



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEOR DE UMIDADE
RESIDUAL DE SÓLIDOS RETIDOS EM PENEIRAMENTO
VIBRATÓRIO**

DÉBORA KUIAVA

Uberlândia – MG

2025



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



**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEOR DE UMIDADE
RESIDUAL DE SÓLIDOS RETIDOS EM PENEIRAMENTO
VIBRATÓRIO**

Autor: Débora Kuiava

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

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia – MG

2025

AGRADECIMENTOS

Mais uma página do livro da vida foi escrita. Foram muitos anos de esforço e dedicação, porém agora que esta etapa se finda, percebo que tudo valeu a pena.

Agradeço à Deus por me manter firme no meu propósito e por me dar a força de acordar com energia renovada a cada dia.

Aos meus pais, Expedito e Ivanei, por todo o suporte, aconselhamento e por me fazerem ser quem sou hoje, minha gratidão e admiração por vocês é imensurável.

À toda minha família, que mesmo de longe estiveram sempre me apoiando e torcendo pelo meu sucesso.

Aos meus amigos, por tornarem meus dias mais leves com sua presença e companheirismo. Em especial ao meu namorado Guilherme, que esteve comigo nos bons e maus momentos, me mostrando o que é o amor em toda a sua potência.

Aos docentes e mentores que estiveram em minha jornada, é com prazer que agradeço por todos os ensinamentos. Agradeço ao meu orientador, Professor Rubens Gedraite, pela confiança depositada em mim e por todo o auxílio no processo de construção deste trabalho.

"O conhecimento é o alimento da alma."
— Platão

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais componentes de uma unidade de controle de sólidos tradicional	4
Figura 2.2 - Peneira vibratória tradicional	5
Figura 2.3 - Representação de um Mud Cleaner utilizado no controle de sólidos durante a perfuração	5
Figura 2.4 - Centrífuga vertical.....	6
Figura 2.5 - Centrífuga horizontal.....	6
Figura 2.6 - Representação esquemática de um degaseificador a vácuo	7
Figura 2.7 - Tipos de movimentos vibratórios	8
Figura 2.8 - Formas de abertura de tela quadrada e retangular, simples e em camadas ..	9
Figura 2.9 - Esquema das regiões de piscina e de secagem de sólidos retidos	10
Figura 2.10 - Comparativo de vida útil dos equipamentos a depender do tipo de operação	12
Figura 2.11 - Destaque para sensor de vibração em peneira vibratória	13
Figura 2.12 - Fluxograma para representação de um modelo aplicado a um processo .	15
Figura 2.13 - Sensor capacitivo de umidade	20
Figura 2.14 - Sensor resistivo de umidade do modelo FC-28.....	20
Figura 2.15 - Esquematização de um sensor de umidade NIR	21
Figura 2.16 - Relação entre o nível de absorbância e o comprimento de onda para cada tipo de ligação química.....	22
Figura 3.1 - Unidade experimental utilizada.....	23
Figura 3.2 - Peneira vibratória do modelo Mongoose Pro Shaker	24
Figura 3.3 - Solução sólido-líquido utilizada.....	25
Figura 3.4 - Sensor piezoelectrônico modelo 646B00.....	25
Figura 3.5 - Placa de aquisição de dados modelo NI USB-6008	25
Figura 3.6 - Programação do aplicativo desenvolvido no LabView TM	25
Figura 3.7 - Programação do controlador desenvolvido no LabView TM	26
Figura 3.8 - Amostrador desenvolvido para medição contínua de umidade	28
Figura 4.1 - Comportamento temporal dos sinais de excitação e os sinais de saída	29
Figura 4.2 - Comportamento da umidade no 1º degrau de aumento de RPM nos 30 segundos iniciais.....	30
Figura 4.3 - Comportamento da umidade no 2º degrau de aumento de RPM nos 30 segundos iniciais.....	31

Figura 4.4 - Comportamento da umidade no 3º degrau de aumento de RPM nos 30 segundos iniciais.....	33
Figura 4.5 - Comportamento da umidade no 4º degrau de aumento de RPM nos 30 segundos iniciais.....	34
Figura 4.6 - Comportamento da umidade no 5º degrau de aumento de RPM nos 30 segundos iniciais.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Função de transferência de um sistema integrador	16
Tabela 2.2 - Função de transferência de primeira ordem	16
Tabela 2.3 - Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (<i>FOPDT</i>) ..	17
Tabela 2.4 - Função de transferência de segunda ordem	17
Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 1º degrau de aumento de RPM	31
Tabela 4.2 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 2º degrau de aumento de RPM	32
Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 3º aumento de RPM.....	34
Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 4º degrau de aumento de RPM	35
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 4º degrau de aumento de RPM	37
Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados	37

RESUMO

O processo de perfuração de um poço de petróleo consiste em diversos subprocessos, incluindo o controle de sólidos, que envolve a separação do cascalho do poço e do fluido de perfuração, o qual é injetado principalmente para lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração. Esse fluido deve ser reconhecido para ser reaproveitado; portanto, várias fases de separação são realizadas. A primeira dessas fases, a fase de peneiramento vibratório, pode ser a mais crucial, pois outros equipamentos de separação de materiais isolados só podem funcionar de maneira eficaz se essa fase for realizada de forma adequada. O objetivo deste trabalho foi avaliar como a umidade residual dos sólidos retidos se comporta em resposta à variação da rotação aplicada aos motores vibratórios. Foi utilizada uma suspensão sólido-líquido composta por água, areia e espessante (que tem densidade e reologia semelhantes a um fluido real de perfuração). Foi aplicada uma perturbação do tipo sequência binária pseudoaleatória (PRBS, em inglês). Para essa tarefa, os motores vibratórios da peneira foram excitados sequencialmente entre 1.200 e 1.800 RPM e entre 1.800 e 1.200 RPM. Em resposta às variações na RPM, a variação média no teor de umidade dos sólidos retidos variou de 17,5% a 22%. Foi possível determinar a sensibilidade da resposta do líquido residual nos sólidos retidos ao aumento da rotação do motor vibratório, comparando os valores de cada parâmetro com os modelos semiempíricos identificados. Nos cinco trechos analisados, os valores encontrados para o parâmetro K_P , que representa o ganho do processo, o parâmetro τ_P , que representa a constante de tempo do processo, e o parâmetro θ_P , que representa o tempo morto do processo, estavam bastante próximos, indicando certa previsibilidade do processo.

Palavras-chave: Fluido de perfuração, Peneiramento vibratório, Separação sólido-líquido, Força-g

ABSTRACT

The oil well drilling process consists of several subprocesses, including solids control, which involves the separation of the well cuttings and the drilling fluid, which is injected mainly to lubricate and cool the drill bit during drilling. This fluid must be recognized in order to be reused; therefore, several separation phases are performed. The first of these phases, the vibratory screening phase, may be the most crucial, since other isolated material separation equipment can only function effectively if this phase is performed properly. The objective of this work was to evaluate how the residual moisture of the retained solids behaves in response to the variation of the rotation applied to the vibratory motors. A solid-liquid suspension composed of water, sand and thickener (which has a density and rheology similar to a real drilling fluid) was used. A pseudorandom binary sequence (PRBS) type perturbation was applied. For this task, the vibrating motors of the screen were excited sequentially between 1,200 and 1,800 RPM and between 1,800 and 1,200 RPM. In response to the variations in RPM, the average variation in the moisture content of the retained solids ranged from 17.5% to 22%. It was possible to determine the sensitivity of the response of the residual liquid in the retained solids to the increase in the rotation of the vibrating motor, comparing the values of each parameter with the semiempirical models identified. In the five sections analyzed, the values found for the parameter K_P , which represents the process gain, the parameter τ_P , which represents the process constant time, and the parameter θ_P , which represents the process deadtime, were quite close.

Keywords: Drilling fluid, Vibratory screening, Solid-liquid separation, G-force

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS	7
RESUMO	8
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	3
2.1.1 Finalidades e Características.....	3
2.1.2 Classificação dos Fluidos de Perfuração	3
2.2 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	3
2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS	4
2.3.1 Peneiras Vibratórias.....	4
2.3.2 <i>Mud Cleaner</i>	5
2.3.3 Centrífugas Verticais (<i>Cuttings Dryers</i>).....	6
2.3.4 Centrífugas Horizontais (Decantadoras).....	6
2.3.5 Degaseificadores.....	7
2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO	7
2.4.1 Fundamentos e Aplicação.....	7
2.4.2 Modos de Vibração.....	8
2.4.3 Fatores Operacionais	9
2.4.4 Estratégias de Automação e Controle.....	11
2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROCESSOS E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	14
2.6 SENSORES DE UMIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	19
2.6.1 Princípios de Medição da Umidade	19
2.6.2 Sensor de Umidade Capacitivo.....	19
2.6.3 Sensor de Umidade Resistivo	20
2.6.4 Tecnologias Industriais Avançadas	21

2.6.5 Considerações para Seleção de Sensores.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 ESTRUTURA EXPERIMENTAL E PREPARO DA SUSPENSÃO	23
3.2 SISTEMA DE CONTROLE DA FORÇA-G	24
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS.....	26
3.4 TESTES DE MEDAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE RESIDUAL DO SÓLIDO ..	27
3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS SEMIEMPÍRICOS .	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DA UMIDADE	29
4.2 RELAÇÃO DA UMIDADE COM A ROTAÇÃO DOS MOTORES VIBRATÓRIOS	29
4.3 FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO PROCESSO	38
5. CONCLUSÃO.....	40
6. REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo envolve uma série de etapas interdependentes, dentre as quais o controle de sólidos exerce papel fundamental na manutenção da eficiência operacional, na integridade dos equipamentos e na sustentabilidade do processo. Este controle consiste, essencialmente, na separação do cascalho advindo da formação geológica e do fluido de perfuração que, por sua vez, é injetado no poço com a finalidade de lubrificar e resfriar a broca, estabilizar as paredes do poço e transportar os detritos gerados durante a perfuração.

Para possibilitar a reutilização do fluido de perfuração, torna-se necessária sua recuperação por meio de processos de separação sólido-líquido. Dentre os equipamentos tradicionalmente empregados em unidades de controle de sólidos, destacam-se as peneiras vibratórias, os hidrociclos (desarenadores e dessiltadores) e as centrífugas decantadoras (**LOBATO et al., 2011**). Dentre estes, a peneira vibratória representa a etapa inicial e frequentemente considerada a mais crítica do processo, uma vez que a eficácia dos dispositivos subsequentes depende diretamente de sua adequada operação.

Apesar de sua ampla aplicação, o desempenho das peneiras vibratórias é, em grande parte, avaliado empiricamente, sendo escassos os modelos matemáticos consolidados capazes de prever com precisão parâmetros operacionais relevantes, tais como eficiência de separação e umidade residual do material retido (**GUERREIRO; GEDRAITE; ATAÍDE, 2016**). A formulação de modelos fenomenológicos enfrenta desafios significativos, decorrentes da natureza multifatorial do processo, que envolve variáveis como tipo de tela, frequência e intensidade da vibração (fator-g), inclinação da superfície de peneiramento, distribuição granulométrica da alimentação, concentração de sólidos, bem como interações físico-químicas entre partículas e com a fase líquida (**VARGAS et al., 2015**).

Estudos recentes indicam que a integração entre variáveis operacionais, como a força-g e a medição da umidade no material retido, pode resultar em ganhos expressivos no desempenho do processo de separação (**FREITAS, 2017**). Nesse contexto, o desenvolvimento e a aplicação de modelos matemáticos semiempíricos emergem como ferramentas promissoras para a otimização da operação, permitindo a identificação de condições ótimas por meio da definição de funções objetivo que maximizem a eficiência de separação e minimizem a umidade dos sólidos retidos.

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da umidade residual nos sólidos retidos em peneiras vibratórias, considerando as principais variáveis operacionais que influenciam o processo, com ênfase no efeito da vibração da peneira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

2.1.1 Finalidades e Características

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo, um fluido é bombeado através da coluna de perfuração e retorna pela região anular até a superfície, exercendo papel fundamental na estabilidade e eficiência da operação (CHARLES; SAYLE, 2010). Entre suas funções estão: refrigerar e lubrificar a broca, manter os sólidos em suspensão, controlar a pressão da formação, prevenir corrosão e remover os fragmentos gerados pela broca (ASME, 2005).

Para que essas funções sejam cumpridas de maneira eficaz, o fluido deve apresentar propriedades específicas, como estabilidade química, compatibilidade com tratamentos físico-químicos, boa capacidade de bombeamento, baixo grau de corrosividade e abrasividade, viscosidade e densidade adequadas e custo compatível com a operação (THOMAS, 2001).

2.1.2 Classificação dos Fluidos de Perfuração

A classificação dos fluidos de perfuração baseia-se em seu componente principal. Os tipos mais comuns são os de base aquosa (WBFs), compostos por água com ou sem sais, e os de base não aquosa (NAFs), como emulsões invertidas. Também existem fluidos à base de ar, usados em condições muito específicas, como em formações de baixa pressão ou com grandes perdas de circulação (THOMAS, 2001; CAEM et al., 1995).

2.2 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

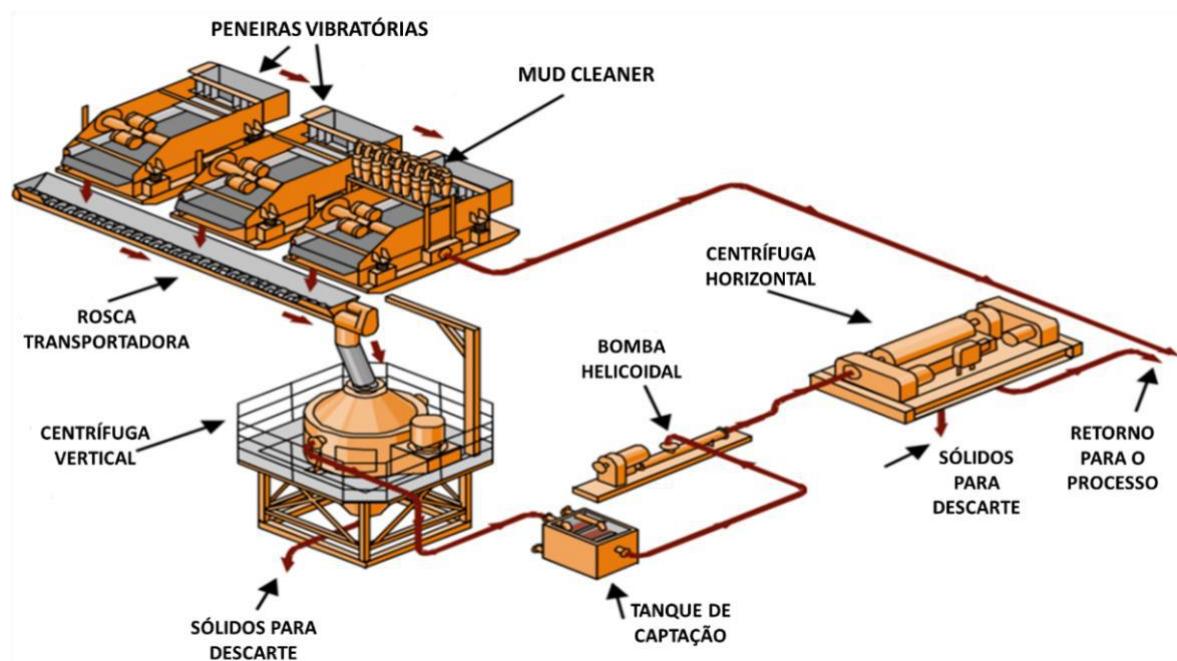
A perfuração de um poço consiste em romper formações rochosas com uma broca giratória acoplada a uma coluna de perfuração. Os detritos gerados (cascalhos) são removidos com o auxílio do fluido de perfuração. Ao atingir a profundidade planejada, a coluna é retirada, instalando-se uma coluna de revestimento e realizando-se a cimentação do anular. O processo se repete com colunas de menor diâmetro até a conclusão do poço (THOMAS, 2004).

O retorno do fluido à superfície requer seu recondicionamento para reutilização, o que implica a remoção dos sólidos presentes através de vários equipamentos de separação em série.

2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS

A unidade de controle de sólidos visa reaproveitar o fluido de perfuração e atender às exigências ambientais. Historicamente, sua importância foi percebida desde o século XIX, quando a decantação natural dos sólidos se mostrou viável para reuso do fluido (THOMAS, 2004). Atualmente, a legislação ambiental exige que os resíduos de perfuração sejam tratados adequadamente (PEREIRA, 2013). Na **Figura 2.1** são apresentados os principais componentes de uma unidade típica de controle de sólidos.

Figura 2.1 - Principais componentes de uma unidade de controle de sólidos típica

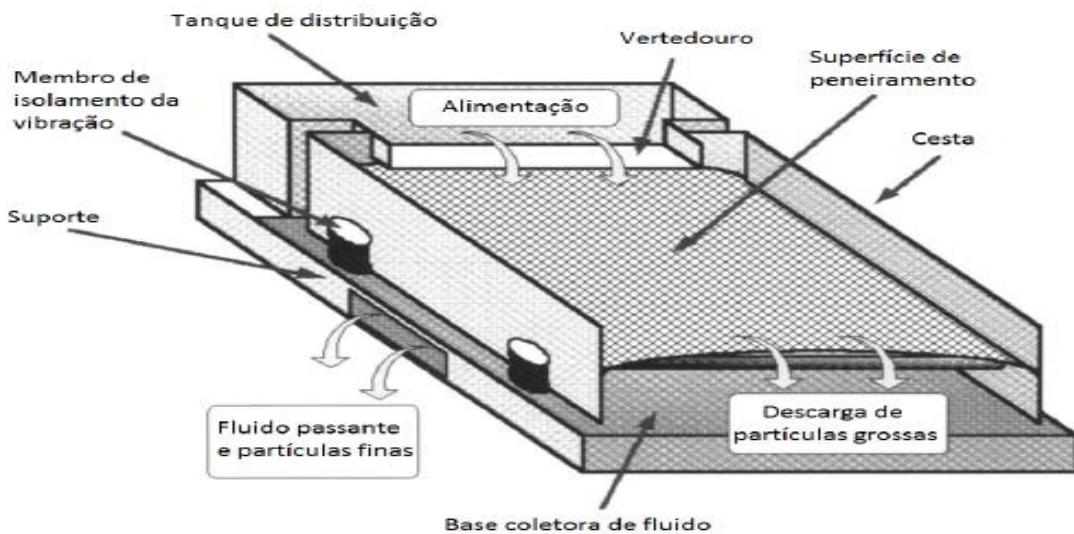


Fonte: Adaptação de MI-SWACO (2017)

2.3.1 Peneiras Vibratórias

Essas peneiras são a primeira barreira de retenção de sólidos, separando as partículas de maior tamanho no processo. Por exemplo, peneiras de tela API 200 podem separar cascalhos com diâmetro acima de 74 µm. Seu desempenho afeta diretamente os estágios seguintes do tratamento do fluido. Em razão disso, são consideradas os dispositivos mais relevantes do sistema de controle de sólidos (HOBERRYCK, 1980; RAJA, 2012). Na **Figura 2.2** é apresentada uma representação simplificada de peneira vibratória comumente empregada.

Figura 2.2 - Peneira vibratória tradicional



Fonte: Adaptação de AADE (1999)

2.3.2 Mud Cleaner

O *mud cleaner* combina peneiras vibratórias e hidrociclos para remover partículas finas e recuperar materiais como a barita, devolvendo-os ao sistema. A eficiência do equipamento contribui diretamente para a redução de custos operacionais (THOMAS, 2001). Na **Figura 2.3** é apresentada uma representação esquemática de um sistema de controle de sólidos com *Mud Cleaner*.

Figura 2.3 - Representação de um *Mud Cleaner* utilizado no controle de sólidos durante a perfuração

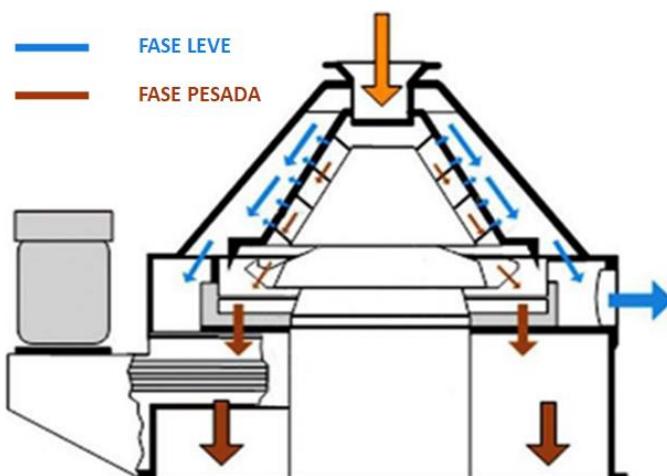


Fonte: Alibaba (2025)

2.3.3 Centrífugas Verticais (*Cuttings Dryers*)

Projetadas para tratar grandes volumes, essas centrífugas promovem secagem eficaz do cascalho, alcançando menos de 5% de fluido residual. Além de facilitar o descarte ambiental, recuperam fluidos valiosos ao processo (MI-SWACO, 2017). Na **Figura 2.4** é apresentada uma representação esquemática de uma centrífuga vertical.

Figura 2.4 - Centrífuga vertical

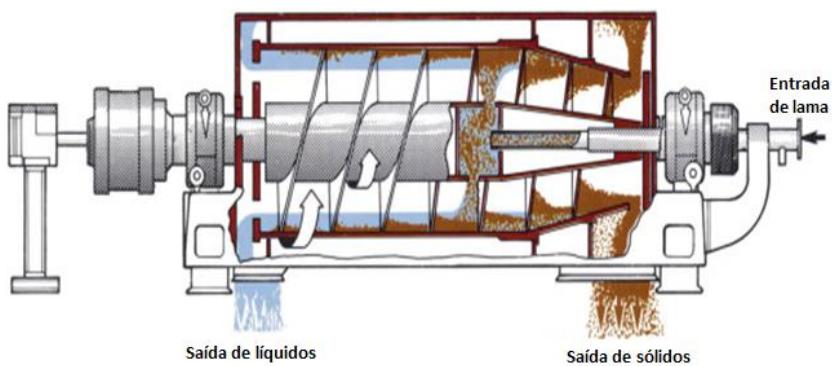


Fonte: Adaptação de TR *Solids Control* (2020)

2.3.4 Centrífugas Horizontais (Decantadoras)

Responsáveis pela remoção de partículas ultrafinas (até 2 μm), essas centrífugas completam o ciclo de purificação do fluido antes de seu reuso. Elas reduzem a necessidade de aditivos químicos e mantêm a viscosidade em níveis ideais (BOBO; HOCH, 1954). Na **Figura 2.5** é apresentado o princípio de funcionamento de uma centrífuga horizontal decantadora.

Figura 2.5 - Centrífuga horizontal

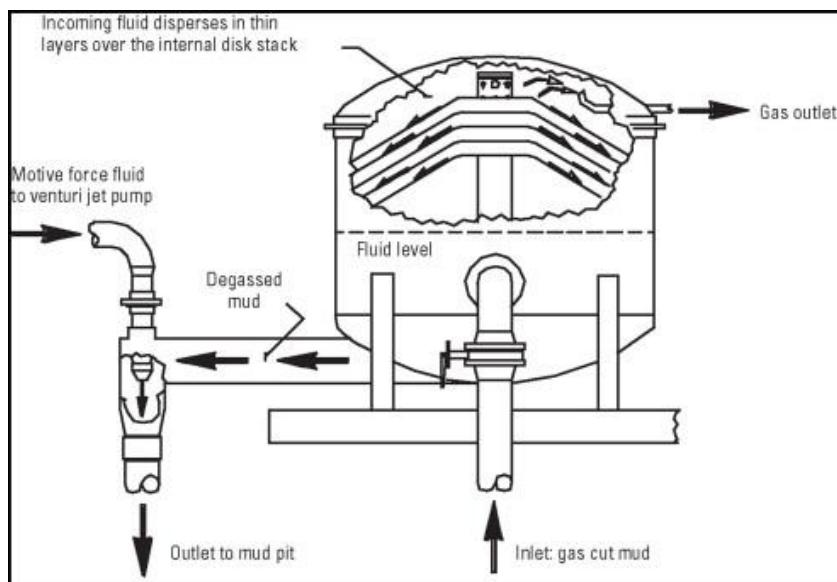


Fonte: Adaptação de Seán Moran (2017)

2.3.5 Degaseificadores

Degaseificadores são dispositivos adicionais que aumentam a eficiência do sistema de controle de sólidos ao remover gases dissolvidos no fluido. Podem operar por pulverização atmosférica ou a vácuo (ASME, 2005; AADE, 1999). A **Figura 2.6** traz um exemplo de representação esquemática de um degaseificador utilizado na separação gás-líquido em unidades de perfuração.

Figura 2.6 - Representação esquemática de um degaseificador a vácuo



Fonte: Adaptação de Martin (2025)

2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

O peneiramento vibratório é um processo amplamente utilizado em operações de separação sólido-líquido, especialmente na perfuração de poços de petróleo. O seu desempenho é essencial para o funcionamento eficaz das etapas subsequentes do tratamento do fluido de perfuração. Esta seção descreve os fundamentos operacionais das peneiras vibratórias, os diferentes tipos de movimento, variáveis que influenciam seu desempenho e as estratégias de automação aplicadas a este equipamento.

2.4.1 Fundamentos e Aplicação

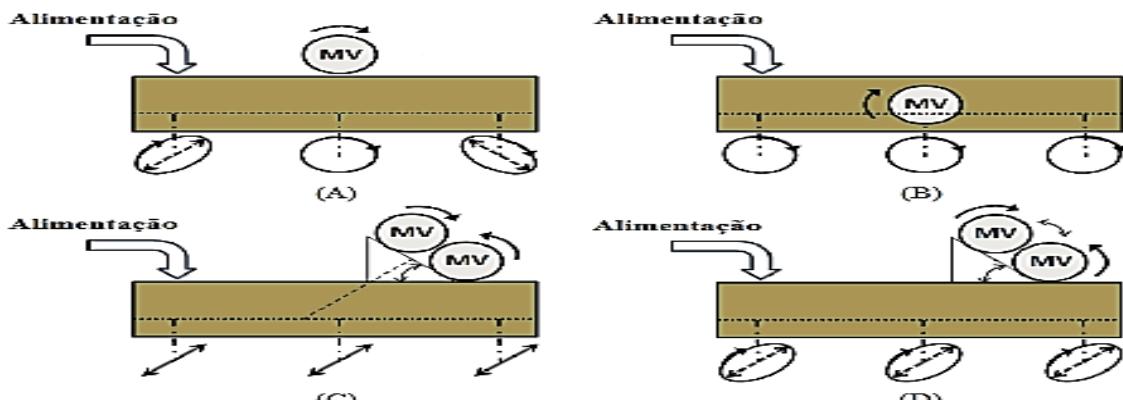
As peneiras vibratórias operam por meio de um sistema de vibração imposto à tela de separação, promovido por motores vibratórios. Esse movimento induz o transporte das partículas maiores ao longo da superfície inclinada da peneira, desde a entrada até a zona de

descarte, enquanto permite que o fluido e partículas menores atravessem as aberturas da tela (**RAJA, 2012**). O cascalho retido é encaminhado para tratamento adequado antes de seu descarte, enquanto o fluido recuperado segue para reutilização.

2.4.2 Modos de Vibração

A configuração dos motores vibratórios determina o padrão de movimento da tela. As principais formas de vibração são: elíptica desbalanceada, circular, linear e elíptica balanceada (**AADE, 1999**). O movimento elíptico desbalanceado ocorre com um único motor fora do centro de massa, gerando trajetórias divergentes nas extremidades da tela. Ao posicionar o motor no centro de massa, obtém-se um movimento circular. A adição de dois motores inclinados a 45° e girando em sentidos opostos possibilita o movimento linear ou elíptico balanceado, dependendo da frequência aplicada. Na **Figura 2.7** são apresentados os tipos de movimentos que uma peneira vibratória pode apresentar.

Figura 2.7 - Tipos de movimentos vibratórios
 (A) Elíptico desbalanceado; (B) Circular; (C) Linear; (D) Elíptico balanceado



Fonte: Adaptação de **AADE (1999)**

A frequência de rotação dos motores vibratórios é o que distingue um movimento balanceado elíptico de um linear. Em condições normais de operação, as peneiras operam com uma frequência mais baixa, reproduzindo o modo balanceado elíptico. Quando há um aumento na vazão de alimentação, é necessário aumentar a rotação ou adotar um movimento linear, aumentando não apenas o deságue, mas também o desgaste das telas. Portanto, é necessário reduzir a rotação assim que o processo for estabilizado.

Peneiras modernas alternam entre movimentos elípticos balanceados e lineares, conforme a demanda de vazão. Para esses tipos de movimento, a capacidade de processamento

de sólidos é ampliada buscando não afetar a durabilidade da peneira. A transição entre modos operacionais permite maior controle sobre o desaguamento e o desgaste das telas.

2.4.3 Fatores Operacionais

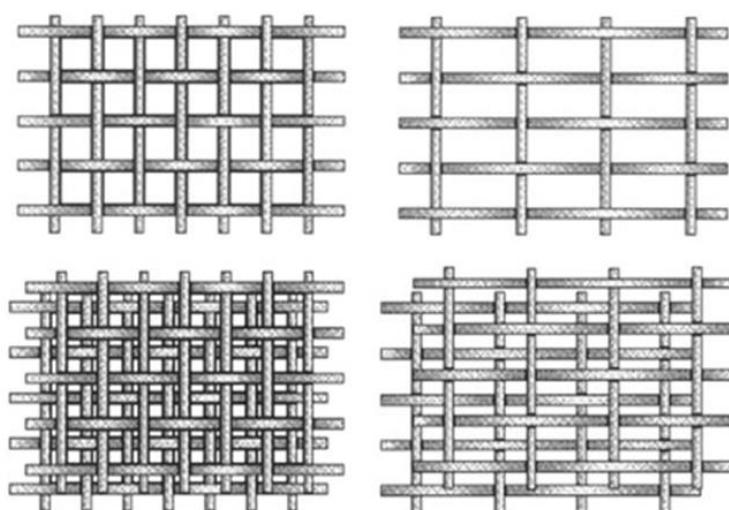
2.4.3.1 Teor de Sólidos

O aumento da concentração de sólidos na suspensão reduz a eficiência da separação, devido à maior competição pelas aberturas da tela (**WILLS; NAPIER-MUNN, 2006**). Estudos experimentais mostraram que altas concentrações reduzem a umidade do resíduo, mas também comprometem a eficiência global (**GUERREIRO, 2015; ROGERS; BRAME, 1985**).

2.4.3.2 Características das Telas

A geometria das aberturas (quadrada ou retangular), a estrutura em camadas e a resistência dos fios influenciam diretamente a vida útil e o desempenho da peneira. Diferentes estruturas de tela são apresentadas na **Figura 2.8**. A abertura é geralmente expressa em micrômetros (μm) e está relacionada ao número de fios por polegada (*mesh*). Telas com o mesmo *mesh* podem apresentar diferentes aberturas dependendo do diâmetro dos fios (**ASME, 2005**).

Figura 2.8 - Formas de abertura de tela quadrada e retangular, simples e em camadas



Fonte: Adaptação de AADE (1999)

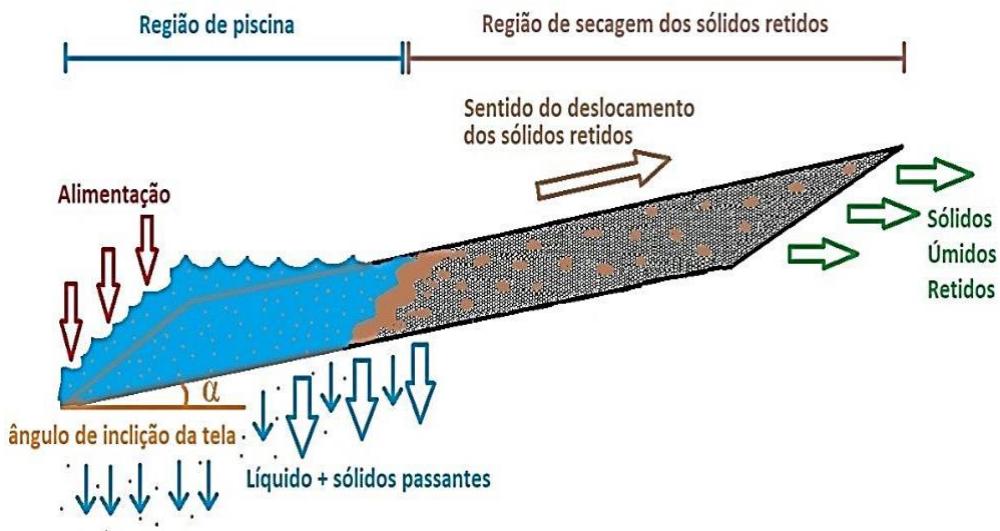
Na **Equação 2.1** é apresentada uma forma de calcular o tamanho da abertura (ϕ) em *microns*, em função do número de *mesh* (#M) e do diâmetro do fio da tela (d_W), em polegadas.

$$\phi = 25,4 \cdot \left(\frac{1}{\#M} - d_W \right) \quad (0.1)$$

2.4.3.3 Inclinação da Tela

A inclinação impacta a drenagem e o transporte dos sólidos. Ângulos maiores favorecem a drenagem, enquanto menores otimizam o transporte. Contudo, alterações no ângulo afetam o equilíbrio entre retenção e secagem dos sólidos (ASME, 2005).

Figura 2.9 - Esquema das regiões de piscina e de secagem de sólidos retidos



Fonte: Adaptação de **Barbosa (2018)**

2.4.3.4 Intensidade da Vibração

A vibração é medida em termos do fator adimensional g, que relaciona a aceleração vibratória com a gravidade. A vibração promove a movimentação dos sólidos e a passagem de fluido, mas níveis excessivos podem danificar a tela e comprometer a eficiência (FREITAS, 2017).

Na literatura, uma forma usual de se medir a intensidade de vibração é através do valor de Fg , definido pela razão entre a aceleração vibracional e aceleração gravitacional, como apresentado na **Equação 2.2**, aplicada em casos de movimento circular da peneira:

$$Fg = \frac{A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}{g} \quad (0.2)$$

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

$$A = \frac{m \cdot e}{M} \quad (0.3)$$

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

2.4.4 Estratégias de Automação e Controle

Com o avanço das exigências ambientais e operacionais, a automação de peneiras vibratórias tornou-se uma solução para aumentar a confiabilidade e o desempenho. O controle automático do nível de fluido sobre a tela, por meio do ajuste da inclinação e da vibração, permite manter a eficiência ideal do processo (**SCOTT, 2006**).

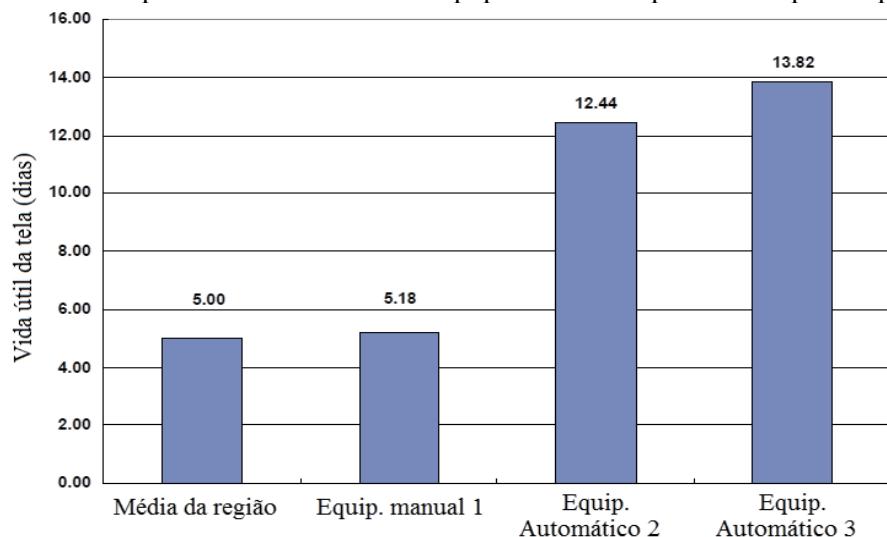
Na sequência serão introduzidas técnicas de controle e equipamentos automatizados que são utilizados no peneiramento vibratório de fluido de perfuração.

De acordo com **Scott (2006)**, a operação ideal de uma peneira vibratória ocorre quando 3/4 da área da tela estão submersos pelo fluido de perfuração, deixando apenas 1/4 da tela da peneira para o deságue (separação) do sólido retido. A operação de uma peneira vibratória com um nível de fluido acima da tela de separação é conhecida por favorecer a presença de mais sólidos retidos de forma persistente. Por outro lado, se o equipamento for operado com menos fluido do que o recomendado, a vida útil da tela de separação é reduzida, pois a falta de lubrificação resulta em maior desgaste do material de construção, diminuindo sua durabilidade.

Com o objetivo de atender à necessidade mencionada no parágrafo anterior, **Scott (2006)** sugere um sistema de controle que modifica o ângulo de inclinação da peneira. Sensores

medem o nível do líquido acima da tela de separação e, caso o nível se desvie do ponto de ajuste correspondente, o sistema utiliza câmaras de ar posicionadas sob a peneira para modificar o ângulo de inclinação da tela de separação. O sistema de controle reduzirá o ângulo de inclinação se o nível do fluido estiver abaixo do ponto especificado. Caso o nível de fluido esteja acima do pretendido, o sistema aumentará o ângulo de inclinação. Quando a inclinação atingir o valor máximo permitido, o sistema também aumentará a força gravitacional (F_g) aplicada aos motores vibratórios da peneira. Esse sistema foi testado durante dois meses em sistemas de tratamento de sondas de perfuração e provou ser eficaz, como evidenciado pelo aumento significativo da vida útil das telas utilizadas. Uma comparação de três dispositivos úteis é mostrada na **Figura 2.10**, sendo o primeiro operado manualmente e os outros dois operados automaticamente de acordo com a sugestão de **Scott (2006)**.

Figura 2.10 - Comparativo de vida útil dos equipamentos a depender do tipo de operação



Fonte: Adaptação de **Scott (2006)**

De acordo com a pesquisa de **Dorry (2010)**, a intensidade da vibração da tela de separação de uma peneira vibratória é determinada com base na Segunda Lei de Newton. Dessa forma, quando há um aumento da quantidade de fluido suspenso sobre a tela da peneira, ocorre um acréscimo na massa total do sistema. Como consequência, mantendo-se constante a força gerada pelos motores vibratórios (F_g), haverá uma redução na aceleração do sistema (**FREITAS, 2017**). Essa desaceleração impacta diretamente a capacidade de escoamento do fluido, a velocidade de transporte do material sólido sobre a tela de separação e pode ocasionar o colapso do sólido retido (**DORRY, 2010**).

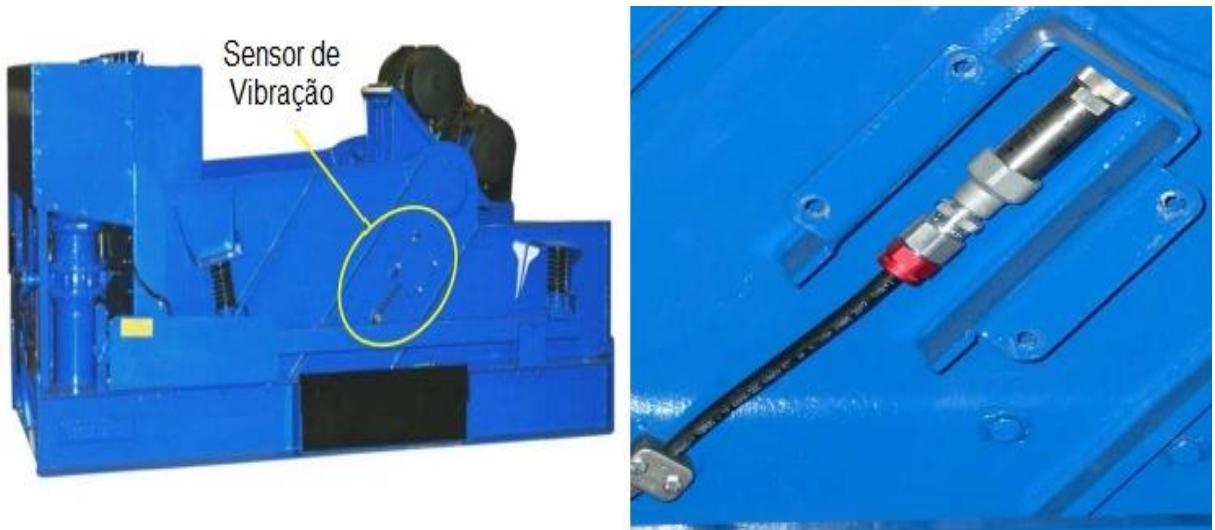
Sensores de vibração integrados à estrutura da peneira medem a aceleração real e ajustam automaticamente a rotação dos motores, compensando variações na vazão de alimentação (**DORRY, 2010**).

O sensor é responsável por detectar a vibração do cesto da peneira e transmitir um sinal elétrico proporcional ao valor medido para o controlador. Este, por sua vez, interpreta o sinal recebido e ajusta a frequência dos motores vibratórios conforme necessário. O sistema de controle opera com três posições de *set point*, as quais podem ser selecionadas pelo operador, de acordo com as condições operacionais vigentes.

Caso ocorra alguma falha na leitura do valor adimensional da força vibratória (F_g), o sistema está programado para operar automaticamente a uma frequência de 60 Hz, de modo a evitar o aumento descontrolado da frequência de vibração.

Além disso, conforme relatado por **Dorry (2010)**, o sistema demonstrou ser confiável e aplicável a qualquer tipo de peneira vibratória. O equipamento utilizado por **Dorry (2010)** é apresentado na **Figura 2.11**, com destaque para o sensor empregado na medição das vibrações.

Figura 2.11 - Destaque para sensor de vibração em peneira vibratória



Fonte: Adaptado de **Dorry (2010)**

Versões mais modernas desses sistemas, como a desenvolvida por **Dorry e Dufilho (2012)**, realizam a seleção automática do set point com base nas características do fluido e nas condições operacionais. Esses sistemas evitam perdas por erro humano e maximizam a vida útil

dos componentes. Com base nas características do fluido e nos parâmetros de pressão, o controlador ajusta automaticamente o *set point* da força vibratória (F_g), sendo necessária a intervenção do operador apenas em casos de falha no equipamento. A operação controlada do processo resultou em um desempenho otimizado da peneira vibratória, além de um aumento na capacidade do sistema e na velocidade de transporte do material sólido sobre a tela de separação.

Endress (2015) apresentou três modelos de peneiras industriais que foram resultado de avanços nos sistemas de controle. O sistema **MultiG Shaker**, introduzido no mercado em 2015, é capaz de operar com valores de F_g variando entre 8g e 50g, oferecendo maior flexibilidade operacional. Para tanto, é importante destacar que peneiras vibratórias convencionais geralmente operam com valores de força vibratória (F_g) inferiores a 9g. Outro sistema, denominado **ProgiG**, recebe em tempo real os valores de vazão, viscosidade, densidade e distribuição granulométrica das partículas. A partir desses dados, utiliza algoritmos internos para ajustar automaticamente o ponto de operação da peneira vibratória, otimizando o desempenho do processo. Adicionalmente, o sistema **Hyper-G** conta com um mecanismo de controle que ajusta a inclinação da tela por meio de um sistema de engrenagens, proporcionando uma separação mais eficiente. Este sistema também permite ao operador selecionar a intensidade da vibração, conferindo maior controle sobre as condições operacionais.

Peneiras industriais como **MultiG**, **ProgiG** e **Hyper-G** incorporam algoritmos de controle avançado, permitindo ajustes em tempo real com base em dados de sensores de vazão, densidade, viscosidade e granulometria. Esses sistemas representam o maior avanço em peneiramento vibratório automatizado (**ENDRESS, 2015**).

2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROCESSOS E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

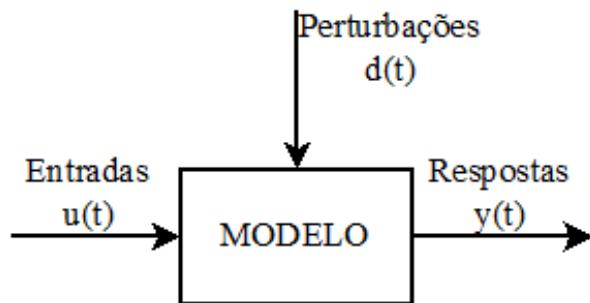
A modelagem matemática é uma técnica amplamente empregada na engenharia para representar, de forma estruturada, o comportamento dinâmico de sistemas físicos, com base em suas variáveis de entrada e saída (Figura 2.12). Os modelos podem ser classificados em duas categorias principais: fenomenológicos e empíricos. Os primeiros baseiam-se em leis físicas fundamentais, como as de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Já os empíricos são obtidos por meio da análise estatística de dados experimentais, sem

necessariamente considerar os mecanismos internos do sistema (**AGUIRRE, 2007; HANGOS; CAMERON, 2001**).

Em diversas aplicações, inclusive na separação sólido-líquido e controle de sólidos, é comum que modelos fenomenológicos incorporem parâmetros empíricos para descrever fenômenos complexos, como coeficientes de transferência de massa ou correlações entre variáveis (**AGUIRRE, 2007**).

A técnica de identificação de sistemas consiste na construção de modelos baseados em dados de entrada e saída do processo, com o objetivo de descrever matematicamente a relação de causa e efeito observada experimentalmente. Essa abordagem é útil quando o conhecimento sobre os fenômenos internos é limitado, mas há disponibilidade de registros históricos ou ensaios controlados (**SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2003**).

Figura 2.12 - Fluxograma para representação de um modelo aplicado a um processo



Fonte: Adaptado de **Seborg, Edgar e Mellichamp (2003)**

O processo de identificação de sistemas compreende quatro etapas principais (**AGUIRRE, 2007**):

- (i) aquisição de dados experimentais;
- (ii) definição da estrutura do modelo;
- (iii) estimativa dos parâmetros;
- (iv) validação do modelo.

A etapa de coleta de dados pode se basear em históricos operacionais ou em testes planejados, com controle sobre perturbações aplicadas e medições realizadas.

A estrutura matemática escolhida pode assumir diferentes formas, como modelos baseados em equações diferenciais, funções de transferência ou modelos em espaço de estados. Um dos formatos mais utilizados é a função de transferência, obtida pela aplicação da

transformada de Laplace às equações diferenciais do sistema. A **Equação 2.4** apresenta a forma genérica de uma função de transferência.

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m \beta_i \cdot s^i}{\sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot s^i} e^{-\theta \cdot s} \quad (0.4)$$

Na qual $G(s)$ é a função de transferência, s é a variável da transformada de Laplace, α e β são coeficientes constantes, e θ representa o tempo morto do processo. Nos **Quadros 2.1 a 2.4** são apresentadas as expressões de funções de transferência comumente utilizadas em engenharia, associadas às suas respectivas equações diferenciais e respostas a um degrau.

Quadro 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)**

Quadro 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)**

Quadro 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)**

Quadro 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	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1}$
Equação de resposta a um degrau	Para $\zeta > 1$ $y(t) = K \cdot M_{step} \cdot \left\{ 1 - e^{-\zeta t / \tau} \left[\cosh \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sinh \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t \right) \right] \right\}$ Para $\zeta = 1$ $y(t) = K \cdot M_{step} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \cdot e^{-t/\tau} \right]$ Para $0 \leq \zeta < 1$ $y(t) = K \cdot M_{step} \left\{ 1 - e^{-\zeta t / \tau} \cdot \left[\cos \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t \right) \right] \right\}$

Fonte: Adaptado de **Seborg, Edgar e Mellichamp (2003)**

Nessas expressões, o parâmetro K é o ganho da função de transferência, τ é a constante de tempo, θ é o tempo morto e ζ é fator de amortecimento.

A estimativa dos parâmetros das funções de transferência pode ser feita por métodos gráficos, apropriados para sistemas simples, ou por técnicas numéricas, como a minimização da soma quadrática dos resíduos (SQR). O método gráfico baseia-se na análise de curvas de resposta a um degrau. O ganho (K) pode ser estimado conforme a **Equação 2.5**.

$$K = \frac{y(\infty) - y(0^-)}{M_{step}} \quad (0.5)$$

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 (τ) pode ser obtida a partir da inclinação inicial da curva ou do tempo necessário para atingir 63,2% da resposta final, conforme a **Equação 2.6** e a **Equação 2.7**.

$$\left. \frac{d}{dt} \left(\frac{y}{K \cdot M_{step}} \right) \right|_{t=0} = \frac{1}{\tau} \quad (0.6)$$

$$y(\tau) = 0,632 \cdot [y(\infty) - y(0^-)] + y(0^-) \quad (0.7)$$

Já a minimização da soma dos resíduos quadráticos entre os dados experimentais e a resposta do modelo é dada pela **Equação 2.8**.

$$\min_{K, \tau, \theta, \zeta} SQR = \min_{K, \tau, \theta, \zeta} \sum (Y_i - y_i)^2 \quad (0.8)$$

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 apresenta maior precisão e pode ser aplicado a modelos complexos, embora requeira maior esforço computacional (AGUIRRE, 2007; SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2003).

A modelagem matemática, portanto, é uma ferramenta indispensável no entendimento e controle de sistemas industriais, incluindo processos de separação em unidades de perfuração. A sua integração com dados de campo e técnicas de identificação permite o desenvolvimento de estratégias de controle mais robustas, seguras e eficientes.

2.6 SENSORES DE UMIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIALIS

A medição da umidade é uma etapa essencial no monitoramento e controle de processos industriais, incluindo operações de separação sólido-líquido, secagem, processamento químico e agroindustrial. Os sensores de umidade podem ser classificados conforme o princípio de funcionamento (direto ou indireto), suas características construtivas e a aplicação pretendida (**CARVALHO, 2016**).

2.6.1 Princípios de Medição da Umidade

Existem duas abordagens principais para a determinação da umidade: métodos diretos e indiretos. O método direto envolve a remoção completa da água da amostra, geralmente por secagem térmica, enquanto os métodos indiretos utilizam propriedades físicas do material, como condutividade, capacidade de absorção de radiação, que variam com o teor de umidade (**CARVALHO, 2016**).

Os sensores indiretos, embora mais práticos e rápidos, apresentam maior sensibilidade à composição do material e podem ter margens de erro elevadas. Apesar disso, são amplamente utilizados em sistemas de controle automático devido à possibilidade de leituras contínuas e em tempo real.

2.6.2 Sensor de Umidade Capacitivo

Os sensores capacitivos operam a partir da medição da constante dielétrica do meio onde estão instalados. A umidade altera essa constante, influenciando o tempo de resposta do sensor a impulsos elétricos. Esses sensores oferecem maior precisão e são mais resistentes à corrosão, sendo ideais para ambientes agressivos (**GOMES, 2016; FERREIRA, 2017**).

O modelo 9SSA7 é um exemplo comum, sendo composto por uma sonda integrada a um módulo de comunicação, o que reduz o desgaste por contato direto com o meio. Na **Figura 2.13** é apresentado um sensor do modelo capacitivo.

Figura 2.13 - Sensor capacitivo de umidade



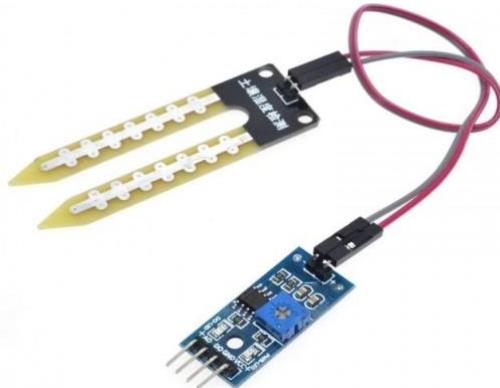
Fonte: Adaptado de **SILVEIRA; COSTA; MELLO (2019)**

2.6.3 Sensor de Umidade Resistivo

O sensor resistivo baseia-se na variação da resistência elétrica entre dois eletrodos em contato com o meio. A água, sendo um bom condutor, reduz a resistência à medida que sua concentração aumenta. Essa relação permite a estimativa da umidade de forma simples e de baixo custo (**SILVEIRA; COSTA; MELLO, 2019**).

Apesar das vantagens econômicas e de fácil operação, esse tipo de sensor apresenta baixa precisão e é suscetível à corrosão, sendo recomendado para aplicações menos exigentes. O modelo FC-28, amplamente comercializado, exemplifica esse tipo de sensor. Na **Figura 2.14** é apresentado o sensor anteriormente citado.

Figura 2.14 - Sensor resistivo de umidade do modelo FC-28

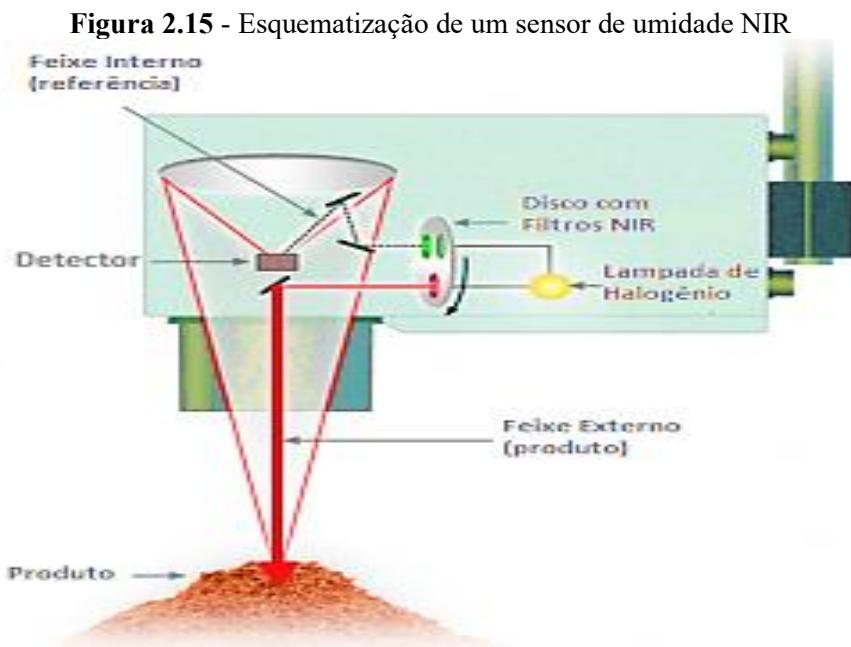


Fonte: Adaptado de **SILVEIRA; COSTA; MELLO (2019)**

2.6.4 Tecnologias Industriais Avançadas

No ambiente industrial, sensores de maior precisão e robustez são empregados em aplicações como controle de fornos, secadores e processos químicos. Os sensores com base em óxidos metálicos, cerâmicas e alumina oferecem alta sensibilidade, mas com custo elevado e manutenção especializada (BAI; SHI, 2007).

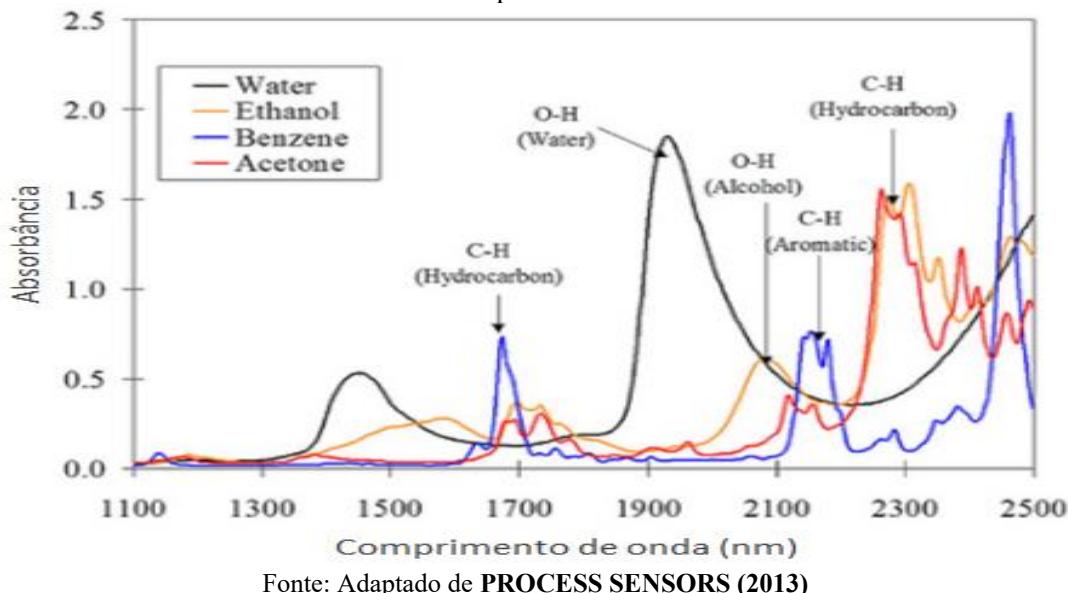
Uma alternativa moderna e não invasiva é a tecnologia de espectroscopia no infravermelho próximo (Near Infrared – NIR), que mede a refletância de radiações específicas absorvidas pela água presente no material. Essa técnica permite leituras precisas e em tempo real, sem contato com a amostra (PROCESS SENSORS, 2013). Conforme ilustrado na **Figura 2.15**, a energia gerada por esse processo óptico é captada por um detector de alta precisão e quantificada eletronicamente antes de ser convertida em uma porcentagem da energia total.



Fonte: Adaptado de PROCESS SENSORS (2013)

A medição por NIR baseia-se na relação entre a absorbância e o comprimento de onda das ligações químicas presentes no material, como OH (água), CH (orgânicos) e NH (proteínas), conforme ilustrado na **Figura 2.16**.

Figura 2.16 - Relação entre o nível de absorbância e o comprimento de onda para cada tipo de ligação química



Fonte: Adaptado de PROCESS SENSORS (2013)

2.6.5 Considerações para Seleção de Sensores

A escolha do sensor de umidade deve levar em consideração critérios como: tempo de resposta, custo, precisão e compatibilidade com o ambiente de operação. Em sistemas automatizados de controle de separação de sólidos, sensores rápidos e com capacidade de medição contínua são preferíveis. Modelos capacitivos e por NIR têm se mostrado eficientes em aplicações industriais que exigem desempenho confiável e baixa intervenção manual (**CARVALHO, 2016**).

A correta seleção e integração dos sensores contribui significativamente para o controle da qualidade do processo e para a eficiência energética das operações (**CHEN; LU, 2005**).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESTRUTURA EXPERIMENTAL E PREPARO DA SUSPENSÃO

Os ensaios experimentais foram conduzidos em uma unidade montada no Laboratório de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. A estrutura de sustentação, confeccionada em aço carbono, possui 3 metros de altura e está instalada sobre uma área de 15 m² adaptada para operação contínua. A disposição geral da unidade está representada na **Figura 3.1**.

Figura 3.1 - Unidade experimental utilizada



Fonte: Pereira Junior (2021)

No topo da estrutura está instalada a peneira vibratória do modelo Mongoose Pro Shaker, mostrada na **Figura 3.2**, cuja área útil de peneiramento é de 2,73 m². O equipamento é composto por dois motores elétricos de 2,5 CV, operando em sentidos opostos a 1800 rpm. Conforme o fabricante, a peneira opera em dois modos distintos de vibração: a condição padrão, com aceleração de 6,5 g, e a condição de maior capacidade, atingindo até 7,5 g.

Figura 3.2 - Peneira vibratória do modelo Mongoose Pro Shaker



Fonte: **MI SWACO (2017)**

Na base da estrutura encontra-se o tanque de mistura, com capacidade de 3.000 litros, e uma bomba de lama modelo Weir 4/3C-AH, acionada por um motor WEG de 15 CV. Para os testes, preparou-se uma suspensão contendo areia, água e espessante argila esmectita, com concentração volumétrica de sólidos fixada em 2%. O preparo exigiu a dispersão prévia do espessante na água, utilizando um sistema de agitação adequado, e repouso por 24 horas para garantir a completa hidratação do polímero.

3.2 SISTEMA DE CONTROLE DA FORÇA-G

O controle da intensidade vibratória foi realizado utilizando um sensor piezoelétrico modelo 646B00 (PCB Piezoeletronic), ilustrado na **Figura 3.3**. Este sensor converte deformações mecânicas em sinais elétricos proporcionais à vibração, que são convertidos em sinais de 1 a 5 V antes de serem lidos por uma placa de aquisição de dados NI USB-6008 (National Instruments), conforme mostrado na **Figura 3.4**. A interface homem-máquina desenvolvida permitiu o monitoramento e controle do sistema.

Figura 3.3 - Sensor piezoelétrico modelo 646B00



Fonte: Direct Industry (2025)

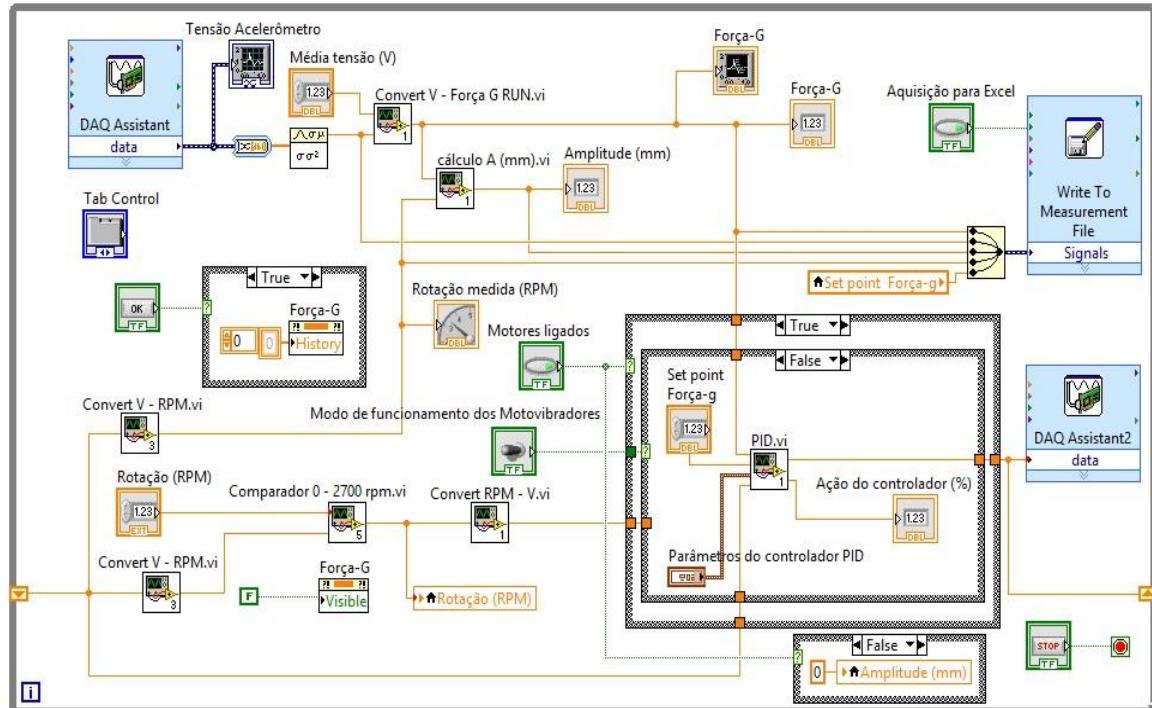
Figura 3.4 - Placa de aquisição de dados modelo NI USB-6008



Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2021)

O algoritmo de controle desenvolvido permitiu o controle tanto por rotação dos motores quanto por ajuste direto do valor da força-g, como apresentado na **Figura 3.5**. O sinal gerado é enviado ao inversor de frequência CFW700 (**WEG, 2025**), responsável por ajustar a rotação dos motores de acordo com o valor desejado. A estratégia de controle compara o valor medido com o *set point*, promovendo ajustes automáticos sempre que houver desvio.

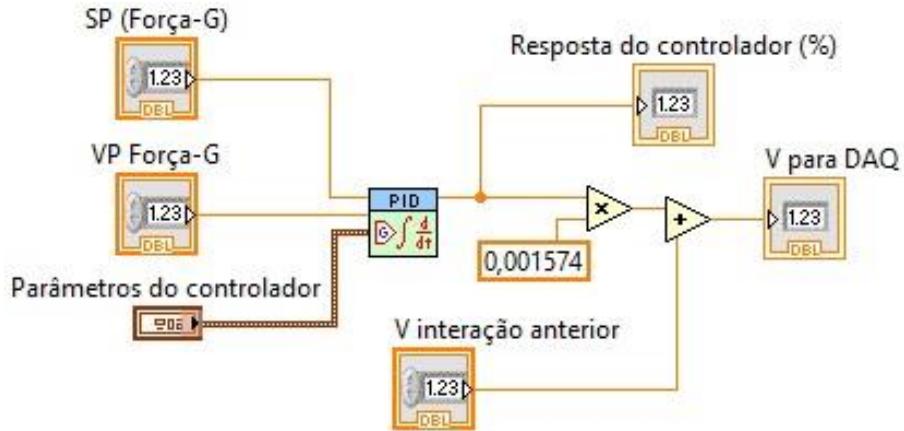
Figura 3.5 - Programação do algoritmo de controle



Fonte: Pereira Junior (2021)

O sistema opera com frequência de amostragem de 1 ponto por segundo, calculando o valor médio dos dados coletados. Embora o controlador ofereça suporte aos modos P, PI e PID, optou-se por desativar o termo derivativo para evitar amplificação de ruídos indesejados devido à natureza oscilatória do processo (DORRY, 2010). A lógica de controle desenvolvida está representada na **Figura 3.6**.

Figura 3.6 - Programação do controlador utilizado



Fonte: Pereira Junior (2021)

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

Inicialmente, foram testados dois modos de controle: proporcional (P) e proporcional-integral (PI). Os ensaios foram conduzidos por 500 segundos, com variações no *set point* do fator-g. Partindo de 0,5, o valor foi elevado para 1,0 aos 100 segundos e, posteriormente, retornado a 0,5 aos 400 segundos. A avaliação do desempenho foi feita com base na Integral do Erro Absoluto (IAE) e no *Overshoot* (OS).

A IAE foi calculada conforme a **Equação 3.1**, utilizando a Regra dos Trapézios (**Equação 3.2**), que possibilita aproximação numérica da integral com base em medições discretas (FRANCO, 2012).

$$IAE = \int_0^{500} |e(t)| dt \quad (0.1)$$

$$IAE = \sum_{i=0}^{500} (|Fg_i - SP_i| + |Fg_{i+1} - SP_{i+1}|) \left(\frac{t_{i+1} - t_i}{2} \right) \quad (0.2)$$

Onde $e(t)$ representa o erro entre o valor medido e o set point, SP_i e SP_{i+1} , Fg_i e Fg_{i+1} são os valores de referência e medidos nos tempos i e $(i+1)$. Na qual, $e(t)$ é a diferença entre a variável de processo e o *set point*, SP_i e SP_{i+1} correspondem aos valores de *set point* nos tempos i e $(i+1)$ e Fg_i e Fg_{i+1} , aos valores de Fg obtidos experimentalmente nos tempos i e $(i+1)$.

O *Overshoot* (OS) foi obtido pela **Equação 3.3**, sendo o valor máximo atingido após a perturbação comparado ao set point, em função da amplitude da variação imposta (**SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2003**).

$$OS = \frac{\max(Fg) - SP}{M_{step}} 100\% \quad (0.3)$$

Na etapa seguinte, avaliou-se o desempenho do controlador PI para diferentes combinações de ganho proporcional (K_C) e tempo integral (τ_I). Os ensaios duraram 200 segundos, com mudança do set point de 0,5 para 1,0 aos 100 segundos. Os valores de K_C testados foram 15 e 20, enquanto os de τ_I foram 0,15; 0,20 e 0,25 minutos. Novamente, IAE e OS foram utilizados como critérios para selecionar os parâmetros ideais.

Essa abordagem garantiu que a peneira operasse de forma estável, com mínima oscilação e resposta rápida, permitindo a realização dos experimentos sob condições controladas e reproduzíveis.

3.4 TESTES DE MEDAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE RESIDUAL DO SÓLIDO

Para medição da umidade do material sólido retido na saída da peneira, foram realizados diversos experimentos, que consistiram em medir o teor de umidade do sólido retido utilizando um sensor/transmissor de umidade para determinar o caráter transiente do comportamento desta variável operacional de interesse.

A leitura do sinal enviado pelo sensor/transmissor de umidade foi realizada por meio da utilização da mesma placa de aquisição de dados empregada para controle de Fg , modelo NI USB-6008 da National Instruments™, já apresentada na **Figura 3.4**, que se comunica com o aplicativo utilizado como interface homem-máquina.

Uma vez definida a utilização do sensor/transmissor de umidade, passou-se para a etapa de realização de experimentos exploratórios acoplando-o à peneira vibratória em escala

industrial. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo para a coleta das amostras de material sólido úmido, o qual foi construído com o emprego de materiais simples e, também, de baixo custo e está apresentado na **Figura 3.7**.

Figura 3.7 - Amostrador desenvolvido para medição contínua de umidade



Fonte: **Autoria própria (2025)**

Importante destacar o caráter exploratório dos testes realizados, uma vez que não se tinha conhecimento de resultados experimentais publicados na literatura sobre o emprego de sensor/transmissor de umidade em aplicações industriais similares à abordada neste trabalho.

3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MODELOS SEMIEMPÍRICOS

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).

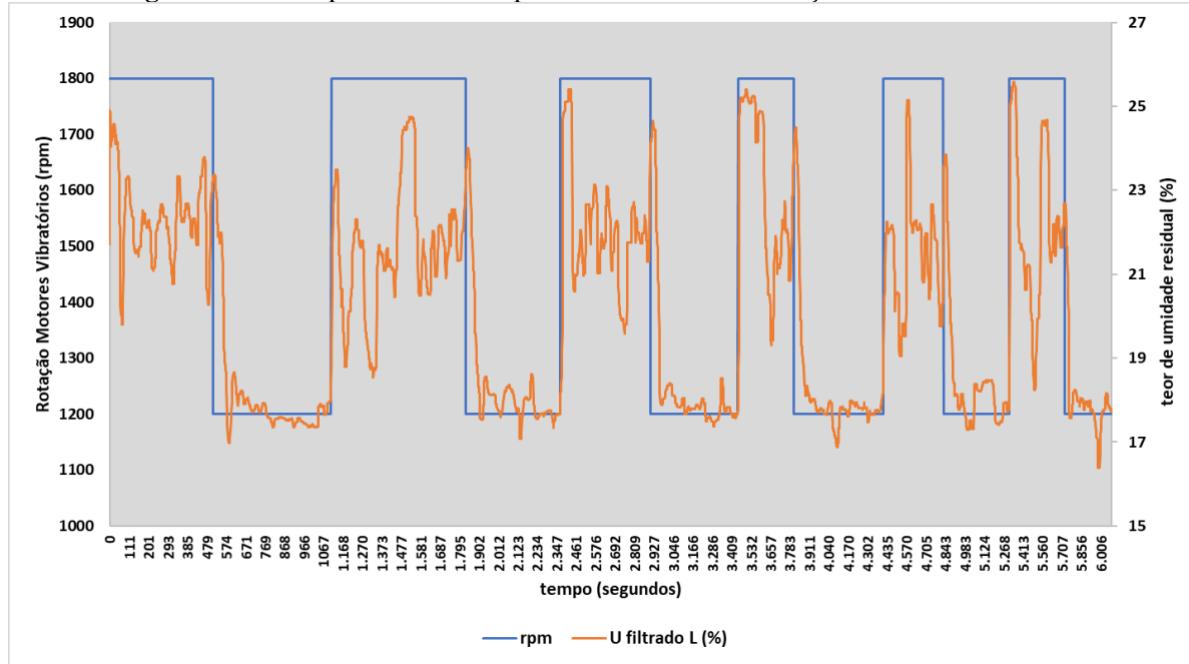
Este procedimento de identificação de modelos matemáticos é bastante robusto e serve muito bem para a finalidade futura de controlar o processo em modo automático. O principal fator limitante deste método reside no fato de que os modelos identificados são válidos dentro dos limites considerados na curva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

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. Como exemplo, os motores vibratórios da peneira foram excitados de 1.200 a 1.800 RPM e de 1.800 a 1.200 RPM, de maneira sequencial. Em média, a variação do teor de umidade dos sólidos retidos – em resposta à variação de RPM – variou entre 17,5% e 22%. 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



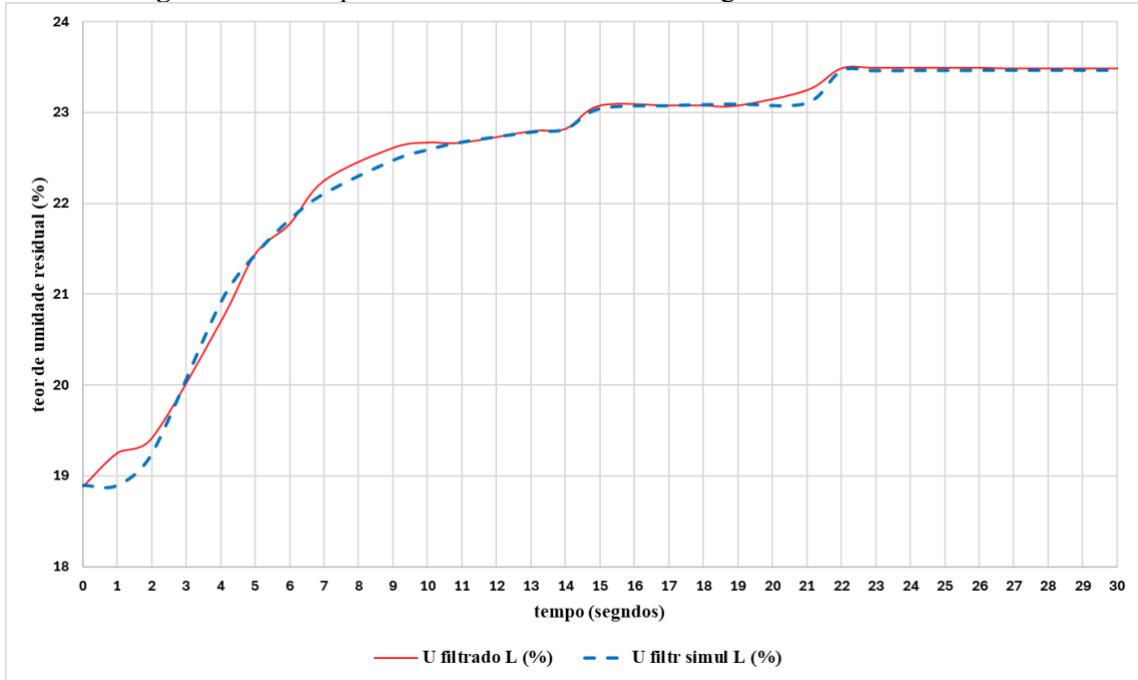
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 RELAÇÃO DA UMIDADE COM A ROTAÇÃO DOS MOTORES VIBRATÓRIOS

O primeiro degrau realizado consistiu no aumento da rotação dos motores vibratórios de 1.200 RPM para 1.800 RPM, sendo o resultado obtido apresentado na **Figura 4.2**. Considerando o interesse em avaliar a resposta transiente do teor de umidade residual dos

sólidos retidos, optou-se por analisar os primeiros 30 segundos de medição após o degrau no valor da rotação dos motores vibratórios.

Figura 4.2 - Comportamento da umidade no 1º degrau de aumento de RPM



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste primeiro degrau, é possível visualizar que o aumento do teor de umidade ocorre em patamares, caracterizando uma resposta gradual ao aumento da RPM. Uma possível explicação para este comportamento seria a de que com o aumento da RPM dos motores vibratórios, os sólidos passariam a serem transportados com maior velocidade para fora da região compreendida pela interface entre a suspensão e o sólido retido (interface L/S), implicando em um menor tempo para o deságue. À medida que a posição da interface L/S recua com o aumento da RPM, o sólido tende a se desprender mais rapidamente do meio aquoso, carregando consigo maior teor de umidade residual. Após transcorridos 22 segundos, o sólido atinge o teor máximo de umidade residual no transiente considerado.

O modelo dinâmico semiempírico identificado do processo de deságue foi avaliado com base na resposta ao degrau de amplitude igual a $+600 \text{ RPM}$ aplicado à frequência de rotação dos motores vibratórios instalados na peneira no instante arbitrariamente definido como instante $t = 0$. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento do adimensional de Fg foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis operacionais ao degrau aplicado na frequência dos motores vibratórios. Os valores dos parâmetros dos modelos identificados são apresentados na **Tabela 4.1**.

A análise dos resultados apresentados na **Tabela 4.1** com base nos valores dos parâmetros dos modelos permite verificar que a variação do teor de umidade em resposta ao aumento de RPM para o 2º e 3º trechos foi significativamente menor em comparação com a variação do 1º trecho. Os valores dos parâmetros identificados dos modelos serão discutidos mais adiante neste trabalho.

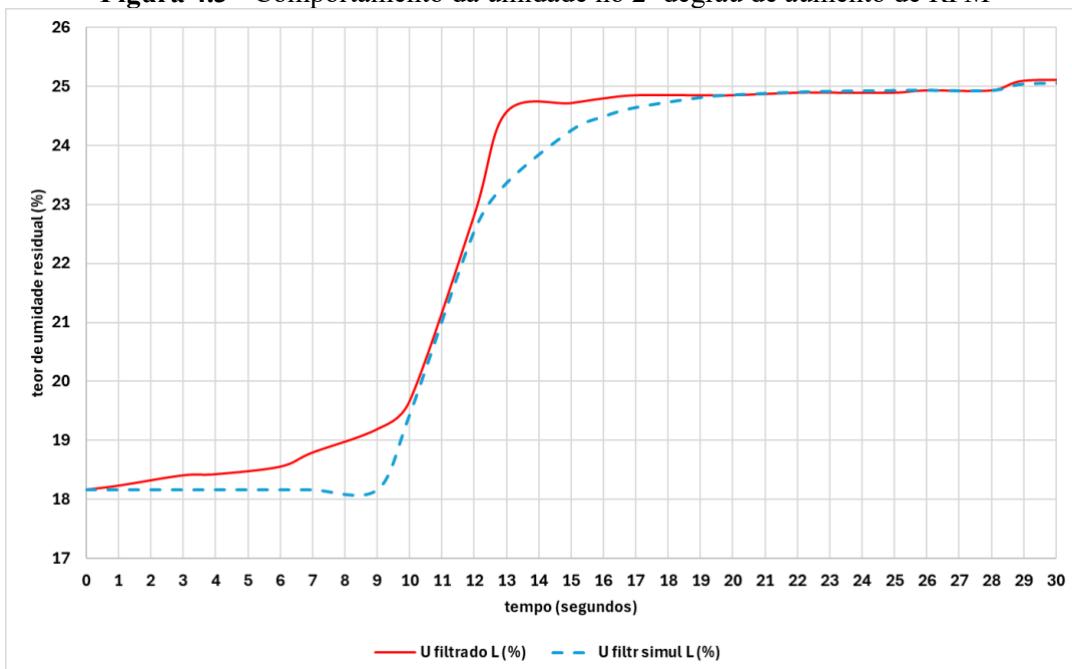
Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 1º degrau de aumento de RPM

1º trecho*	2º trecho*		3º trecho*	
$K_{P1} = \textbf{0,0067}$ %/rpm	$K_{P2} = \textbf{0,0003}$ %/rpm		$K_{P3} = \textbf{0,0006}$ %/rpm	
$\tau_{P1} = \textbf{3,3}$ seg.	$\tau_{P2} = \textbf{3,0}$ seg.		$\tau_{P3} = \textbf{3,0}$ seg.	
$\theta_{P1} = \textbf{1,7}$ seg.	$\theta_{P2} = \textbf{15,0}$ seg.		$\theta_{P3} = \textbf{19,0}$ seg.	

Fonte: Autoria própria (2025)

O segundo degrau realizado, também consistiu no aumento da rotação dos motores vibratórios de 1.200 RPM para 1.800 RPM, sendo o resultado obtido apresentado na **Figura 4.3**. Considerando o interesse em avaliar a resposta transiente do teor de umidade residual dos sólidos retidos, optou-se por analisar os primeiros 30 segundos de medição após o degrau na rotação dos motores vibratórios.

Figura 4.3 - Comportamento da umidade no 2º degrau de aumento de RPM



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste segundo degrau, é possível visualizar que o aumento do teor de umidade praticamente ocorre como uma resposta única ao aumento da RPM. Após transcorridos 30 segundos, o sólido atinge o teor intermediário de umidade residual (25,13%) no transiente considerado. O teor de umidade máximo no transiente considerado foi igual a 25,37%.

O modelo dinâmico semiempírico identificado do processo de deságue também foi inicialmente avaliado com base na resposta ao degrau de amplitude igual a +600 RPM aplicado à frequência de rotação dos motores vibratórios instalados na peneira. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento do adimensional de Fg foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis operacionais aos degraus aplicados na frequência dos motores vibratórios. Os valores dos parâmetros dos modelos identificados são apresentados na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 2º degrau de aumento de RPM

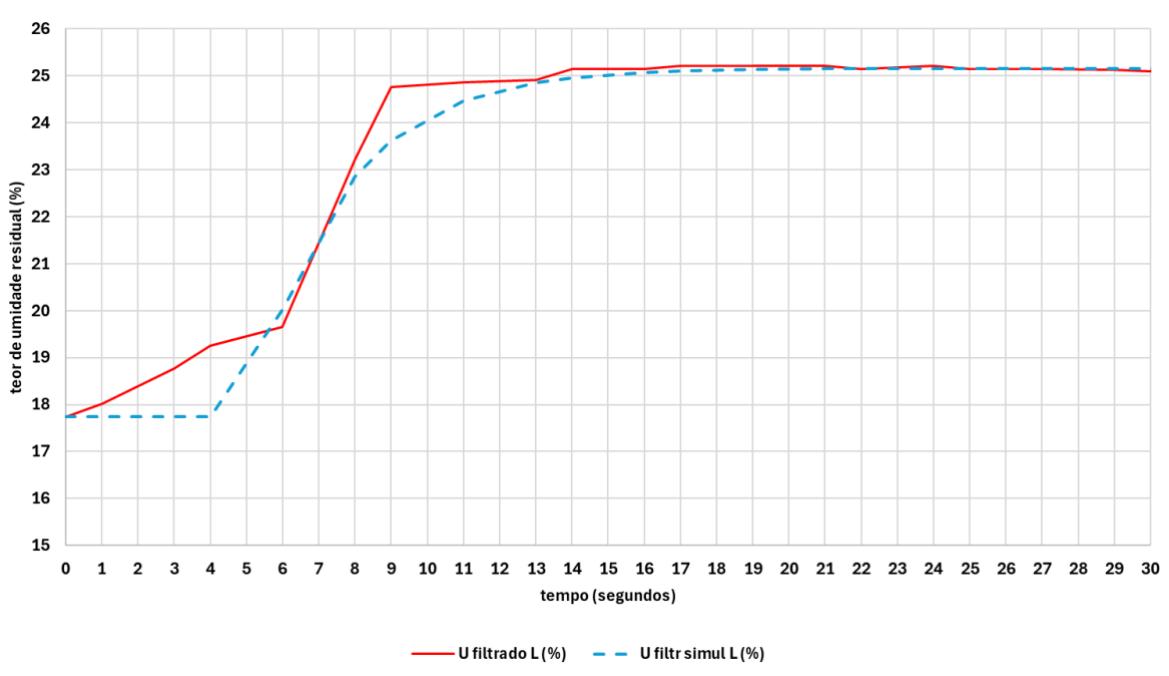
Trecho único
$K_{P1} = \mathbf{0,011}$ %/rpm
$\tau_{P1} = \mathbf{2,4}$ seg.
$\theta_{P1} = \mathbf{9,5}$ seg.
instante inicial = 0 seg.
instante final = 30 seg.

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise dos resultados apresentados na **Tabela 4.2** com base nos valores dos parâmetros identificados para o modelo permite verificar que a variação do teor de umidade em resposta ao aumento de RPM ocorreu de uma única vez. Os valores dos parâmetros identificados dos modelos serão discutidos mais adiante neste trabalho.

O terceiro degrau realizado também consistiu no aumento da rotação dos motores vibratórios de 1.200 RPM para 1.800 RPM, sendo o resultado obtido apresentado na **Figura 4.4**. Considerando o interesse em avaliar a resposta transiente do teor de umidade residual dos sólidos retidos, optou-se por analisar os primeiros 30 segundos de medição após o degrau na rotação dos motores vibratórios. Os resultados sugerem que o comportamento do processo foi semelhante àquele apresentado no segundo degrau.

Figura 4.4 - Comportamento da umidade no 3º degrau de aumento de RPM



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste terceiro degrau, é possível visualizar que o aumento do teor de umidade também não ocorre em patamares, caracterizando desta maneira uma resposta contínua ao aumento da RPM. Uma possível explicação para este comportamento seria a de que com o aumento da RPM dos motores vibratórios, os sólidos passariam a serem transportados com maior velocidade para fora da região compreendida pela interface entre a suspensão e o sólido retido (interface L/S), implicando em um menor tempo para o deságue. À medida que a posição da interface L/S recua com o aumento da RPM, o sólido tenta de se desprender mais rapidamente do meio aquoso, carregando consigo maior teor de umidade residual. Após transcorridos 30 segundos, o sólido atinge o teor máximo de umidade residual (25,2%) no transiente considerado.

Os parâmetros do modelo dinâmico semiempírico identificado do processo de deságue também foi inicialmente avaliado com base na resposta ao degrau de amplitude igual a $+600 \text{ RPM}$ aplicado à frequência de rotação dos motores vibratórios instalados na peneira. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento do adimensional de Fg foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis operacionais aos degraus aplicados na frequência dos motores vibratórios. Os valores dos parâmetros dos modelos identificados são apresentados na **Tabela 4.3**.

A análise dos resultados apresentados na **Tabela 4.3** com base nos valores dos parâmetros do modelo permite verificar que a variação do teor de umidade em resposta ao

aumento de RPM para o 2º e para o 3º trechos praticamente não se verificou, tal como ocorreu nos testes precedentes.

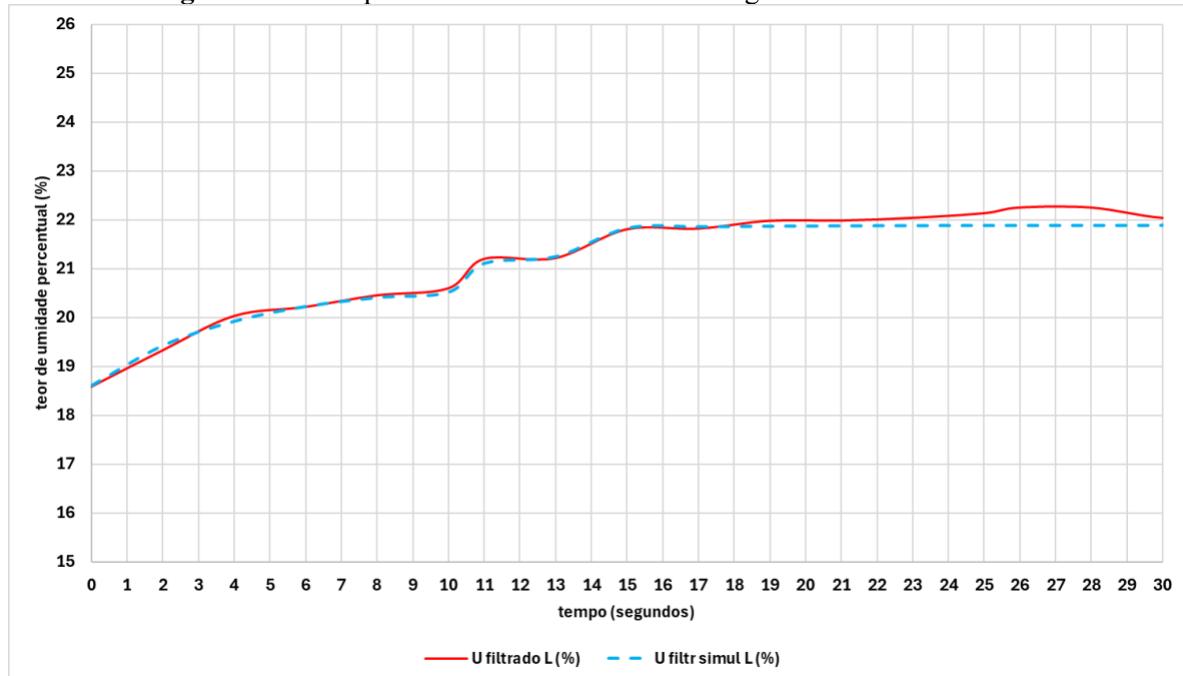
Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 3º aumento de RPM

Trecho único		
$K_{P1} =$	0,010	%/rpm
$\tau_{P1} =$	2,5	seg.
$\theta_{P1} =$	5,5	seg.
instante inicial =	0 seg.	
instante final =	30 seg.	

Fonte: Autoria própria (2025)

O quarto degrau realizado também consistiu no aumento da rotação dos motores vibratórios de 1.200 RPM para 1.800 RPM, sendo o resultado obtido apresentado na **Figura 4.5**. Considerando o interesse em avaliar a resposta transiente do teor de umidade residual dos sólidos retidos, optou-se por analisar os primeiros 30 segundos de medição após o degrau na rotação dos motores vibratórios.

Figura 4.5 - Comportamento da umidade no 4º degrau de aumento de RPM



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste quarto degrau, é possível visualizar que o aumento do teor de umidade também ocorre em patamares, caracterizando uma resposta gradual ao aumento da RPM. Uma possível explicação para este comportamento seria a de que com o aumento da RPM dos motores vibratórios, os sólidos passariam a serem transportados com maior velocidade para fora da região compreendida pela interface entre a suspensão e o sólido retido (interface L/S), implicando em um menor tempo para o deságue. À medida que a posição da interface L/S recua com o aumento da RPM, o sólido tenta de se desprender mais rapidamente do meio aquoso, carregando consigo maior teor de umidade residual. Após transcorridos 30 segundos, o sólido atinge o teor intermediário de umidade residual (21,9%) no transiente considerado. O teor de umidade máximo no transiente considerado foi igual a 22,2%.

O modelo dinâmico semiempírico identificado do processo de deságue também foi inicialmente avaliado com base na resposta ao degrau de amplitude igual a $+600\text{ RPM}$ aplicado à frequência de rotação dos motores vibratórios instalados na peneira. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento do adimensional de Fg foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis operacionais aos degraus aplicados na frequência dos motores vibratórios. Os valores dos parâmetros dos modelos identificados são apresentados na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 4º degrau de aumento de RPM

1º trecho*	2º trecho*	3º trecho*
$K_{P1} = 0,0035 \text{ %/rpm}$	$K_{P2} = 0,001067 \text{ %/rpm}$	$K_{P3} = 0,000933 \text{ %/rpm}$
$\tau_{P1} = 4 \text{ seg.}$	$\tau_{P2} = 0,5 \text{ seg.}$	$\tau_{P3} = 0,5 \text{ seg.}$
$\theta_{P1} = 0 \text{ seg.}$	$\theta_{P2} = 10 \text{ seg.}$	$\theta_{P3} = 13 \text{ seg.}$
(*) trecho inicial do aumento de umidade		
instante inicial = 0 seg.	instante inicial = 10 seg.	instante inicial = 13 seg.
instante final = 10 seg.	instante final = 13 seg.	instante final = 30 seg.

Fonte: Autoria própria (2025)

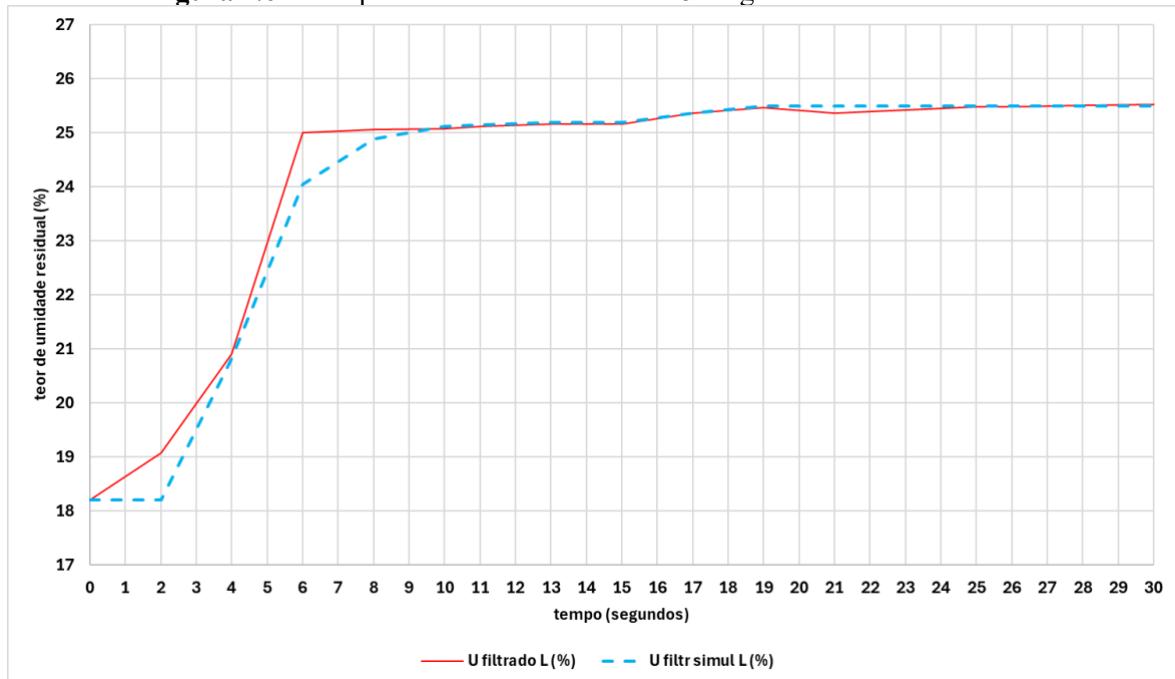
A análise dos resultados apresentados na **Tabela 4.4** com base nos valores dos parâmetros dos modelos permite verificar que a variação do teor de umidade em resposta ao aumento de RPM para o 2º e 3º trechos um pouco mais pronunciada, porém significativamente menor quando comparada com a variação do 1º trecho.

O quinto degrau realizado também consistiu no aumento da rotação dos motores vibratórios de 1.200 RPM para 1.800 RPM, sendo o resultado obtido apresentado na **Figura**

4.6. Considerando o interesse em avaliar a resposta transiente do teor de umidade residual dos sólidos retidos, optou-se por analisar os primeiros 30 segundos de medição após o degrau na rotação dos motores vibratórios.

Neste quinto degrau, é possível visualizar que o aumento do teor de umidade também ocorre em patamares, caracterizando uma resposta gradual ao aumento da RPM. Uma possível explicação para este comportamento seria a de que com o aumento da RPM dos motores vibratórios, os sólidos passariam a serem transportados com maior velocidade para fora da região compreendida pela interface entre a suspensão e o sólido retido (interface L/S), implicando em um menor tempo para o deságue. À medida que a posição da interface L/S recua com o aumento da RPM, o sólido tenta de se desprender mais rapidamente do meio aquoso, carregando consigo maior teor de umidade residual. Após transcorridos 30 segundos, o sólido atinge o teor intermediário de umidade residual (25,5%) no transiente considerado.

Figura 4.6 - Comportamento da umidade no 5º degrau de aumento de RPM



Fonte: Autoria própria (2025)

O modelo dinâmico semiempírico identificado do processo de deságue também foi inicialmente avaliado com base na resposta ao degrau de amplitude igual a +600 RPM aplicado à frequência de rotação dos motores vibratórios instalados na peneira. O comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido acoplado ao comportamento do adimensional de Fg foi modelado com base na análise da resposta dinâmica das duas variáveis

operacionais aos degraus aplicados na frequência dos motores vibratórios. Os valores dos parâmetros dos modelos identificados são apresentados na **Tabela 4.4**.

A análise dos resultados apresentados na **Tabela 4.5** com base nos valores dos parâmetros dos modelos permite verificar que a variação do teor de umidade em resposta ao aumento de RPM para o 2º trecho foi significativamente menor quando comparada com a variação do 1º trecho.

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados para 5º degrau de aumento de RPM

1º trecho*			2º trecho*		
$K_{P1} =$	0,0035	%/rpm	$K_{P2} =$	0,001067	%/rpm
$\tau_{P1} =$	4	seg.	$\tau_{P2} =$	0,5	seg.
$\theta_{P1} =$	0	seg.	$\theta_{P2} =$	10	seg.
(*) trecho inicial do aumento de umidade					
instante inicial = 0 seg.			instante inicial = 14 seg.		
instante final = 14 seg.			instante final = 30 seg.		

Fonte: Autoria própria (2025)

Uma análise comparativa dos valores de cada parâmetro para os modelos semiempíricos identificados permite avaliar a sensibilidade da resposta do teor de líquido residual no sólido retido ao aumento da rotação dos motores vibratórios. Na **Tabela 4.6** são apresentados os valores do parâmetro K_P que representa o ganho do processo; do parâmetro τ_P que representa a constante de tempo do processo e do parâmetro θ_P que representa o tempo morto envolvido nas respostas. Para fins de análise, foram considerados apenas os valores correspondentes ao 1º trecho (ou ao trecho único) de cada resposta.

Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros dos modelos identificados

teste	K_P (%/RPM)	τ_P (seg.)	θ_P (seg.)
1º degrau	0,067	3,3	1,7
2º degrau	0,011	2,4	9,5
3º degrau	0,010	2,5	5,5
4º degrau	0,0035	4	0,0
5º degrau	0,012	1,5	3,3
mediana	0,011	2,5	3,3

Fonte: Autoria própria (2025)

Analizando os valores do parâmetro K_P é possível verificar que em três dos cinco degraus estudados, os valores observados para este parâmetro foram bastante próximos, à exceção do 1º e do 4º degrau. No 1º degrau as telas de separação da peneira haviam acabado de

serem limpas, tendo sido desobstruídas as aberturas da tela de separação por meio do emprego de jatos de ar comprimido. Este fato pode ter contribuído diretamente para aumentar o ganho do processo (maior percentagem de remoção do líquido residual por RPM). Já no caso do 4º degrau, a significativa diminuição do valor do ganho do processo pode ter ocorrido devido ao “desaparecimento” do sólido presente na suspensão. Durante a operação da facilidade experimental, dependendo do valor da vazão alimentada à peneira – que era igual àquela retirada do tanque de mistura – acontecia de as pás do misturador não ficarem em contato com a suspensão (ocorria a situação de nível baixo no interior do tanque de alimentação). Isto favorecia a decantação do material sólido granular usado no fundo do tanque e, consequentemente, o menor transporte de sólidos para a peneira. Está seria a suspeita da razão pela qual o teor de umidade residual apresentou comportamento fora do esperado.

Analizando os valores do parâmetro τ_P é possível verificar que em todos os cinco degraus estudados, os valores observados para este parâmetro foram bastante próximos, à exceção do 4º degrau. Como já citado no parágrafo anterior, o “desaparecimento” do sólido presente na suspensão poderia ser a causa, haja vista o fato de que acarretaria um aumento no tempo requerido para que a variação de umidade fosse detectada.

Analizando os valores do parâmetro θ_P é possível verificar que foi o que apresentou maior variabilidade dentre todos os cinco degraus estudados. Chama a atenção o valor calculado deste parâmetro para o 2º degrau, que foi significativamente maior do que os demais. De maneira análoga, o valor calculado para este parâmetro correspondente ao 4º degrau também destoou dos demais valores. A justificativa para o caso do 4º degrau poderia estar associada ao “desaparecimento” do sólido como já anteriormente citado. Já para o valor calculado do parâmetro tempo morto correspondente ao 2º degrau a explicação do motivo do desvio em relação aos demais valores não é facilmente identificável. Poderia ser tanto uma demora do sistema de controle e aquisição de dados da peneira em coletar o valor da umidade quanto uma flutuação no valor da vazão alimentada à peneira, transportando momentaneamente uma quantidade menor de sólidos do que aquela definida para a condição de regime permanente.

4.3 FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO PROCESSO

A função de transferência do tipo *FOPDT* que representa o comportamento dinâmico do teor de líquido residual presente nos sólidos retidos em função da rotação dos motores vibratórios foi identificada com base na curva de reação do processo e é apresentada na **Equação 4.1**. Importante ressaltar que ela 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 rotação dos motores vibratórios.

$$\frac{U\%}{RPM} = \frac{0,011}{(2,5.s + 1)} \cdot e^{-3,3 \cdot s} \quad (4.1)$$

Os modelos identificados apresentam dinâmicas diferentes entre si o que tende a dificultar a sintonia dos parâmetros do controlador de umidade residual do material sólido granular retido na tela de separação.

Importante destacar, também, que a função de transferência apresentada na **Equação 4.1** representa a dinâmica do conjunto Fg e $U\%$, ou seja, a influência do adimensional Fg já está incluída na resposta do comportamento do teor de umidade residual do material sólido granular retido. Também é importante lembrar que a malha de controle do Fg estava sendo operada em modo manual quando da realização dos experimentos.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível avaliar e modelar matematicamente o comportamento dinâmico do teor de umidade residual em uma peneira vibratória industrial.

De modo geral, o teor de umidade residual foi diretamente proporcional à vibração aplicada. Uma possível explicação para esse comportamento está relacionada ao fato de que à medida que a RPM aplicada aos motores vibratórios aumenta, os sólidos são transportados a velocidades mais altas para fora da região compreendida pela interface entre a suspensão e o sólido retido (interface L/S), implicando um tempo mais curto para o deságue.

A variabilidade apresentada nos resultados experimentais é inerente ao processo e representa uma “medida” da dificuldade de coletar a amostra de material sólido granular sendo transportado sobre a tela de separação da peneira. Este fato motivou a realização da análise considerando os primeiros 30 segundos do transiente como uma maneira de “padronizar” o comportamento do sistema em função do tempo.

Os valores dos parâmetros identificados para os modelos semiempíricos estudados apresentaram valores levemente diferentes em resposta à perturbação do tipo PRBS aplicada, as quais podem estar relacionadas a fatores externos à peneira estudada, tais como: baixo nível de suspensão e agitação insuficiente no interior do tanque de alimentação.

Os parâmetros identificados para o modelo matemático global do processo de deságue se mostraram coerentes e adequados para explicar o comportamento da variável de processo de interesse, permitindo demonstrar a interdependência entre a rotação imposta aos motores vibratórios e o teor de umidade residual do sólido retido.

6. REFERÊNCIAS

- AADE. **Shale Shakers and Drilling Fluid Systems.** Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.
- AGUIRRE, L. A.. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- ALIBABA. *Hydrocyclone Drilling Mud Cleaner desander desilter.* [S.l.]: Alibaba, [2025]. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/Hydrocyclone-Drilling-Mud-Cleaner-desander-desilter-62383596268.html>. Acesso em: 07 de maio de 2025.
- 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, R. A.; HOCH, R. S. **Mechanical Treatment of Weighted Drilling Muds.** *Journal of Petroleum Technology*, v. 6, p. 39-42, 1954.
- CARVALHO, M. S. **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.
- WEG. **Inversor de Frequência CFW700.** Disponível em: <https://csaautomacao.com.br/store/inversor-de-frequencia-weg-cfw700-cfw700a05p0t4db20.html>. Acesso em: 07 de janeiro de 2025.
- DIRECT INDUSTRY. **Sensor de vibração ICP 622B01.** Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/pcb-piezotronics/product-111589-1115533.html>. Acesso em: 07 de janeiro de 2025.
- 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. E.; 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.

ENDRESS, A. **Solids control automation on the horizon with autonomous shaker, ultrasonic sensor in development**. Desenvolvida por Drilling Contractor, 2015. Disponível em: <https://drillingcontractor.org/solids-control-automation-on-the-horizon-with-autonomous-shaker-ultrasonic-sensor-in-development-36935>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2025.

FRANCO, N. B. **Cálculo numérico**. São Paulo: Pearson, 2012.

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.

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. **Process Modelling and Model Analysis**. London: Academic Press, 2001.

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

MARTIN, T. **Vacuum Degasser - an overview**. *ScienceDirect Topics*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vacuum-degasser>. Acesso em: 14 de abril de 2025.

MI-SWACO. **Mongoose Pro Shaker brochure**, 2017. Disponível em: <<https://www.slb.com/-/media/files/mi/brochure/mongoose-pro-shaker-brochure.ashx>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USB-6008 - Dispositivo de E/S multifunção**. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6008.html>. Acesso em: 14 de abril de 2025.

PEREIRA, M. S. **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.

PEREIRA JUNIOR, W. V. **Implementação de malha de controle de força-G acoplada à malha de controle de umidade em peneira vibratória [recurso eletrônico]**. 2021. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química,

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.484>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.

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 de janeiro de 2025.

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

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.

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

SILVEIRA, A. C. de M., COSTA, G. O., MELO, V. E. R. **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.

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

TR SOLIDS CONTROL. **Vertical Cutting Dryer**. 2021 – Disponível em: <http://www.trsolidscontrol.com/vertical-cutting-dryer/>. Acesso em: 14 de abril de 2025.

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.

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.