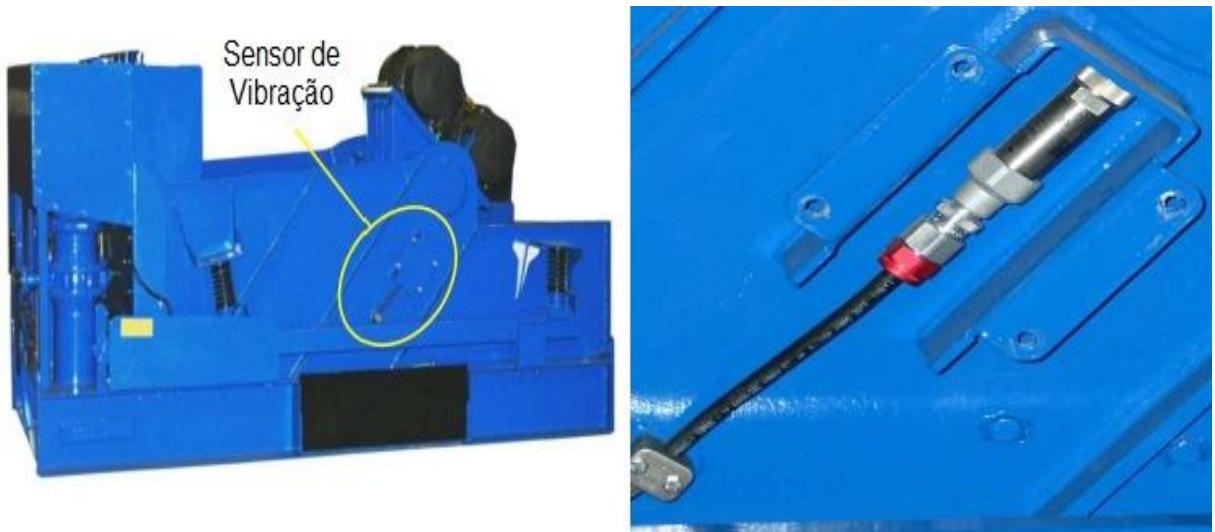
Fonte: Adaptação de SCOTT (2006).

Estudos realizados por Dorry (2010) sugerem que a intensidade do movimento de vibração da tela de separação de uma peneira vibratória obedeça à segunda lei de Newton. Portanto, se a vazão de alimentação da suspensão sobre a tela da peneira aumentar, a massa

total do sistema também aumentará e, por consequência, para um valor de Fg constante, a aceleração irá diminuir (**FREITAS, 2017**). A desaceleração do sistema pode alterar a capacidade de escoamento, a velocidade de transporte do material sólido sobre a tela de separação e o deságue do sólido retido (**DORRY, 2010**).

Para reduzir o efeito da vazão de alimentação sobre o valor do Fg aplicado à peneira, **Dorry (2010)** propõe um sistema de controle que varia a intensidade do Fg aplicado referente à vibração requerida para manter a aceleração do cesto da peneira em um valor constante. Nessa proposta, o valor do Fg medido é realimentado ao sistema de controle por meio do emprego de um sensor de vibração. O sensor mede a vibração do cesto da peneira e envia um sinal elétrico proporcional ao valor medido para o controlador, que interpreta esse sinal e altera a frequência dos motores vibratórios. O sistema de controle possui três posições de *set point*, nos quais o operador pode escolher, dependendo das condições de operação. Caso ocorra algum defeito na leitura do valor do adimensional de Fg , o sistema é programado pra operar em uma frequência de 60 Hz, impedindo que a frequência aumente indefinidamente. **Dorry (2010)** ainda afirma que esse sistema se mostrou robusto e que pode ser implementado em qualquer tipo de peneira. Na **Figura 2.9** é apresentado o equipamento utilizado por **Dorry (2010)**, destacando o sensor utilizado.

Figura 2.9 - Peneira vibratória equipada com o sensor de vibração.



Fonte: Adaptado de DORRY (2010).

Dorry e Dufilho (2012) propuseram uma melhoria para o modelo apresentado anteriormente. A primeira geração desse controlador possuía três valores ajustáveis de Fg e o operador devia escolher o *set point* a partir de suas interpretações das condições do fluido e do

andamento da perfuração do poço de petróleo. **Dorry e Dufilho (2012)** afirmam que, em várias situações, os operadores se esqueciam de alterar o *set point*, levando a perdas do fluido, ou assumiam que a aceleração máxima era o ponto ótimo de operação, diminuindo a vida útil da tela de separação empregada na peneira. Foi proposta então uma segunda geração do sistema de controle. O controlador automaticamente ajusta o *set point* de Fg a partir de características do fluido e do poço, tornando a intervenção do operador necessária somente quando ocorre um mau funcionamento dos equipamentos. O processo operando de maneira controlada garantiu uma melhoria no desempenho da peneira bem como, um aumento na velocidade de transporte do material sólido sobre a tela e capacidade do sistema.

Endress (2015) apresenta três peneiras vibratórias modernas com ampla automação e elevado desempenho. O sistema *MultiG Shaker*, apresentado ao mercado em 2015, é capaz de operar com valores de Fg compreendidos entre 8 g e 50 g , sendo relevante destacar o fato de que peneiras convencionais costumam ser operadas com valores não superiores a 9 g . Nesse equipamento, o operador seleciona o valor de Fg em um painel local e o sistema de controle da peneira vibratória busca alcançar esse valor de *set point*. Outro sistema, denominado *ProgiG*, recebe os valores dos medidores de vazão, viscosidade plástica, densidade e distribuição de tamanho de partículas *online* e realiza ajustes no ponto de operação da peneira vibratória utilizando algoritmos internos, buscando o melhor valor de Fg , do ângulo de inclinação da tela de separação e de frequência de vibração. Existe ainda o sistema *Hyper-G*, o qual possui um controle que atua na inclinação da tela por meio de um sistema de engrenagens buscando uma melhor separação e também permite que o operador escolha a intensidade de vibração. Convém destacar que os sistemas citados anteriormente foram projetados de forma a buscar uma maior confiabilidade e flexibilidade operacional para as peneiras vibratórias industriais.

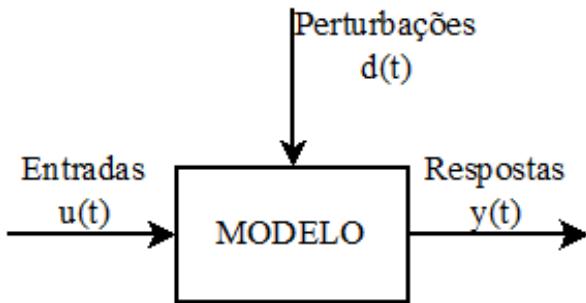
2.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Um modelo matemático é uma representação de uma ou mais características observadas em um sistema real e pode ser classificado em fenomenológicos ou empíricos. Os modelos fenomenológicos são derivados de mecanismos ou fenômenos do sistema, como transferência de massa, calor e momento. Por outro lado, os modelos empíricos empregam essencialmente equações obtidas a partir da curva de resposta do sistema a determinados tipos de perturbações, nas quais os parâmetros representam as relações de causa e efeito entre as variáveis envolvidas. É comum também que modelos fenomenológicos façam uso de dados

empíricos em algumas partes, como taxas de reações e relações de transferência de calor (**AGUIRRE, 2007; HANGOS; CAMERON, 2001**).

A identificação de sistemas é caracterizada pelo desenvolvimento de modelos empíricos, dinâmicos ou em estado estacionário, que descrevem de forma aproximada a relação de causa e efeito presente nos dados experimentais. Essa abordagem envolve estritamente a utilização de dados de entrada e saída obtidos experimentalmente (**AGUIRRE, 2007; SEBORG, EDGAR, MELLICHAMP, 2003**). De acordo com os autores citados, a comparação entre os valores obtidos com a simulação e os valores obtidos experimentalmente permite validar o modelo. Com base na **Figura 2.10**, se o modelo é conhecido juntamente com suas entradas $u(t)$ e perturbações $d(t)$, pode-se utilizar a simulação para conhecer a resposta $y(t)$. Entretanto, se for possível medir, as entradas $u(t)$, perturbações $d(t)$ e respostas $y(t)$ de um processo é possível identificar um modelo que represente essa estrutura.

Figura 2.10 - Processo representado a partir de um modelo.



Fonte: Adaptado de **SEBORG, EDGAR E MELLICHAMP (2003)**.

O processo de identificação de sistemas consiste de quatro principais etapas, a saber: *(i)*- obtenção de dados; *(ii)*- formulação do modelo; *(iii)*- estimativa de parâmetros e *(iv)*- validação do modelo.

A obtenção de dados experimentais é a etapa mais importante na identificação de sistemas, visto que esse processo propõe a construção de modelos a partir desses elementos. Em geral, são utilizados dados históricos de operação do processo; entretanto, também é comum o planejamento de testes para a coleta eletrônica de tais informações. A etapa de formulação de modelo consiste na escolha da estrutura e complexidade do modelo utilizado. É comum a utilização de funções de transferência ou modelos polinomiais. O próximo passo na identificação de sistemas consiste na estimativa dos parâmetros desconhecidos do modelo. Por fim, faz-se necessário verificar se o modelo obtido incorpora ou não as características do

sistema real e qual é a melhor representação matemática para o processo estudado (**AGUIRRE, 2007**).

A formulação de um modelo matemático é a forma na qual esse modelo é expresso. Um dos meios mais comuns de representação de sistemas dinâmicos é a função de transferência, que é caracterizada como uma expressão algébrica para a relação dinâmica entre uma dada entrada e saída de um modelo de processo. As funções de transferência são derivadas de equações diferenciais lineares a partir da transformada de Laplace (**AGUIRRE, 2007; SEBORG, EDGAR, MELLICHAMP, 2003**). Na **Equação 2.4** é apresentada a representação típica de uma função de transferência.

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m \beta_i \cdot s^i}{\sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot s^i} e^{-\theta \cdot s} \quad (2.4)$$

Na qual, $G(s)$ é uma função de transferência genérica, α_i e β_i são coeficientes constantes, s é a variável da transformada de Laplace, m e n correspondem às ordens do numerador e denominador respectivamente e θ é caracterizado como tempo morto.

Nas **Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4** são apresentadas as funções de transferências de modelos comumente usados em identificação de sistemas juntamente com as equações diferenciais dinâmicas correspondentes. Os parâmetros utilizados nessas expressões são K (conhecido como ganho da função de transferência), τ (constante de tempo), θ (tempo morto) e ζ (fator de amortecimento).

A estimativa dos parâmetros de funções de transferência pode ser realizada de diferentes maneiras, como por exemplo, método gráfico ou minimizando a soma quadrática dos resíduos. O método gráfico é comumente utilizado para ajustes de sistemas de primeira ordem. Nessa análise o ganho (K) é obtido por meio do emprego da **Equação 2.5**.

$$K = \frac{y(\infty) - y(0^-)}{M_{step}} \quad (2.5)$$

Na qual $y(\infty)$ é o valor em regime permanente de y é $y(0^-)$ é o valor inicial da resposta.

A constante de tempo pode ser obtida de duas maneiras pelo método gráfico. A primeira é pela inclinação da curva no instante inicial, com base na **Equação 2.6**. Outro método é a observação do momento que a resposta do processo alcança 63,2% da variação total proporcionada pelo degrau, representada pela **Equação 2.7** (**AGUIRRE, 2007; SEBORG, EDGAR, MELLICHAMP, 2003**).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{y}{K \cdot M_{step}} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{\tau} \quad (2.6)$$

$$y(\tau) = 0,632 \cdot [y(\infty) - y(0^-)] + y(0^-) \quad (2.7)$$

Tabela 2.1 - Função de transferência de um sistema integrador.

| Tipo da representação | Expressão matemática |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Equação diferencial | $\frac{dy(t)}{dt} - Ku(t) = 0$ |
| Função de transferência | $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s}$ |
| Equação de resposta a um degrau | $y(t) = K \cdot M_{step} \cdot t$ |

Fonte: Adaptado de SEBORG, EDGAR E MELLICHAMP, 2003.

Tabela 2.2 - Função de transferência de primeira ordem.

| Tipo da representação | Expressão matemática |
|---------------------------------|---|
| Equação diferencial | $\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$ |
| Função de transferência | $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$ |
| Equação de resposta a um degrau | $y(t) = K \cdot M_{step} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$ |

Fonte: Adaptado de SEBORG, EDGAR E MELLICHAMP, 2003.

Tabela 2.3 - Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (*FOPDT*).

| Tipo da representação | Expressão matemática |
|---------------------------------|--|
| Equação diferencial | Para $t < \theta$ $\frac{dy(t)}{dt} = 0$ Para $t \geq \theta$ $\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$ |
| Função de transferência | $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$ |
| Equação de resposta a um degrau | Para $t < \theta$ $y(t) = y_0$ Para $t \geq \theta$ $y(t) = y_0 + K \cdot M_{step} \cdot \left(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}\right)$ |

Fonte: Adaptado de SEBORG, EDGAR E MELLICHAMP, 2003.

Tabela 2.4 - Função de transferência de segunda ordem.

| Tipo da representação | Expressão matemática |
|---------------------------------|--|
| Equação diferencial | $\tau^2 \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$ |
| Função de transferência | $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1}$ Para $\zeta > 1$ |
| Equação de resposta a um degrau | $y(t) = K \cdot M_{step}$ $\cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ - e^{-\zeta t / \tau} \left[\cosh \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right. \\ \left. \cdot \operatorname{senh} \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t \right) \right] \end{array} \right\}$ Para $\zeta = 1$ $y(t) = K \cdot M_{step} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \cdot e^{-t/\tau} \right]$ Para $0 \leq \zeta < 1$ $y(t) = K \cdot M_{step} \left\{ 1 - e^{-\zeta t / \tau} \right. \\ \left. \cdot \left[\cos \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t \right) \right] \right\}$ |

Fonte: Adaptado de SEBORG, EDGAR E MELLICHAMP, 2003.

Outro critério amplamente utilizado na estimativa de parâmetros de funções de transferência é minimizar a soma quadrática dos resíduos (SQR), **Equação 2.8.**

$$\min_{K, \tau, \theta, \zeta} SQR = \min_{K, \tau, \theta, \zeta} \sum (Y_i - y_i)^2 \quad (2.8)$$

Na qual, Y_i é a resposta obtida a partir de experimentos e y_i a resposta predita pelo modelo correspondente à experimental. Esse método é mais preciso que o método gráfico e pode ser utilizado para qualquer modelo, entretanto, esse ajuste exige um esforço computacional maior (SEBORG, EDGAR, MELLICHAMP, 2003).

2.6 SENsoRES DE UMIDADE

Modernamente, existem vários métodos de realizar a medição da umidade, sendo que cada um possui características e aplicações específicas. Os parâmetros mais importantes e que devem ser considerados na escolha de um sistema de medição de umidade, são: (i)- precisão, (ii)- tempo de leitura e (iii)- custo do conjunto sensor/transmissor (**CARVALHO, 2016**).

Os métodos para realizar a medição da umidade podem ser classificados em duas categorias, os diretos ou indiretos. O método indireto consiste em analisar algum parâmetro físico do material cuja umidade se deseja medir, tais como resistência elétrica, capacidade, pressão etc., que são alterados conforme o teor de umidade varia. Por sua vez, o método direto está baseado na retirada de toda a água contida na amostra, determinando assim o seu valor.

Os métodos indiretos apresentam maior dificuldade de implantação, apesar de serem práticos, rápidos e possibilitem uma contínua repetição das medições. Contudo, a margem de erro das leituras ainda representa um desafio. Os sensores mais utilizados são os baseados na capacidade elétrica e na resistência elétrica (**CARVALHO, 2016**).

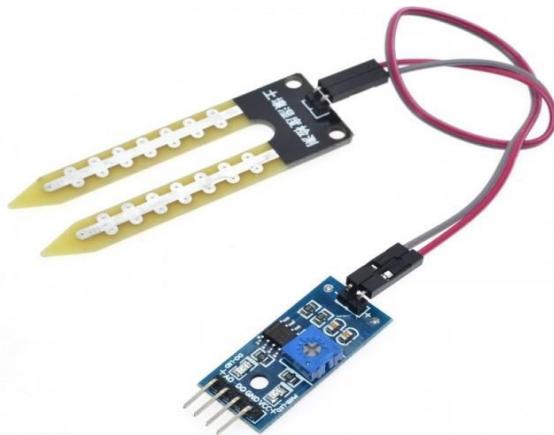
2.6.1 Sensor de Umidade Resistivo

O sensor de umidade resistivo utiliza o método dos blocos de resistência elétrica e funciona monitorando da variação de resistência elétrica em dois eletrodos posicionados no solo. A resistência elétrica é inversamente proporcional a umidade de água, consequentemente a concentração da água diminui a resistência elétrica do sensor (**SILVEIRA; COSTA; MELLO, 2019**).

As vantagens proporcionadas pelo sensor são o baixo custo de aquisição, a simples operação e a altas disponibilidades no mercado, porém não possui uma alta precisão nas leituras e é altamente corroído. Para funcionar de maneira adequada é necessário estar totalmente introduzido no meio cuja umidade se deseja medir para obter melhores resultados (**CARVALHO, 2016**).

O sensor mais comumente encontrado no mercado brasileiro é o modelo FC-28, fabricado pela empresa Shenzhen Guangfasheng Technology. O sensor resistivo de umidade dispõe de uma sonda de detecção de umidade por contato direto e um módulo para comunicação com o microcontrolador com duas opções de comunicação, a digital e a analógica. A separação das sondas de detecção do módulo evita o seu desgaste, pois não possui proteção contra água (**SILVEIRA; COSTA; MELLO, 2019**). Na **Figura 2.11** é apresentado o sensor em questão.

Figura 2.11 - Sensor resistivo de umidade.



Fonte: Adaptado de SILVEIRA; COSTA; MELLO (2019).

2.6.2 Sensor de Umidade Capacitivo

Os sensores capacitivos realizam as medições pelo método de capacitância elétrica. A atuação do sensor é realizada a partir da medição da constante da dielétrica do meio cuja umidade se deseja medir pelo tempo decorrido ao emitir um pulso eletromagnético, tal qual é gerado pelas hastes de metal instaladas no solo. Desta maneira, o tempo é calculado de modo proporcional à constante dielétrica do solo e a variação causada pelo volume da água contida no solo (GOMES, 2016; FERREIRA, 2017).

As vantagens proporcionadas pelo sensor capacitivo são melhor precisão e velocidade em comparação com o sensor resistivo. O sensor mais usado é o modelo 9SSA7, composto por um módulo de comunicação soldado à sonda de detecção. A sua característica construtiva minimiza o desgaste por corrosão causada pelo contato direto com o meio cuja umidade se deseja medir (GOMES, 2016; FERREIRA, 2017). Na **Figura 2.12** é apresentado esse modelo de sensor.

Figura 2.12 - Sensor capacitivo de umidade.



Fonte: Adaptado de SILVEIRA; COSTA; MELLO (2019).

2.6.3 Sensores de umidade industriais

Na indústria, geralmente os sensores de umidade são utilizados no controle de umidade na purificação química de gases, em secadores e fornos, e também no processamento de alimentos, papéis e têxteis (**CHEN, LU, 2005**).

A maior parte dos sensores comercialmente disponíveis é baseada em óxidos metálicos, alumina e cerâmicas. Dependendo do tipo de material utilizado esses sensores podem ser caros e/ou requererem alto custo de manutenção (**BAI, SHI, 2007**).

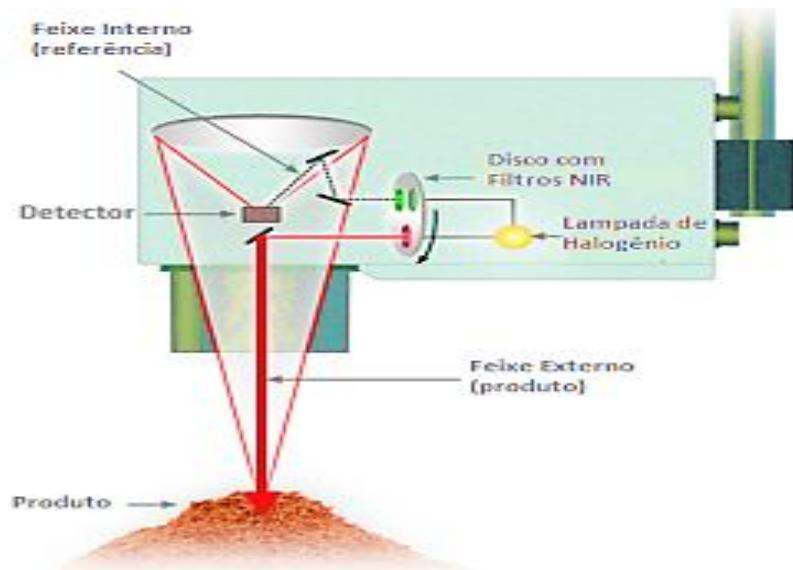
Uma tecnologia recente, que vem sendo largamente utilizada é a medição por infravermelho próximo (*Near Infrared – NIR*), que apesar de seu elevado custo, possui alta precisão e a vantagem de realizar medição sem contato com a amostra. Nesse tipo de equipamento, um feixe de luz de comprimento de onda específico é parcialmente absorvido pela água contida no produto e refletido de forma inversamente proporcional (**PROCESS SENSORS, 2013**).

A energia resultante desse processo óptico é coletada por um detector de alta precisão e quantificada eletronicamente para ser convertida em leitura percentual de umidade, como é mostrado na **Figura 2.13**.

Paralelos comprimentos de energia são sincronizados e combinados no sensor para que esta técnica não seja afetada por variações na composição do material que está sendo medido. As ligações comuns são OH (1.940 e 1.420 nm) em água, CH (2.340 nm) em orgânicos e óleos e NH em proteínas (**PROCESS SENSORS, 2013**).

A quantidade do constituinte a ser medido é proporcional ao nível de absorbância nesses comprimentos de onda específicos, como é mostrado na **Figura 2.13**.

Figura 2.13 - Funcionamento de um sensor de umidade NIR.



Fonte: Adaptado de PROCESS SENSORS (2013).

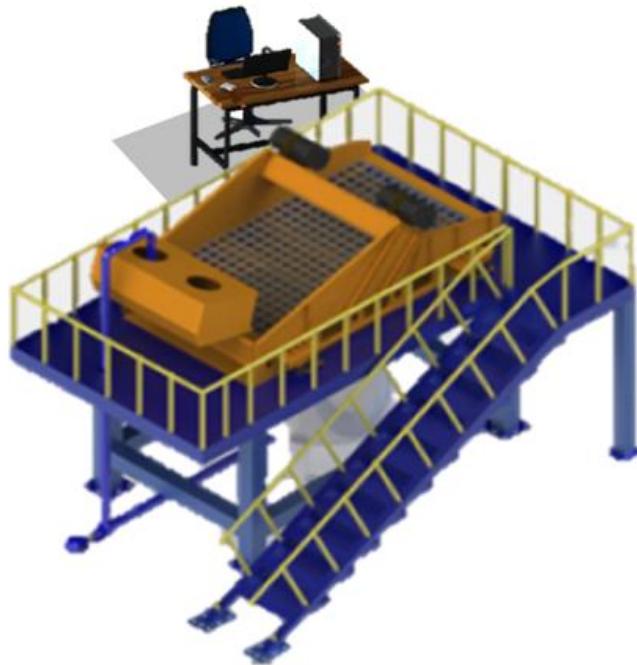
3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho fez uso de facilidade experimental existente no Laboratório de Separação da Faculdade de Engenharia Química que é apresentada no subitem 3.1. Adicionalmente foram utilizados um notebook com processador Intel® Core™ i5-82U, de 1.60 GHz a 1.80 GHz, sistema operacional de 64 bits e 8 GB de memória RAM. A simulações computacionais foram realizadas no aplicativo SCILAB.

3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados na unidade experimental esquematizada pela **Figura 3.1**, localizada no Laboratório de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, onde foi projetada e construída uma estrutura de sustentação em aço carbono com 3 m de altura e piso com área de 15 m², para a operação.

Figura 3.1 - Ilustração da unidade experimental utilizada.



Fonte: Autor (2025).

Na parte superior da unidade experimental está montada a peneira vibratória *Mongoose pro Shaker* – cujo modelo é mostrado na **Figura 3.2** – com área de peneiramento de 2,73 m², equipada com dois motores vibratórios de 2,5 CV cada um, configurados para funcionar com rotação em sentidos opostos entre si, a 1800 rpm. A peneira vibratória pode operar em duas condições de vibração, sendo uma de menor intensidade (normal) que atinge 6,5 g e outra, com

maior intensidade (*capacity*), que atinge até 7,5 g, de acordo com as informações disponibilizadas pelo fabricante.

Na parte inferior, encontra-se um tanque de mistura, com capacidade de 3.000 litros e uma bomba de lama, modelo Weir 4/3C - AH, equipada com motor WEG de 15 CV.

Para a realização dos experimentos, foi preparada uma suspensão sólido-líquido formada por areia, água e argila espessante. A concentração volumétrica de sólidos da suspensão foi de 2%. Para isso, foram utilizados 44 kg de areia seca (densidade de 1.450 kg/m³), 1,5 m³ de água e 44 kg de argila espessante.

A areia espessante, serve para emular a viscosidade típica de um fluido de perfuração. Foi necessário realizar a dispersão prévia dela na água, utilizando um misturador adequado. O preparo da parte líquida da suspensão foi feito 24 horas antes da realização dos experimentos, tempo necessário para a hidratação completa do polímero. Na **Figura 3.3** pode-se notar o aspecto da solução formada.

Figura 3.2 - Peneira vibratória Mongoose pro Shaker.



Fonte: MI SWACO (2017).

Figura 3.3 - Aspecto da solução formada.



Fonte: Autor (2025).

3.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS NA FACILIDADE EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados com a peneira sendo operada no modo manual, utilizando como variável excitadora do processo o valor da rotação imposta aos motores vibratórios e medindo – de maneira contínua – o teor de umidade residual do sólido retido por meio da amostragem em um dispositivo amostrador desenvolvido especialmente para esta finalidade.

A amplitude da variação da rotação aplicada aos motores vibratórios foi ajustada entre 1.200 RPM e 1.800 RPM, de modo a respeitar os limites operacionais do equipamento em escala industrial e garantir a segurança do processo. A variação da rotação se deu de maneira binária e com intervalos de duração variável, de modo a permitir a caracterização da função de transferência que representasse a dinâmica do sistema da maneira mais completa possível.

Os resultados experimentais observados foram coletados e analisados de modo a identificar – com base nas curvas de reação do processo – a ordem da equação diferencial representativa do comportamento temporal do teor de umidade residual em resposta à excitação aplicada.

3.3. MODELAMENTO MATEMÁTICO APLICADO

A identificação dos modelos e de seus parâmetros seguiu a metodologia proposta por **Aguirre (2007)** e por **Seborg, Edgar e Mellichamp (2003)**, já citadas no Capítulo 2 deste trabalho, que é baseada em modelos de primeira ordem com tempo morto (*First Order Plus Dead Time*, em inglês).

Este procedimento de identificação de modelos matemáticos é bastante robusto e serve muito bem para a finalidade futura de controlar o processo em modo automático. O principal fator limitante deste método reside no fato de que os modelos identificados são válidos dentro dos limites considerados na curva de reação do processo, apresentando restrições no que tange à extrapolação da faixa de excitação do processo.

Com base nos modelos identificados foi ajustado um modelo global para representar o comportamento do teor de umidade dos sólidos retidos, válido para a condição de operação estudada. Importante destacar que a condição de operação estudada cobre praticamente todo o intervalo de variação tipicamente encontrada para o funcionamento da peneira vibratória em escala industrial.

O modelo global foi empregado para o estudo da sintonia do controlador de umidade, sendo este estudo realizado de maneira teórica, via simulação computacional. A implementação do controlador no equipamento não foi contemplada neste trabalho.

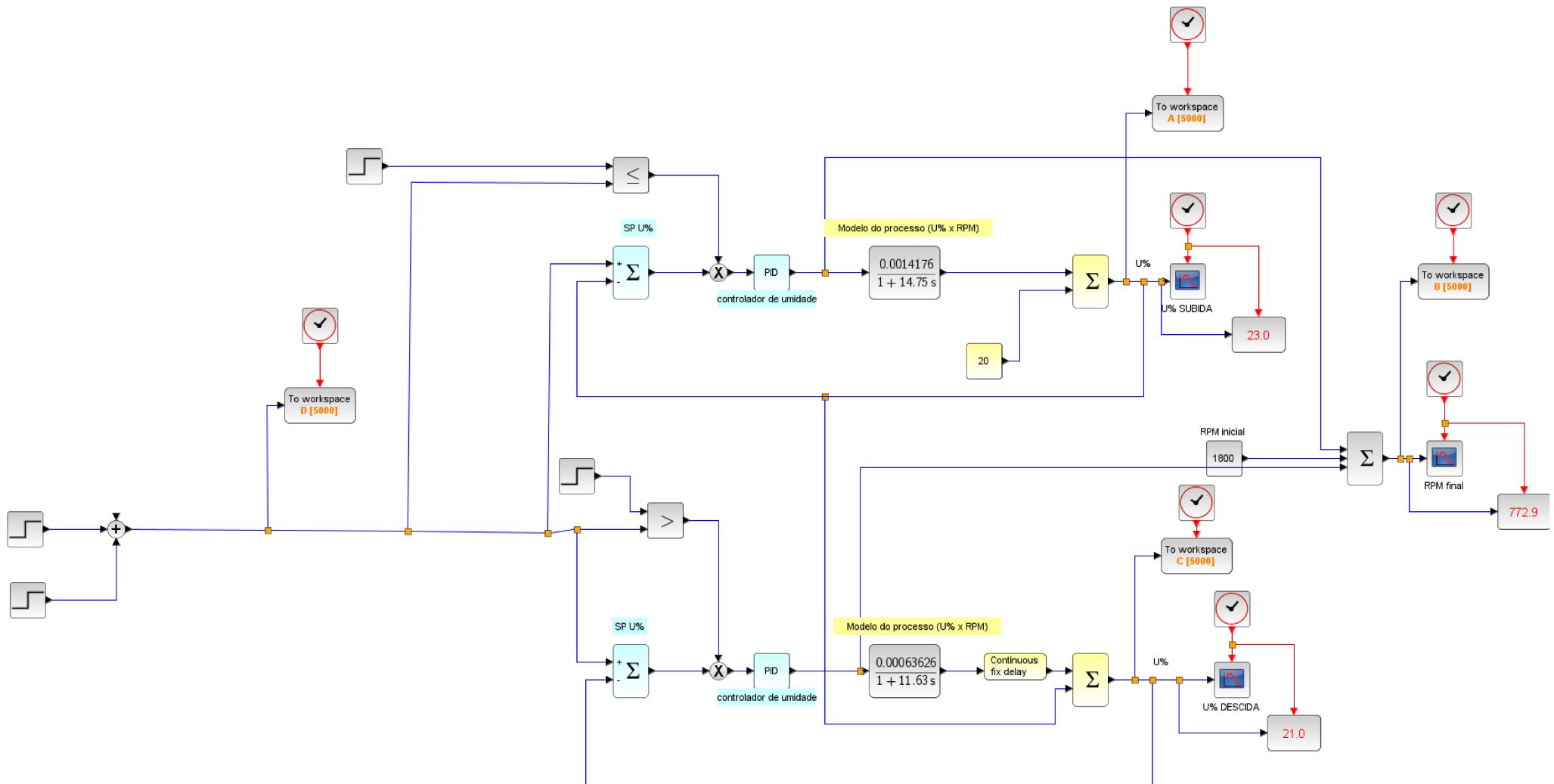
3.4. SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE UMIDADE

A fim de averiguar o comportamento dinâmico da rotação dos motores vibratórios e da umidade dos sólidos retidos foi desenvolvido o diagrama de simulação no ambiente *Xcos* do

software Scilab apresentado na **Figura 3.4**. Nele, a variável de entrada é a variação do tipo degrau imposta ao *set point* da umidade. No diagrama de simulação foi considerado o emprego de controlador adaptativo, capaz de atuar de maneira diferente em resposta à perturbação de aumento ou de diminuição do valor do *set point*.

A representação do controlador adaptativo no diagrama de simulação foi realizada por meio do emprego de dois controladores por realimentação do tipo Proporcional e Integral – com valores dos parâmetros de sintonia distintos – acoplados a duas funções de transferência diferentes que relacionam o comportamento da umidade com a rotação dos motores vibratórios, sendo uma para o aumento e outra para a diminuição da rotação.

Figura 3.4 - Diagrama de simulação no Xcos.

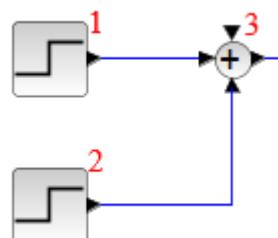


Fonte: Autor (2025).

Na sequência é apresentada uma explicação sobre o funcionamento da estratégia de controle do teor de umidade residual adotado neste trabalho.

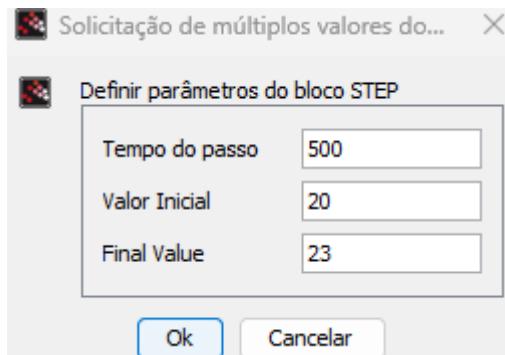
Na **Figura 3.5** é exibida a soma algébrica de dois sinais do tipo degrau, cujas transições são realizadas em tempos distintos e com amplitudes e direções diferentes. O bloco funcional identificado pelo **número 1** se trata de uma variação na umidade, que se inicia no valor de 20% e no instante de tempo igual a 500 s aumenta para 23%. Por sua vez, o bloco funcional identificado pelo **número 2** tem-se valor inicial igual a 0% e sofre um decréscimo de 2% no seu valor no instante de tempo igual a 3000 s. Ambos os sinais produzidos pelos blocos funcionais 1 e 2 são somados algebricamente no bloco funcional identificado pelo **número 3**, produzindo como resultado um sinal que inicialmente está em 20%, é elevado até 23% no instante de tempo igual a 500 s e, por fim, decai para 21% no instante de tempo igual a 3000 s. Ao selecionar o bloco *STEP* com o botão direito do *mouse* e escolher a opção <*Parâmetros do bloco...*> é possível definir o instante de tempo em que o degrau ocorre, seu valor inicial e final, como apresentado na **Figura 3.6**. Vale ressaltar que é possível definir os parâmetros de todos os blocos dessa malha, uma vez que o mesmo processo (clicar com o botão direito do *mouse* e escolher a opção <*Parâmetros do bloco...*>) pode ser replicado para eles. Será aberta uma caixa de diálogo após a ação, especificando os parâmetros característicos de cada bloco que devem ser preenchidos.

Figura 3.5 - Variação do set point da umidade no diagrama de simulação.



Fonte: Autor (2025).

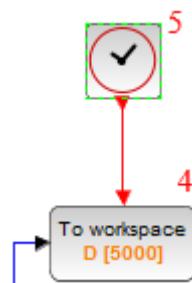
Figura 3.6 - Definição dos parâmetros referentes aos blocos tipo degrau.



Fonte: Autor (2025).

Adiante, na **Figura 3.7** são apresentados os blocos funcionais responsáveis por realizar a exportação dos resultados da simulação para a área de trabalho do SCILAB, identificados pelos **números 4 e 5**, sendo este último o responsável por controlar o período de aquisição. O intervalo entre cada aquisição foi definido de 1 em 1 segundo, iniciando-se no instante de tempo igual à 1 s, para que a simulação represente de maneira adequada o sistema em estudo. Esse conjunto aparece também na saída da umidade em ambas ramificações, superior e inferior, da malha de controle e na saída do somatório das rotações do motor, como pode ser visualizado na **Figura 3.4**. Os valores exportados são armazenados em um arquivo *csv* que será lido por um código feito em *Python* para que as comparações gráficas sejam melhor trabalhadas.

Figura 3.7 - Aquisição dos dados durante o tempo de simulação.

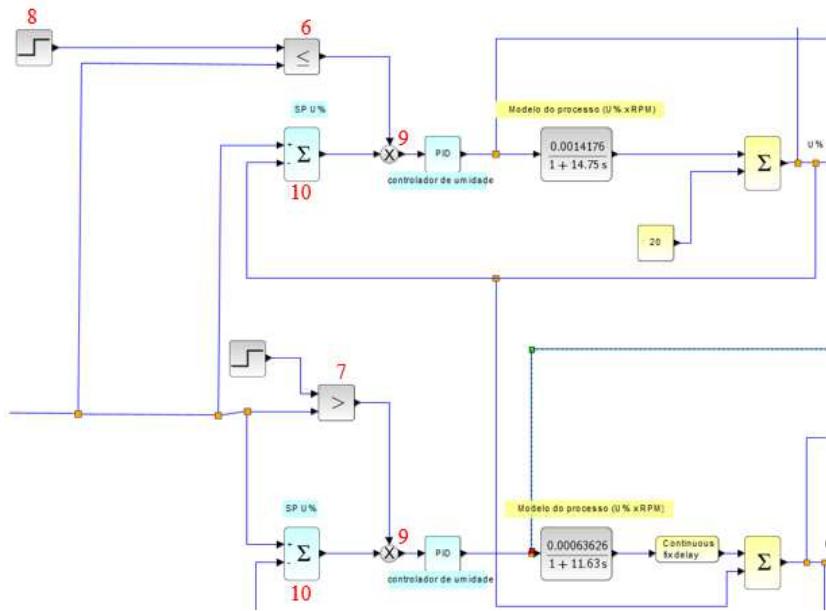


Fonte: Autor (2025).

Na **Figura 3.8** o sinal proveniente do bloco funcional **número 3** toma quatro caminhos distintos, sendo dois deles conectados com blocos funcionais comparadores que executam a comparação do sinal proveniente do bloco funcional **número 3** com a variação do primeiro degrau (bloco funcional **número 1**). O bloco funcional de **número 6** executa a função de **comparador do tipo menor ou igual** ao passo que o bloco funcional de **número 7** executa a

função de **comparador do tipo maior**. O bloco funcional de **número 8** – bloco degrau – é utilizado para comparar a variação do valor de umidade no diagrama de simulação, que é onde *set point* da umidade chega antes do próximo degrau ser executado na simulação. A configuração de cada bloco comparador de sinal se baseia na escolha da opção <RELATIONLOP>, a qual usa o valor igual a 3 para a condição menor ou igual e o valor igual a 4 para a condição de maior. Importante destacar que o sinal de saída dos blocos comparadores será sempre nulo, para a condição de comparação falsa, e igual a 1, para a condição de comparação verdadeira. Desse modo, usando o bloco funcional multiplicação (**número 9**) e multiplicando o sinal de saída de cada bloco comparador pelo sinal de saída do bloco somatório (**número 10**) é possível anular o efeito do ramal superior ou do ramal inferior no diagrama de simulação apresentado na **Figura 3.4**. Isso se deve ao fato de que as funções de transferência que relacionam a umidade e a rotação do motor no cenário de aumento e de diminuição do sinal de erro enviado aos controladores são diferentes, ou seja, quando o sinal do *set point* aumenta o ramal inferior é anulado, pois o bloco **número 8** não possui valores maior que esse sinal nesse intervalo de tempo. Isso é necessário para que não haja interferência entre a dinâmica dos dois ramais. Por fim, os outros dois caminhos levam aos blocos funcionais somatórios (**número 10**) que gera um sinal resultado da diferença entre o valor do *set point* e o valor da variável controlada (saída do sistema).

Figura 3.8 - Ramificação do sinal de set point da umidade.

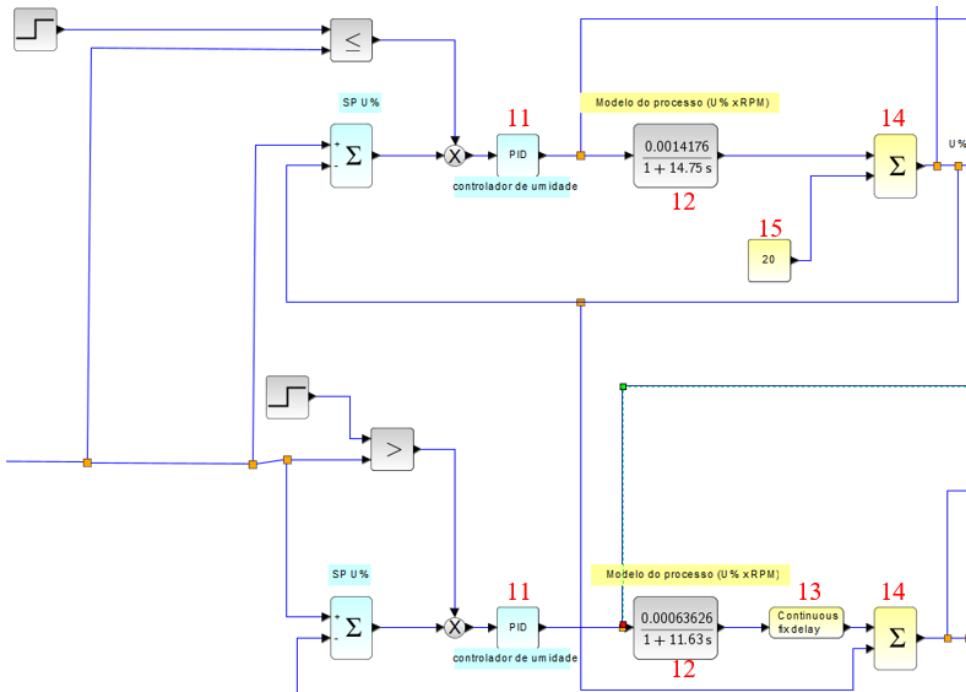


Fonte: Autor (2025).

Prosseguindo, na **Figura 3.9** é exibido o bloco que define o controlador (**número 11**), cujos valores dos parâmetros de sintonia são inseridos como apresentado na **Figura 3.10**. A função de transferência do controlador de umidade é apresentada na **Equação 3.1**, que tem os valores dos parâmetros de sintonia definidos de acordo com as **Equações 3.1a** até **3.1c**.

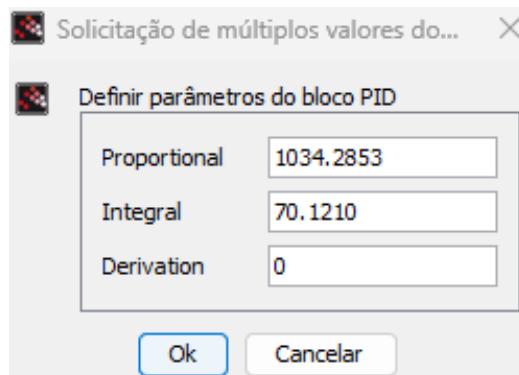
A função de transferência que representa o processo em estudo foi representada no diagrama de simulação por meio do bloco funcional *SISO* (**número 12**), no qual o numerador e o denominador da função transferência são os parâmetros identificados. Caso exista tempo morto no sistema dispõe-se do bloco *TIME_DELAY* (**número 13**), como acontece no ramal inferior da malha de controle. Nele deve-se definir o valor do tempo que o sistema demora a reagir, além do tamanho do *buffer*, um tipo de armazenamento de dados temporário geralmente escolhido como o tamanho do tempo de simulação. Após isso, o sinal resultante é enviado ao bloco funcional **somatório** (**número 14**) cuja funcionalidade nesse sistema é somá-lo a outro sinal de umidade constante igual a 20% proveniente do bloco funcional **constante** (**número 15**), que representa o valor da umidade no estado estacionário inicial. Ademais, no ramal superior há a ramificação da variável de saída do sistema que se liga ao bloco funcional **somatório** (**número 14**) presente no ramal inferior, pois, após a ação de controle para uma variação degrau positiva no *set point* a umidade atinge um novo estado estacionário, e é a partir desse que o controlador do ramal inferior começa a atuar.

Figura 3.9 - Estrutura interna do diagrama de blocos simulado.



Fonte: Autor (2025).

Figura 3.10 - Janela de definição de parâmetros para controlador PID.



Fonte: Autor (2025).

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (3.1)$$

$$\text{Proportional} = K_p \quad (3.1a)$$

$$\text{Integral} = \frac{K_p}{\tau_I} \quad (3.1b)$$

$$\text{Derivative} = K_p \cdot \tau_D \quad (3.1c)$$

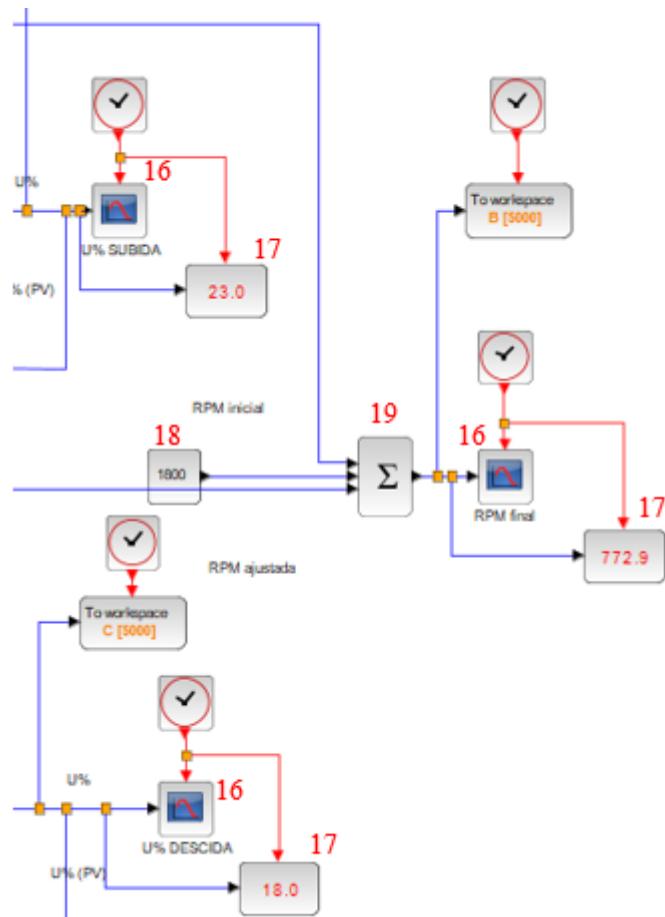
Na **Figura 3.11** é apresentada a parte do diagrama de simulação que representa o envio do sinal de saída do bloco funcional **somatório (número 14)** para o bloco **CSCOPE (número 16)**, cuja funcionalidade trata-se da visualização gráfica do comportamento dinâmico da umidade após a atuação do controlador. Este mesmo sinal de saída é, também, enviado ao bloco funcional **DISPLAY (número 17)** para a visualização do valor final da umidade. Nesta mesma figura é apresentada a parte do diagrama de simulação que representa o envio do sinal de saída do bloco funcional **somatório (número 19)** para o bloco **CSCOPE (número 16)**, cuja funcionalidade trata-se da visualização gráfica do comportamento dinâmico da rotação do motor após a atuação do controlador. Este mesmo sinal de saída é, também, enviado ao bloco funcional **DISPLAY (número 17)** para a visualização do valor final da rotação do motor. A configuração dos parâmetros do bloco funcional **CSCOPE** envolve a definição dos limites máximo e mínimo do eixo vertical do gráfico, o *buffer* correspondente à quantidade de valores a serem exibidos no gráfico, o tempo em que o gráfico é atualizado de acordo com a simulação. É importante destacar que são os sinais de entrada de cada um dos blocos funcionais **CSCOPE** anteriormente citados que são realimentados nos respectivos ramais do diagrama de simulação do sistema.

Oportuno reforçar que o bloco funcional de **número 17** age como um *display*, no qual são apresentados os valores que o sinal de saída assume instantaneamente de acordo com o tempo de simulação.

Por fim, o bloco funcional **somatório (número 19)** que realiza a soma dos sinais de saída provenientes de cada controlador (segundo o critério de ramificação anteriormente apresentado) com o sinal de rotação correspondente ao estado estacionário inicial ($1800\ rpm$) inserido no diagrama de simulação por meio do bloco funcional **CONSTANT (número 18)**.

O tempo de simulação foi definido com base nos experimentos realizados, sendo assumido o valor de 5000 segundos. Este valor é introduzido no *Scilab* no canto superior direito da tela na aba “Simulação”. Ao clicar na opção “Configurar” a caixa de diálogo é aberta, e nela é possível adaptar a simulação de acordo com o que for mais conveniente ao usuário.

Figura 3.11 - Visualização dos resultados das saídas do sistema no diagrama de blocos.



Fonte: Autor (2025).

3.5. CONTROLADOR DE UMIDADE PRORPOCIONAL INTEGRAL BASEADO NO MÉTODO IMC.

O *Internal Model Control* (IMC) visa garantir robustez e eficiência da resposta do processo após implementação da lei de controle, uma vez que a técnica “[...] emprega o inverso da parte de fase mínima do modelo e adiciona um filtro passa baixa.”, conforme descreve Coelho (2023). Sua abordagem se trata da conexão em paralelo entre o modelo da planta e o sistema real, desse modo, implementando um controlador cujo comportamento dinâmico seja inverso ao modelo (COELHO, 2023). O método apresenta uma série de vantagens, como facilidade de aplicação, o que possibilita uma grande faixa de aplicações práticas, redução do esforço de sintonia por tentativa e erro, já que elimina significativamente a necessidade de ajustes manuais demorados ou heuríticos (SEBORG, 2016).

As relações de sintonia para cada modelo estão apresentadas na Figura 3.5, e os valores típicos para τ_c (parâmetro de projeto), de acordo com situações práticas da indústria,

estão dispostos na **Figura 3.6**. De acordo com **Seborg (2016)**, uma escolha apropriada desse parâmetro implica um bom desempenho do controlador. À medida que o valor de τ_c tende a diminuir mais agressiva se torna a ação do controlador, e quando o inverso acontece o mesmo se torna mais robusto.

Figura 3.12 - Tabela de sintonia pelo método IMC.

| Case | Model | $K_c K$ | τ_I | τ_D |
|------|--|---|--|---|
| A | $\frac{K}{\tau s + 1}$ | $\frac{\tau}{\tau_c}$ | τ | — |
| B | $\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ | $\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$ | $\tau_1 + \tau_2$ | $\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$ |
| C | $\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$ | $\frac{2\zeta \tau}{\tau_c}$ | $2\zeta \tau$ | $\frac{\tau}{2\zeta}$ |
| D | $\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}, \beta > 0$ | $\frac{2\zeta \tau}{\tau_c + \beta}$ | $2\zeta \tau$ | $\frac{\tau}{2\zeta}$ |
| E | $\frac{K}{s}$ | $\frac{2}{\tau_c}$ | $2\tau_c$ | — |
| F | $\frac{K}{s(\tau s + 1)}$ | $\frac{2\tau_c + \tau}{\tau_c^2}$ | $2\tau_c + \tau$ | $\frac{2\tau_c \tau}{2\tau_c + \tau}$ |
| G | $\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$ | $\frac{\tau}{\tau_c + \theta}$ | τ | — |
| H | $\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$ | $\frac{\tau + \frac{\theta}{2}}{\tau_c + \frac{\theta}{2}}$ | $\tau + \frac{\theta}{2}$ | $\frac{\tau \theta}{2\tau + \theta}$ |
| I | $\frac{K(\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ | $\frac{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}{\tau_c + \theta}$ | $\tau_1 + \tau_2 - \tau_3$ | $\frac{\tau_1 \tau_2 - (\tau_1 + \tau_2 - \tau_3) \tau_3}{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}$ |
| J | $\frac{K(\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$ | $\frac{2\zeta \tau - \tau_3}{\tau_c + \theta}$ | $2\zeta \tau - \tau_3$ | $\frac{\tau^2 - (2\zeta \tau - \tau_3) \tau_3}{2\zeta \tau - \tau_3}$ |
| K | $\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ | $\frac{\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$ | $\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$ | $\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}$ |
| L | $\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$ | $\frac{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$ | $2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$ | $\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau^2}{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}$ |
| M | $\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$ | $\frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$ | $2\tau_c + \theta$ | — |
| N | $\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$ | $\frac{2\tau_c + \theta}{\left(\tau_c + \frac{\theta}{2}\right)^2}$ | $2\tau_c + \theta$ | $\frac{\tau_c \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2\tau_c + \theta}$ |
| O | $\frac{Ke^{-\theta s}}{s(\tau s + 1)}$ | $\frac{2\tau_c + \tau + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$ | $2\tau_c + \tau + \theta$ | $\frac{(2\tau_c + \theta) \tau}{2\tau_c + \tau + \theta}$ |

Fonte: SEBORG (2016).

Figura 3.13 - Valores típico de τ_c .

| Recommendations | Conditions | References |
|---|---|--|
| $\tau_c = \begin{cases} 0.5\theta \\ \theta \\ 1.5\theta \end{cases}$ | aggressive control default value smooth responses | Grimholt and Skogestad (2013) |
| $\tau_c = 3\theta$ | robust control | Åström and Hägglund (2006, p. 187); McMillan (2015, p. 29) |
| $\tau_c > \tau$ $\tau_c = 2-3\tau$ | default value robust control | Blevins et al. (2013, p. 102) |

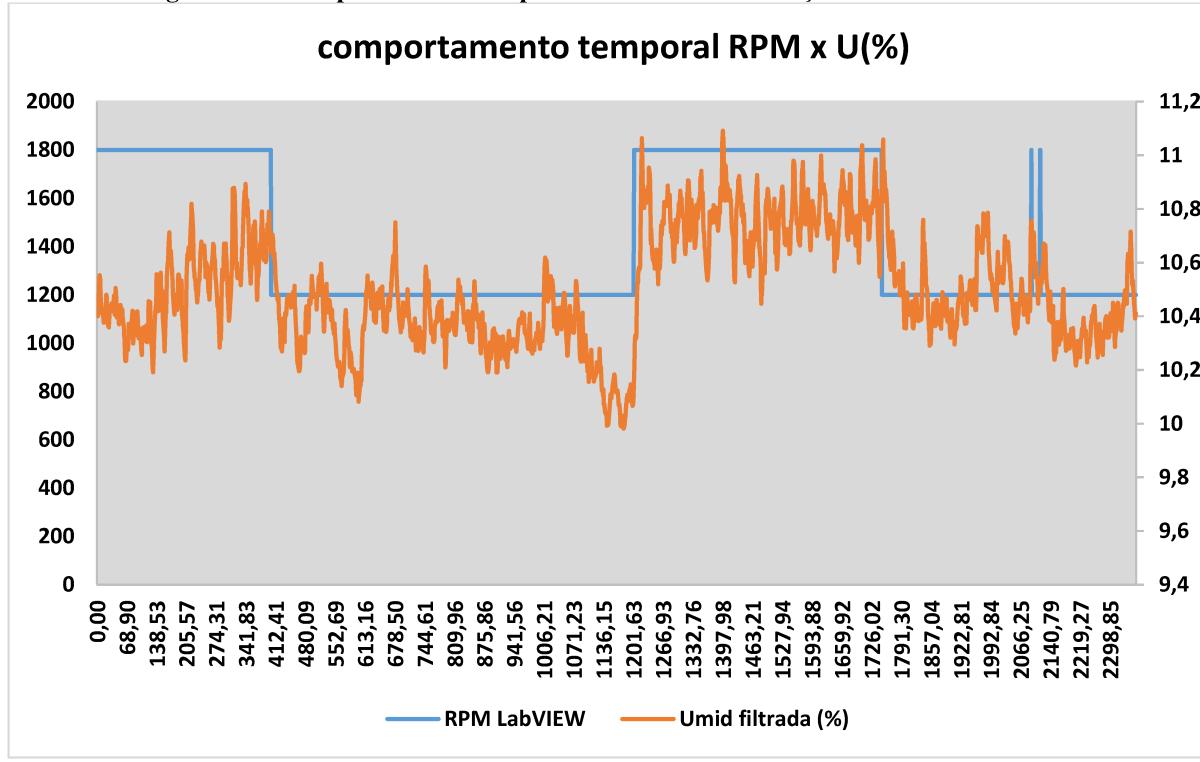
Fonte: SEBORG (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DA UMIDADE

Os sinais de excitação e os sinais de saída utilizados são apresentados na **Figura 4.1** na forma de etapas que emulam uma sequência binária pseudoaleatória (PRBS, em inglês). Devido às restrições de segurança do equipamento, as etapas foram realizadas em modo de operação manual nesta fase. Como exemplo, os motores vibratórios dos equipamentos foram excitados de 1200 rpm a 1800 rpm e de 1800 rpm a 1200 rpm , de maneira sequencial. Em média, a variação do teor de umidade dos sólidos retidos – em resposta à variação de RPM – variou entre 10% e 11%, aproximadamente. Importante destacar que excitações de menor amplitude geraram resultados que estavam contidos nos intervalos de variância da própria variável de processo em estudo. A duração das etapas foi de, no mínimo, 5 minutos, pois há transientes que demoraram esse tempo para reagir ao estímulo aplicado.

Figura 4.1 - Comportamento temporal dos sinais de excitação e os sinais de saída.



instalados na peneira. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento da rotação do motor foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis operacionais aos degraus aplicados na frequência dos motores vibratórios. Foi estudado o trecho inicial do transiente de variação do teor de umidade residual, correspondente à aceleração imposta ao movimento oscilatório aplicado sobre a tela de separação, pelo fato de permitir maior sensibilidade na análise da resposta do sistema (VARGAS et al., 2015).

A função de transferência de primeira ordem foi identificada com base na curva de reação do processo e é apresentada na **Equação 4.1**, que relaciona o comportamento do valor do teor de umidade residual em resposta ao degrau de aumento de amplitude igual a $+600 \text{ rpm}$ aplicado no valor da frequência de vibração dos motores vibratórios. Na **Equação 4.2** é apresentada a função de transferência do tipo *FOPTD* que relaciona o valor do teor de umidade residual com o degrau de diminuição de amplitude igual a -600 rpm aplicado no valor da frequência de vibração dos motores vibratórios.

$$G_1(s) = \frac{U\%}{\text{rpm}} = \frac{K_1}{(\tau_1 \cdot s + 1)} = \frac{0,0014176}{(14,75 \cdot s + 1)} \quad (4.1)$$

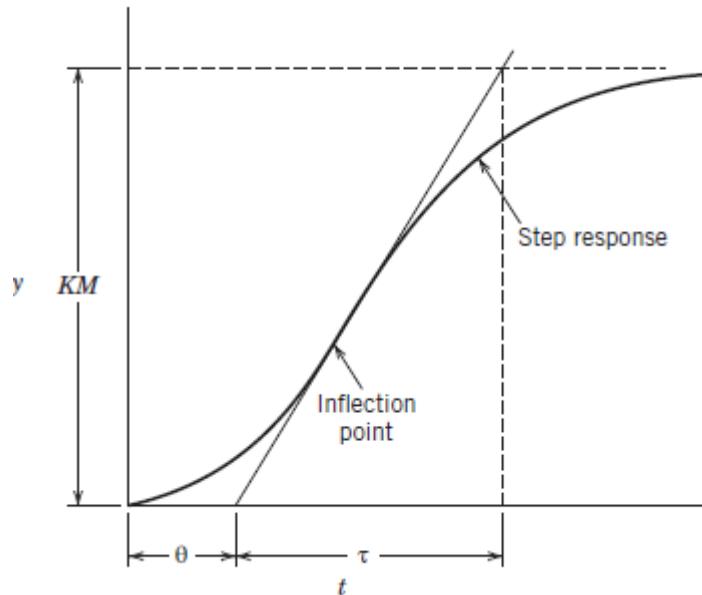
$$G_2(s) = \frac{U\%}{\text{rpm}} = \frac{K_2}{(\tau_2 \cdot s + 1)} \cdot e^{-\theta \cdot s} = \frac{0,00063626}{(11,63 \cdot s + 1)} \cdot e^{-5,03 \cdot s} \quad (4.2)$$

Os modelos identificados apresentam dinâmicas bastante diferentes entre si, como a presença de tempo morto, a constante de tempo e o ganho do processo, o que tende a dificultar a sintonia dos parâmetros do controlador de umidade residual do material sólido granular retido na tela de separação.

O ganho do processo (K) pode ser calculado pela relação entre a variação do teor de umidade e variação na rotação imposta pelos motores vibratórios, conforme mostrado na **Equação 4.3**. Além disso, o tempo morto (θ) é dado pela diferença entre o instante de tempo em que o degrau foi aplicado e o instante de tempo em que a resposta do sistema começa a reagir. Por fim, a constante de tempo (τ) pode ser encontrada sendo o valor correspondente de tempo, após a passagem do tempo morto, que o teor de umidade atinge o valor de 63,2% da sua condição estacionária. Na **Figura 4.2** é apresentado, de forma gráfica, como as constantes de processo são definidas de acordo com a resposta da planta.

$$K = \frac{U\%_{\infty} - U\%_0}{rpm_{\infty} - rpm_0} \quad (4.3)$$

Figura 4.2 - Definição gráfica das constantes de processo.



Fonte: Seborg (2016).

4.3. MODELOS DOS CONTROLADORES PI

Foram sintonizados controladores para diferentes τ_c , afim de avaliar o comportamento da dinâmica do sistema sob a influência de parâmetros distintos de controle. As relações para cálculo desses são os casos A e G, obtidas da **Figura 3.5**. Na **Tabela 4.1** estão dispostos os distintos modelos de controladores para cada planta.

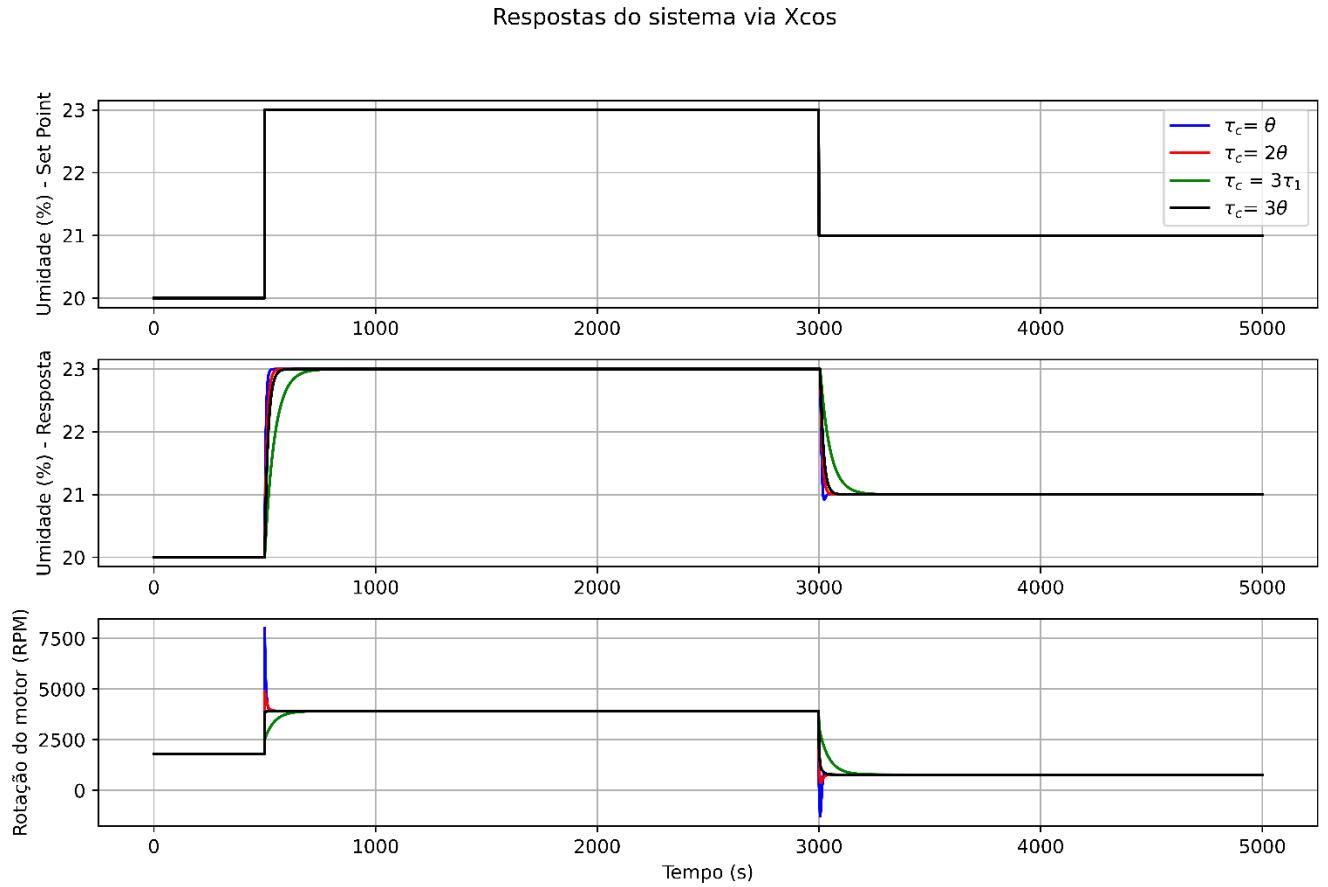
Tabela 0.1 - Controladores PI sintonizados pelo método IMC.

| τ_c | $G_1(s)$ | $G_2(s)$ |
|------------------|---|---|
| θ | $C_{IMC1_{G1}}(s) = 2068,5705 \left(1 + \frac{1}{14,75 \cdot s}\right)$ | $C_{IMC1_{G2}}(s) = 1816,9673 \left(1 + \frac{1}{11,63 \cdot s}\right)$ |
| $2 \cdot \theta$ | $C_{IMC2_{G1}}(s) = 1034,2853 \left(1 + \frac{1}{14,75 \cdot s}\right)$ | $C_{IMC2_{G2}}(s) = 1211,3115 \left(1 + \frac{1}{11,63 \cdot s}\right)$ |
| $3 \cdot \theta$ | $C_{IMC3_{G1}}(s) = 689,5235 \left(1 + \frac{1}{14,75 \cdot s}\right)$ | $C_{IMC3_{G2}}(s) = 908,4837 \left(1 + \frac{1}{11,63 \cdot s}\right)$ |
| $3 \cdot \tau_1$ | $C_{IMC4_{G1}}(s) = 235,1392 \left(1 + \frac{1}{14,75 \cdot s}\right)$ | $C_{IMC4_{G2}}(s) = 370,9150 \left(1 + \frac{1}{11,63 \cdot s}\right)$ |

Fonte: Autor (2025).

4.4. DINÂMICA DO SISTEMA

Na **Figura 4.3** está explicitada a resposta em função do tempo da umidade e da rotação do motor após a implementação dos controladores, variando-se o *set point* como degraus. Ao analisar o gráfico é percebido que durante o primeiro degrau o comportamento dinâmico da umidade é similar à uma resposta de primeira ordem, onde $C_{IMC4_{G1}}(s)$ provoca uma resposta mais lenta por ser um controlador mais robusto e $C_{IMC1_{G1}}(s)$ uma resposta mais rápida por ser mais agressivo devido a escolha de τ_c . Além disso, é identificável a presença de picos na dinâmica da rotação do motor, que desaparecem à medida que o valor de τ_c cresce e acarreta em controladores mais conservadores. O pico em azul atinge um valor, aproximadamente, 2 vezes maior que o resultado que rotação do motor atinge no regime estacionário, enquanto aquele em vermelho alcança um valor 1,25 vezes maior que o mesmo.

Figura 4.3 - Comportamento dinâmico do sistema.

Fonte: Autor (2025).

Ademais, durante o segundo degrau a dinâmica da umidade possui um pequeno sobressinal (aproximadamente 8%) após implementação do controlador $C_{IMC1G_2}(s)$, e, da mesma forma que aconteceu com aumento umidade, ao fazer τ_c crescer a resposta torna-se mais próxima à resposta de um sistema de primeira ordem e mais lenta. Para a resposta da rotação dos motores, novamente são observados dois picos correspondentes aos controladores mais agressivos.

Na Tabela 4.2 estão dispostos os índices de erro encontrados para cada circunstância. Logo, os menores valores deles pertencem ao controlador mais agressivo, cujo $\tau_c = \theta$, mostrando-se muito eficiente no controle da umidade do sistema.

Tabela 0.1 - Índices de Erros do Sistema.

| τ_c | ITAE | ISE | IAE |
|----------------------------|-------------|------------|------------|
| θ | 78264,2981 | 65,8058 | 40,3421 |
| $2. \theta$ | 111290,8033 | 96,6249 | 63,7609 |
| $3. \theta$ | 149710,4860 | 128,5878 | 88,9060 |
| $3. \tau_1$ | 377435,3696 | 317,0907 | 234,7381 |

Fonte: Autor (2025).

Por fim, é importante ressaltar que, por se tratar de controladores PI não há erros em regime permanente na dinâmica do sistema.

5. CONCLUSÃO

Através de dados experimentais foi possível identificar as funções transferências que relacionam a rotação do motor da peneira em rpm com a umidade do resíduo sólido, uma vez que essas funções são diferentes caso a variação daquele seja positiva ou negativa. Desse modo, controladores PI foram sintonizados pelo método IMC afim de controlar a umidade e prever a influência deles na dinâmica da rotação do motor.

Os índices de erros mostraram que, para as circunstâncias analisadas, valores mais baixos de τ_c oferecem controladores com bom desempenho para o comportamento dinâmico da umidade, no entanto eles provocam picos na resposta temporal da rotação do motor até ela ser estabilizada. Isso pode levá-lo a sofrer um desgaste físico, dessa forma diminuindo sua vida útil, ou exceder sua capacidade de operação.

Em contrapartida, valores mais altos de τ_c deixam a dinâmica da umidade mais lenta e o comportamento em função do tempo da rotação do motor sem grandes variações do seu valor estacionário, ou seja, ele se estabiliza mais rápido e dentro do nível desejado de operação.

Desse modo, o controle ideal estaria próximo a $\tau_c = 3 \cdot \theta$, uma vez que não caracteriza uma resposta lenta demais para a dinâmica da umidade e não apresenta oscilações na dinâmica da rotação do motor.

REFERÊNCIAS

AADE. **Shale Shakers and Drilling Fluid Systems.** Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.

AGUIRRE, Luis Antônio. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME. **Drilling Fluid Processing Handbook,** Burlington, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2005.

BAI, H; SHI, G. **Gas sensors based on conducting polymers Sensors.** p. 267-307, 2007.

BARBOSA, V. P., **Avaliação separação sólido-líquido com o auxílio de técnicas de análise de imagem de fatores operacionais em processo de peneiramento vibratório.** 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2018.

BOBO, Roy A.; HOCH, R. S. **Mechanical Treatment of Weighted Drilling Muds.** Journal of Petroleum Technology, v. 6, p. 39-42, 1954.

CAENN, RYENA; CHILLINGARB, GEORGE V. **Drilling Fluids: State of the Art.** Journal of Petroleum Science and Engineering. USA: a Westport technology Center; b Civil engineering department, University of Southern California, 1995.

CARVALHO, M. S. de., **Sensor para monitoramento de umidade do solo utilizando energia solar.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Software, Quixadá, 2016.

CHARLES, M.; SAYLE, S. **Offshore Drill Cuttings Treatment Technology Evaluation.** In: SPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEALTH, SAFETY AND ENVIRONMENT IN OIL AND GAS EXPLORATION AND PRODUCTION, 2010, Rio de Janeiro. Society of Petroleum Engineers, 2010.

CHEN, Z; LU, C. **Humidity sensors: A review of materials and mechanisms.** Sensors Letters. [s.i.], p. 274-295. jul. 2005.

COELHO, ANTONIO AUGUSTO RODRIGUES. **Simulação e sintonia do controle PI para sistemas FOPDT.** Latin American Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 592–608, 2023. Disponível em: <https://ojs.latinamericanpublicacoes.com.br/ojs/index.php/jdev/article/view/1387>. Acesso em: 23 abr. 2025. DOI: 10.46814/lajdv5n2-010.

DORRY, K. E; **Effect of Constant-G Control on Shale Shaker Performance.** In: AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS FLUIDS CONFERENCE AND EXHIBITION, 2010, Houston. American Association of Drilling Engineers, Houston: [s.n.], 2010.

DORRY, K. El; DUFILHO, B. **Automation Improves Shaker Performance.** In: IADC/SPE DRILLING CONFERENCE AND EXHIBITION, 2012, San Diego. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego: [s.n.], 2012.

EINARSSON, Marvin Ingí et al. **Nordic Centre of Excellence Network in Fishmeal and Fish Oil.** Reykjavik: Matís, 2019. (Matís rapport, 06-19). Disponível em: <https://nofima.com/publication/1771431>. Acesso em: 9 maio 2025.

ENDRESS, A. **Solids control automation on the horizon with autonomous shaker, ultrasonic sensor in development.** Desenvolvida por Drilling Contractor, 2015. Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/solids-control-automation-on-the-horizon-with-autonomous-shaker-ultrasonic-sensor-in-development-36935>>. Acesso em: 08 dez. 2020.

FERREIRA, JÉSSIMON. **Sistemas capacitivos aplicados na avaliação da umidade relativa de madeira de pinus.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2903>. Acesso em: 9 maio 2025.

FREITAS, M. S., **Avaliação do comportamento dinâmico do peneiramento vibratório utilizando modelos identificados.** 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2017.

GOMES, ISABELLE CORDOVA. **Desenvolvimento de um sensor digital de umidade do solo e unidade remota de monitoramento utilizando comunicação sem fio.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14642>. Acesso em: 9 maio 2025.

GUERREIRO, F. S. **Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, eficiência granulométrica e diâmetro de corte.** 2015. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

GUERREIRO, F. S; GEDRAITE, R; ATAÍDE, C. H; **Residual moisture content and separation efficiency optimization in pilot-scale vibrating screen.** Powder Technology, v. 287, p. 301-307, 2016.

HANGOS, K; CAMERON, I. **ProcessModelling and Model Analysis.** Londres: Academic Press, 2001.

HOBROCK, L. L., **A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids,** Journal of Petroleum Technology, v. 32, 1980.

LOBATO, F. S., OLIVEIRA-LOPES, L. C., GEDRAITE, R., NEIRO, S. M. S., MURATA, V.

Identificação de modelos para unidades de recuperação do fluido de perfuração. In: IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, Foz do Iguaçu - PR, 2011.

M-I SWACO. **Mongoose Pro Shaker brochure**, 2017. Disponível em: <<https://www.slb.com/-/media/files/mi/brochure/mongoose-pro-shaker-brochure.ashx>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. [S. l.]: Pearson Prentice Hall, 2010. 822 p. ISBN 978-85-4301-375-6.

PEREIRA, MARINA SEIXAS. **Aplicação de secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração**. 2013. 122f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

PROCESS SENSORS. **Near Infrared Measurements – How Do They Work?**, 03 de dezembro de 2013. Disponível em: <<https://www.processsensors.com/whats-new/blog/near-infrared-measurements-how-do-they-work>>. Acesso em 07 jun. 2021.

RAJA, V. **Shale Shaker Model and Experimental Validation**. 292f. Tese (Doctor of Philosophy) – Chemical Engineering, University of Akron, Akron, 2012.

RONAES, E., VIK, S. E., TAUGBOL, K., SJAHOLM, A.; KAAGESON-LOE, N. **Remote real-time monitoring of particle size distribution in drilling fluids during drilling of a depleted HTHP reservoir**. Proceedings of SPE/IADC, pp. 1-11, Manama, Bahrain, 26- 28 October, 2009.

ROGERS, R. S. C.; BRAME, K. A. **An Analysis of the High-Frequency Screening of Fine Slurries**. Powder Technology, v. 42, p. 297-304, 1985.

SCOTT, E. L. **Automatic Shaker Control**. In: IADC/SPE DRILLING CONFERENCE, 2006, Miami. IADC/SPE Drilling Conference, Miami: [s.n.], 2006.

SEBORG, D. E; EDGAR, T. F; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control.** 2. ed. New Jersey: John Wiley, 2003.

SEBORG, DALE E. *ET AL.* **Process Dynamics and Control.** 4. ed. Austin: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 515 p. ISBN 9781119285915.

SILVEIRA, A. C. de M., COSTA, G. O., MELO, V. E. R. de,. **Resfar - Um sistema de automação agrícola baseado em IoT.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico de Nível Médio em Eletrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2019.

VARGAS, I. K. G.; BARBOSA, V. P.; SILVA, M. E. D.; SILVA, R. M. GEDRAITE, R. **Estudo experimental acerca da influência da vibração sobre o teor de umidade residual em material sólido granular utilizando protótipo de peneira vibratória.** XX Jornada em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de Janeiro: Interciênciia, 2001.

TR SOLIDS CONTROL. **Vertical Cutting Dryer.** 2021 – Disponível em: <<http://www.trsolidscontrol.com/vertical-cutting-dryer/>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 7. ed. [S.l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2006.