



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



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE MALHA DE CONTROLE DE FORÇA-G  
ACOPLADA À MALHA DE CONTROLE DE UMIDADE EM  
PENEIRA VIBRATÓRIA**

**WAGNER VICENTE PEREIRA JUNIOR**

**Uberlândia – MG**

**2021**



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



# **IMPLEMENTAÇÃO DE MALHA DE CONTROLE DE FORÇA-G ACOPLADA À MALHA DE CONTROLE DE UMIDADE EM PENEIRA VIBRATÓRIA**

**Autor: Wagner Vicente Pereira Junior**

**Orientador: Rubens Gedraite**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Modelagem, Controle e Otimização de Processos.**

**Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite**

**Uberlândia – MG**

**2021**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P436 2021	<p>Pereira Junior, Wagner Vicente, 1996- Implementação de malha de controle de força-G acoplada à malha de controle de umidade em peneira vibratória [recurso eletrônico] / Wagner Vicente Pereira Junior. - 2021.</p> <p>Orientador: Rubens Gedraite. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.484">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.484</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Gedraite, Rubens,1958-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Engenharia Química. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p>
--------------	---



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 13/2021, PPGEQ				
Data:	26 de agosto de 2021	Hora de início:	07:30	Hora de encerramento:	09:15
Matrícula do Discente:	11912EQU014				
Nome do Discente:	Wagner Vicente Pereira Junior				
Título do Trabalho:	Implementação de malha de controle de força-G acoplada à malha de controle de umidade em peneira vibratória				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Modelagem, Controle e Otimização de Processos Químicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Controle preditivo não-linear para transições operacionais robustas				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Rodrigo Sislian - IFSP/Campus Guarulhos; Sérgio Mauro da Silva Neiro - PPGEQ/UFU e Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Rubens Gedraite apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 09:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sislian, Usuário Externo**, em 26/08/2021, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Mauro da Silva Neiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o códigoverificador **2996042** e o código CRC **690E3AFA**.

---

**Referência:** Processo nº 23117.056213/2021-17

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para seguir meu caminho, e condições de continuar indo em busca dos meus sonhos.

Aos grandes pilares da minha vida:

Meus pais Wagner e Suzi, por serem meus grandes exemplos de superação.

Meus irmãos Patricia e Arthur por serem meus grandes companheiros de jornada.

Minha namorada Tamyres, por todo amor, carinho, apoio e compreensão, e por sempre me motivar a seguir em frente.

Agradeço também aqueles amigos que sempre estão comigo me fortalecendo.

Ao professor Rubens Gedraite, pelo grande apoio nos experimentos, na escrita dessa dissertação, no compartilhamento de conhecimentos e por ser um grande amigo.

Aos colegas Rafael Yuri, Vinicius Pimenta e Vinicius Lara pela ajuda na realização dos experimentos.

À Petrobras, pelo financiamento e suporte da pesquisa.

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia por ter alavancado minha vida em termos técnicos e como pessoa.

“Seja curioso. Leia muito. Experimente coisas novas. Muito do que as pessoas chamam de inteligência apenas se resume a curiosidade.”

- *Aaron Swartz*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	I
LISTA DE TABELAS .....	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT .....	V
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	3
2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO .....	4
2.2.1 Finalidades do fluido de perfuração .....	4
2.2.2 Características desejáveis .....	5
2.2.3 Tipos de fluidos de perfuração .....	5
2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS .....	5
2.3.1 Peneiras vibratórias.....	6
2.3.2 <i>Mud cleaner</i> .....	6
2.3.3 Centrífugas verticais ( <i>Cuttings Dryers</i> ).....	7
2.3.4 Centrífugas horizontais (Decantadoras) .....	7
2.3.5 Degaseificadores.....	8
2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO .....	8
2.4.1 Funcionamento .....	8
2.4.2 Tipos de movimentos .....	9
2.4.3 Variáveis Operacionais .....	11
2.4.4 Automação e controle de peneiras vibratórias.....	13
2.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	16
2.6 SENSORES DE UMIDADE .....	21
2.6.1 Sensor de Umidade Resistivo .....	21
2.6.2 Sensor de Umidade Capacitivo.....	22
2.6.3 Sensores de umidade industriais.....	23

3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL .....	25
3.2 SISTEMA DE CONTROLE DO ADIMENSIONAL DE FORÇA-G DA PENEIRA .....	26
3.3 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE FORÇA-G DA PENEIRA NO SIMULINK™ .....	30
3.4 TESTES DE MEDIÇÃO DE UMIDADE.....	33
3.4.1 Método indireto de medição .....	33
3.4.2 Identificação da dinâmica do processo no estado estacionário .....	34
3.4.3 Método direto de medição .....	36
3.5 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE UMIDADE RESIDUAL NO SIMULINK™ .....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1 MODELO ESTÁTICO AJUSTADO DO TEOR DE UMIDADE.....	40
4.2 MODELO DINÂMICO DO COMPORTAMENTO DO ADIMENSIONAL DE FORÇA-G.....	43
4.3 TESTE DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE FORÇA-G.....	44
4.4 SIMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE BASEADA NO TEOR DE UMIDADE .....	47
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	53
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	53
REFERÊNCIAS .....	55

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Diagrama de blocos do sistema de controle otimizado .....	2
<b>Figura 2.1</b> - A circulação de lama durante a perfuração de um poço de petróleo.....	3
<b>Figura 2.2</b> - Fluido de perfuração retornando para a unidade de controle de sólidos. ....	4
<b>Figura 2.3</b> - Conjunto de equipamentos de uma unidade de controle de sólidos tradicional ...	6
<b>Figura 2.4</b> - Centrífuga vertical .....	7
<b>Figura 2.5</b> - Centrífuga horizontal .....	8
<b>Figura 2.6</b> - Peneira vibratória típica.....	9
<b>Figura 2.7</b> - Tipos de movimentos vibratórios: .....	10
<b>Figura 2.8</b> - Formas de abertura quadrada e retangular, simples e em camadas .....	11
<b>Figura 2.9</b> - Ilustração das regiões de piscina e de secagem de sólidos retidos .....	12
<b>Figura 2.10</b> - Vida útil dos equipamentos testados .....	14
<b>Figura 2.11</b> - Peneira vibratória equipada com o sensor de vibração.....	15
<b>Figura 2.12</b> - Processo representado a partir de um modelo .....	17
<b>Figura 2.13</b> - Sensor de umidade resistivo .....	22
<b>Figura 2.14</b> - Sensor de umidade capacitivo .....	23
<b>Figura 2.15</b> - Funcionamento de um sensor de umidade NIR.....	24
<b>Figura 2.16</b> - Nível de absorbância e comprimento de onda de cada constituinte na amostra	24
<b>Figura 3.1</b> - Ilustração da unidade experimental utilizada .....	25
<b>Figura 3.2</b> - Peneira vibratória Mongoose pro Shaker .....	26
<b>Figura 3.3</b> - Aspecto da solução formada.....	26
<b>Figura 3.4</b> - Sensor piezoelétrico utilizado na medição da vibração.....	27
<b>Figura 3.5</b> - Placa NI USB-6008 .....	27
<b>Figura 3.6</b> - Programação do aplicativo desenvolvido no LabView™ .....	27
<b>Figura 3.7</b> - Programação do controlador desenvolvido no LabView™.....	28
<b>Figura 3.8</b> - Representação simplificada de uma malha de controle fechada por realimentação .....	30
<b>Figura 3.9</b> - Sistema para alteração dos níveis de inclinação .....	34
<b>Figura 3.10</b> – Inversor de frequência utilizado para alteração da vazão da bomba.....	34
<b>Figura 3.11</b> – Função que relaciona o sinal do inversor de frequência com a vazão através da bomba .....	35
<b>Figura 3.12</b> - Amostras para calibração do sensor .....	37
<b>Figura 3.13</b> - Curva de calibração do sensor capacitivo.....	37

<b>Figura 3.14</b> - Amostrador desenvolvido para medição contínua de umidade .....	38
<b>Figura 3.15</b> - Interface gráfica para ajuste do PID Tuner.....	39
<b>Figura 4.1</b> - Umidade em função de Força-G (X1) e Inclinação (X2) .....	41
<b>Figura 4.2</b> - Umidade em função de Força-G (X1) e Vazão mássica (X3).....	41
<b>Figura 4.3</b> - Umidade em função de Inclinação (X2) e Vazão mássica (X3).....	42
<b>Figura 4.4</b> - Diagrama de simulação do cálculo do teor de umidade residual.....	43
<b>Figura 4.5</b> - Comportamento temporal do adimensional de força-g .....	44
<b>Figura 4.6</b> - Diagrama de simulação do sistema de controle do adimensional de <i>força-g</i> .....	45
<b>Figura 4.7</b> - Resposta do controlador a degrau aplicado no <i>setpoint</i> .....	46
<b>Figura 4.8</b> - Diagrama de simulação para o 1º caso .....	48
<b>Figura 4.9</b> – Resposta a degraus no valor do <i>setpoint</i> do controlador de umidade .....	48
<b>Figura 4.10</b> - Resposta da <i>força-g</i> aos degraus no valor do <i>setpoint</i> do controlador de umidade .....	49
<b>Figura 4.11</b> - Resposta a degrau de amplitude 0,1 no adimensional de <i>força-g</i> .....	50
<b>Figura 4.12</b> - Vazão pulsante simulada .....	50
<b>Figura 4.13</b> - Diagrama de simulação para o 3º caso .....	51
<b>Figura 4.14</b> - Resposta da umidade para o 3º caso.....	51
<b>Figura 4.15</b> - Comportamento da variável <i>força-g</i> frente as perturbações impostas ao sistema .....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Função de transferência de um sistema integrador.....	19
<b>Tabela 2.2</b> - Função de transferência de primeira ordem .....	19
<b>Tabela 2.3</b> - Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (FOPDT).....	19
<b>Tabela 2.4</b> - Função de transferência de segunda ordem.....	20
<b>Tabela 3.1</b> - Parâmetros do controlador de força-g - Método da síntese direta/Método heurístico .....	33
<b>Tabela 3.2</b> - Variáveis e níveis do PCC.....	35
<b>Tabela 3.3</b> - Frequência versus vazão mássica .....	35
<b>Tabela 3.4</b> - Matriz do planejamento do PCC utilizado .....	36
<b>Tabela 3.5</b> - Calibração do sensor capacitivo .....	37
<b>Tabela 3.6</b> - Valores dos parâmetros de controle de umidade residual da peneira vibratória .	39
<b>Tabela 4.1</b> - Umidade expressa em (%) para as variáveis codificadas.....	40
<b>Tabela 4.2</b> - Erro relativo entre a umidade estática simulada e a umidade medida.....	43
<b>Tabela 4.3</b> - ERQA, sobressinal e tempo de acomodação das respostas do controle.....	47

## RESUMO

O processo de perfuração de um poço de petróleo é composto de diversos subprocessos, entre eles, o de controle de sólidos, no qual é realizada a separação do cascalho proveniente do poço e o fluido de perfuração que foi injetado principalmente para lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração. Esse fluido deve ser recondicionado para poder ser reutilizado, passando por diversas etapas de separação, sendo a primeira delas, a etapa de peneiramento vibratório, a qual pode ser considerada a mais importante, visto que os outros equipamentos de separação de sólidos podem operar eficientemente apenas se essa etapa estiver funcionando de forma adequada. O objetivo desse trabalho foi avaliar o processo de peneiramento vibratório e verificar como o teor de umidade se comporta frente ao efeito de variáveis independentes em condições estacionárias e também avaliar o efeito da força-g em regimes transientes. Utilizando-se de uma lama formada por uma suspensão de areia, água e goma xantana (com densidade e reologia semelhantes ao fluido real), foi feito um planejamento composto central com duas réplicas no ponto central, totalizando 16 experimentos. Com isso foi identificado um modelo que representa o comportamento do teor de umidade em estado estacionário frente as variáveis independentes: força-g, inclinação de tela e vazão de alimentação. O teor de umidade se mostrou diretamente proporcional às variáveis força-g e vazão de alimentação, e inversamente proporcional à variável inclinação. O ponto de operação da peneira que proporcionou a obtenção de sólidos menos úmidos foi força-g (1,3), inclinação (2,5°) e vazão de lama (55,9 kg/min). O ponto de operação da peneira que proporcionou a obtenção de sólidos mais úmidos foi força-g (2,3), inclinação (2,0°) e vazão de lama (300,0 kg/min). O modelo estático identificado juntamente com um modelo dinâmico de força-g obtido experimentalmente foram utilizados para simular o efeito da variável força-g em estado estacionário no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™, adotando uma inclinação de 2° e vazão de 76,5 kg/h. Com isso foi possível definir uma estratégia de controle de força-g baseada em um setpoint de umidade e ajustar os parâmetros para simular possíveis perturbações impostas ao sistema.

**Palavras-chave:** Peneiramento vibratório, Separação sólido- líquido, Perfuração de poços de petróleo, Força-g

## ABSTRACT

The drilling process of an oil well is composed of several sub-processes, including solids control, in which the gravel coming from the well is separated from the drilling fluid that was injected mainly to lubricate and cool the drill during drilling. This fluid must be reconditioned to be reused, going through several separation steps, the first of which is the vibrating sieving step, which can be considered the most important, since other solids separation equipment can operate efficiently only if this step is working properly. The objective of this work was to evaluate the vibratory sieving process and verify how the moisture content behaves against the effect of independent variables in stationary conditions and also to evaluate the effect of g-force in transient regimes. Using a slurry formed by a suspension of sand, water and xanthan gum (with density and rheology similar to the real fluid), a central composite plan was made with two replicas at the central point, totaling 16 experiments. Thus, a model was identified that represents the behavior of the moisture content at steady state against the independent variables: g-force, screen inclination and feed flow. The moisture content was directly proportional to the g-force and feed flow variables, and inversely proportional to the slope variable. The operating point of the sieve that provided less moist solids was g-force (1.3), inclination (2.5°) and mud flow (55.9 kg/min). The sieve operating point that provided the wetter solids was g-force (2.3), slope (2.0°) and mud flow (300.0 kg/min). The static model identified together with a dynamic g-force model obtained experimentally were used to simulate the effect of the steady-state g-force variable in the Simulink™ environment of the Matlab™ application, adopting a slope of 2° and a flow rate of 76.5 kg/h. Thus, it was possible to define a g-force control strategy based on a humidity set point and adjust the parameters for possible disturbances imposed on the system.

**Keywords:** Vibrating screen, Solid-liquid separation, Drilling of oil wells, g-Force

## 1. INTRODUÇÃO

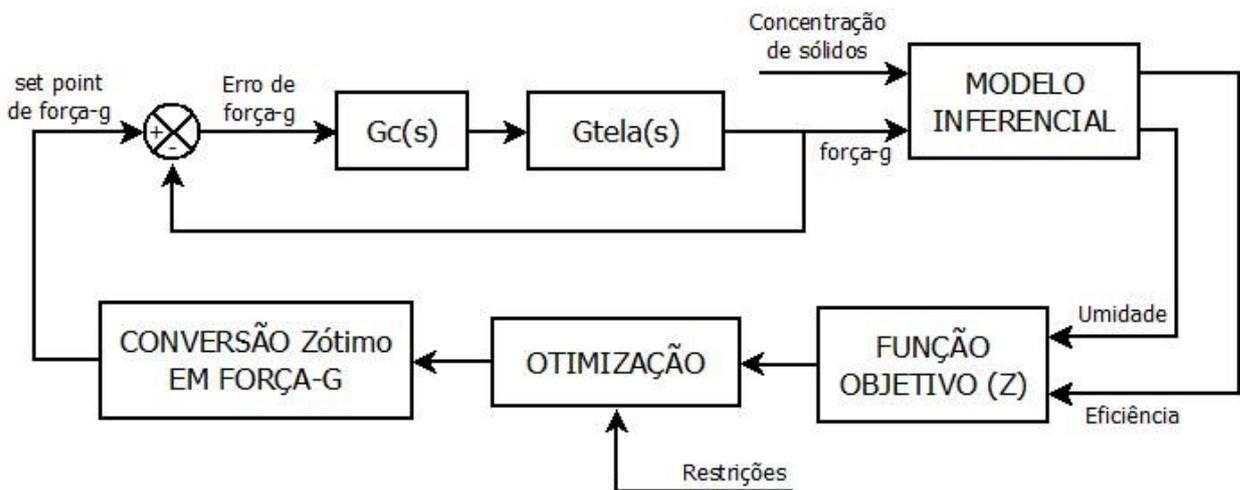
A utilização de sistemas eletrônicos digitais em controle e automação de processos se iniciou, praticamente, com o próprio advento dos computadores digitais. Já no começo dos anos 60, instalações industriais introduziram o computador como importante dispositivo para controle. Durante aproximadamente 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 et al., 2019) (OGATA, 2000)**. 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 hidrociclones (desareiaadores 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 prever 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 et al., 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., 2016)**.

A busca de um ponto ótimo de operação que englobe modelos matemáticos semiempíricos 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., 2016). Na Figura 1.1 é apresentado o diagrama de blocos correspondente.

Figura 1.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle otimizado



Fonte: Adaptação de Freitas et al. (2019)

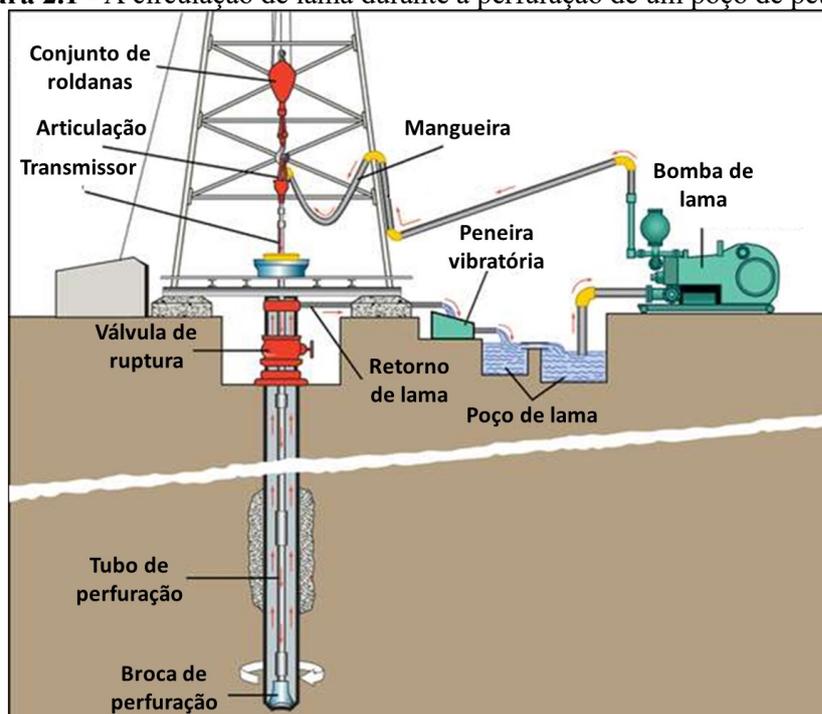
Este trabalho tem como objetivo a avaliação da relação entre a intensidade da vibração aplicada à peneira vibratória em escala industrial, determinada a partir do valor medido do adimensional de força-g e do valor simulado do teor de umidade do material retido sobre a tela de separação da peneira.

## 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, 2004).

Figura 2.1 - A circulação de lama durante a perfuração de um poço de petróleo.



Fonte: Adaptação de ENCICLOPÉDIA BRITANNICA (2012)

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 em uma unidade de controle de sólidos (ASME, 2005).

**Figura 2.2** - Fluido de perfuração retornando para a unidade de controle de sólidos.



Fonte: Adaptação de AFRICAN DRILLING FLUIDS (2020)

### 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).

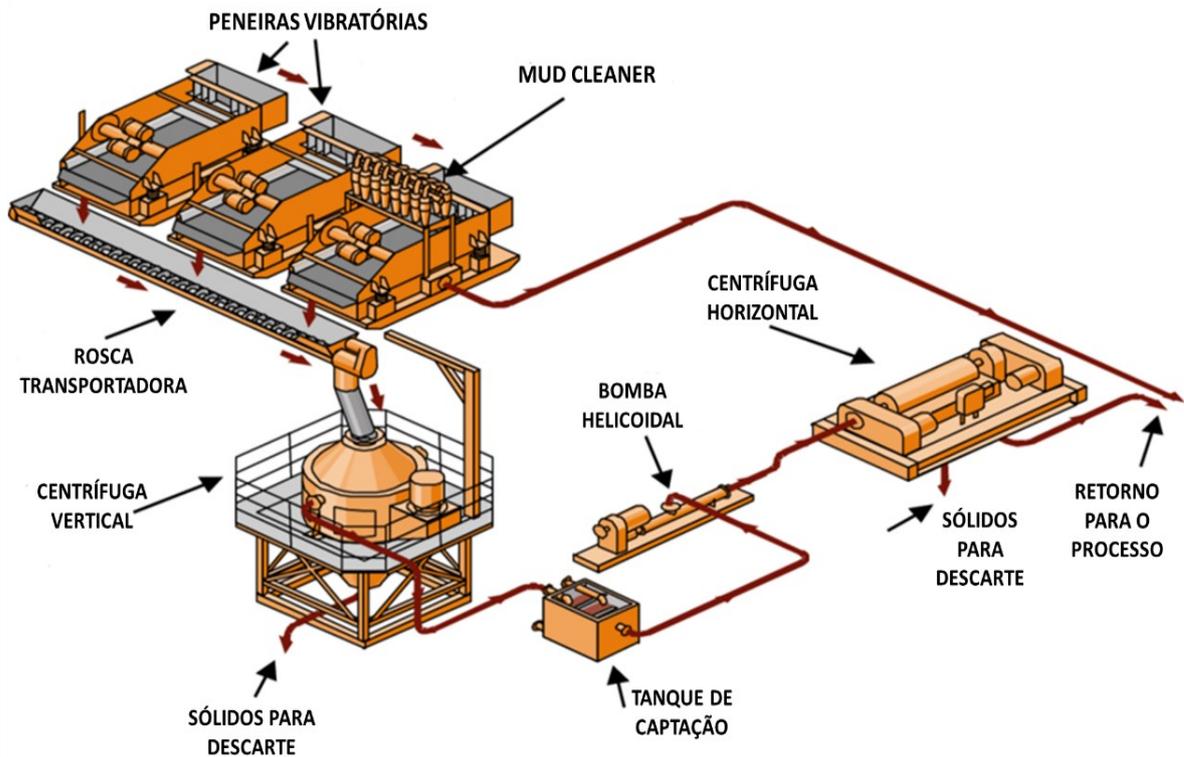
## 2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS

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, 2004).

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

Na **Figura 2.3** é mostrado um conjunto de equipamentos que compõem uma unidade de controle de sólidos tradicional. Esses e outros equipamentos serão detalhados a seguir.

**Figura 2.3** - 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 74  $\mu\text{m}$  (cascalhos e grãos maiores que areia) que ficam retidas sobre a tela, deixando que uma grande quantidade do fluido de perfuração passe pela tela 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. Conseqüentemente, são considerados os dispositivos de controle de sólidos mais importantes em uma sonda de perfuração (HOBEROCK, 1980; RAJA, 2012).

### 2.3.2 Mud cleaner

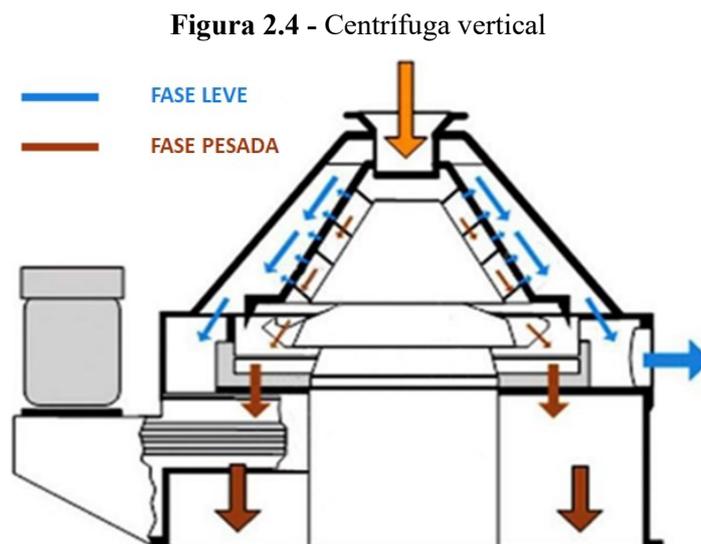
O *Mud cleaner* é um equipamento híbrido constituído por hidrociclones montados sobre uma tela vibratória. Sua função é recuperar parte do material, composta por aditivos, e retorná-los ao fluido de perfuração para reduzir custos (THOMAS, 2001).

O fluido de perfuração passa por uma série de hidrociclones 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 óleo menor do que 5% em peso úmido). 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 despreendido do sólido, muitas vezes valioso, se junta ao líquido separado nos demais equipamentos e retorna ao processo (MI-SWACO, 2017). Na **Figura 2.4** é apresentada uma representação simplificada de uma centrífuga vertical.

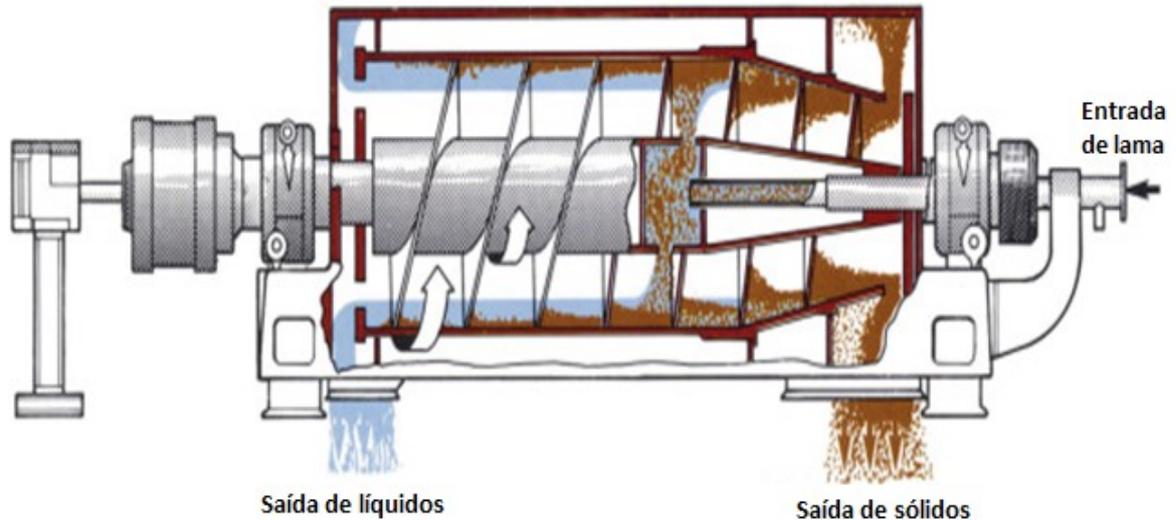


Fonte: Adaptação de *TR Solids Control* (2020)

### 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 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; HOCL, 1954).

Figura 2.5 - Centrífuga horizontal



Fonte: Adaptação de **Seán Moran, 2017**

### 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 escoam por chapas defletoras (AADE, 1999).

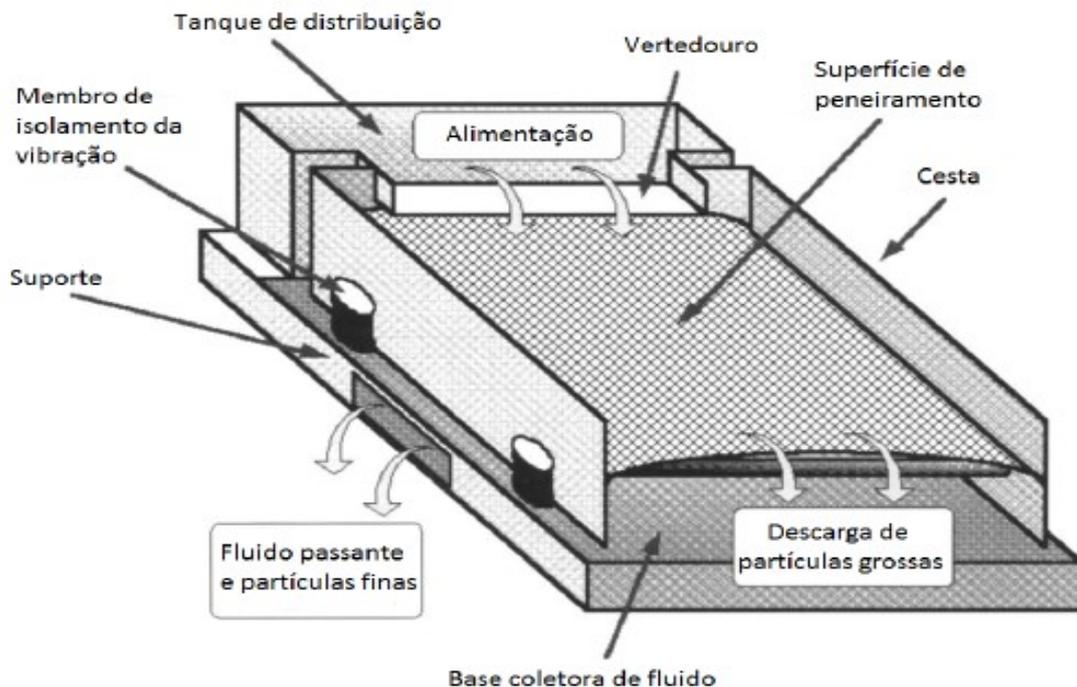
## 2.4 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

### 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 motovibradores, 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 2.6** é mostrado um exemplo típico de peneira vibratória.

**Figura 2.6 - Peneira vibratória típica**



Fonte: Adaptação de AADE (1999)

O cascalho é então encaminhado para uma unidade de tratamento para eliminar os fluidos contaminantes antes de ser lançado 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).

### 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.

O movimento elíptico balanceado é proporcionado ao se adaptar um único motovibrador acima do centro de massa da peneira, tal orientação 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,1990).

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

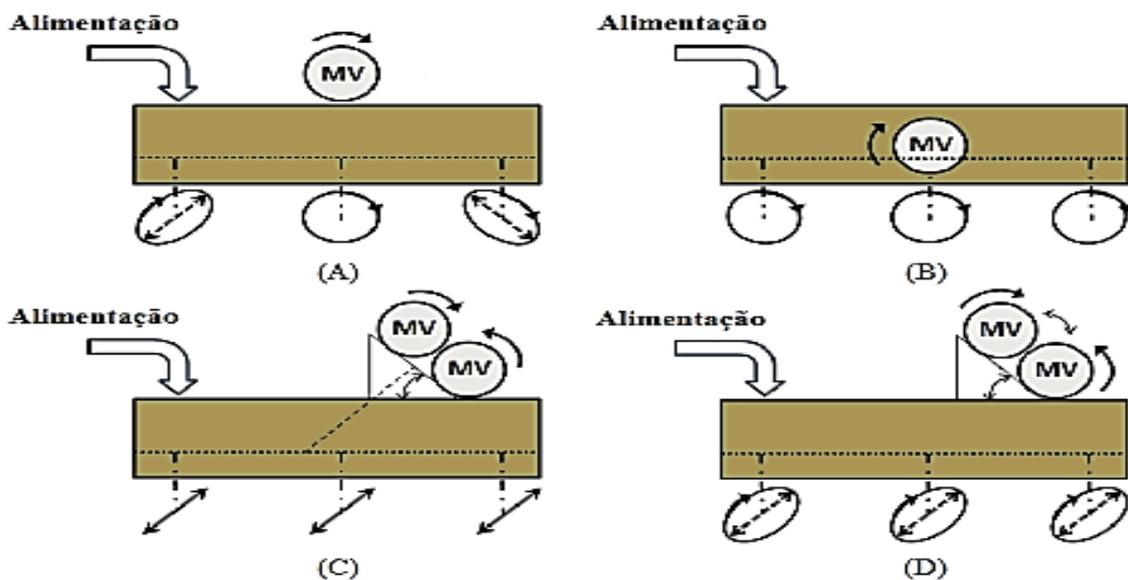
Em uma tentativa de aperfeiçoar ainda mais o processo foram desenvolvidas peneiras vibratórias com dois motovibradores, girando em sentido contrário, localizados entre o centro e a região de descarte, montados de forma paralela e mantendo uma inclinação de 45° com a tela. Isso melhora a capacidade de processamento de cascalho da peneira, permitindo o uso de telas mais finas e reduzindo o desgaste das mesmas. 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 motovibradores. 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.

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)

## 2.4.3 Variáveis Operacionais

### 2.4.3.1 Teor de sólidos da alimentação

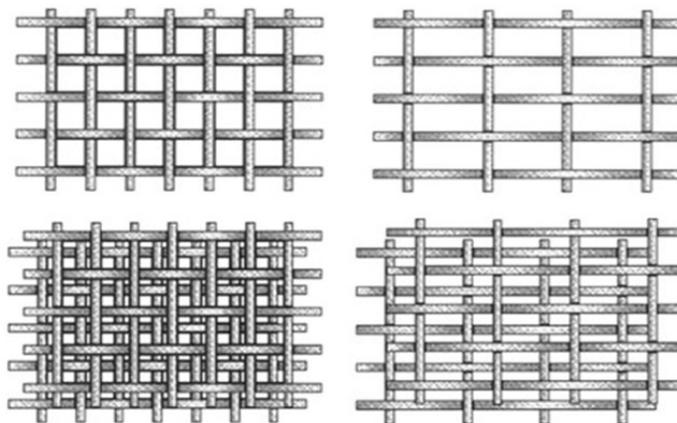
Os sólidos competem com o fluido por aberturas na tela da peneira. Assim, teoricamente, quanto maior o teor de sólidos, maior é a competição, causando um efeito negativo na capacidade e na eficiência da peneira (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

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 um aumento na concentração, 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 forma de abertura, que é determinada pela maneira em que a mesma é construída. Caso possua o mesmo número de fios na horizontal e vertical por polegada linear, são caracterizadas como aberturas quadradas. 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 2.8** - Formas de abertura quadrada e retangular, simples e em camadas



Fonte: Adaptação de AADE (1999)

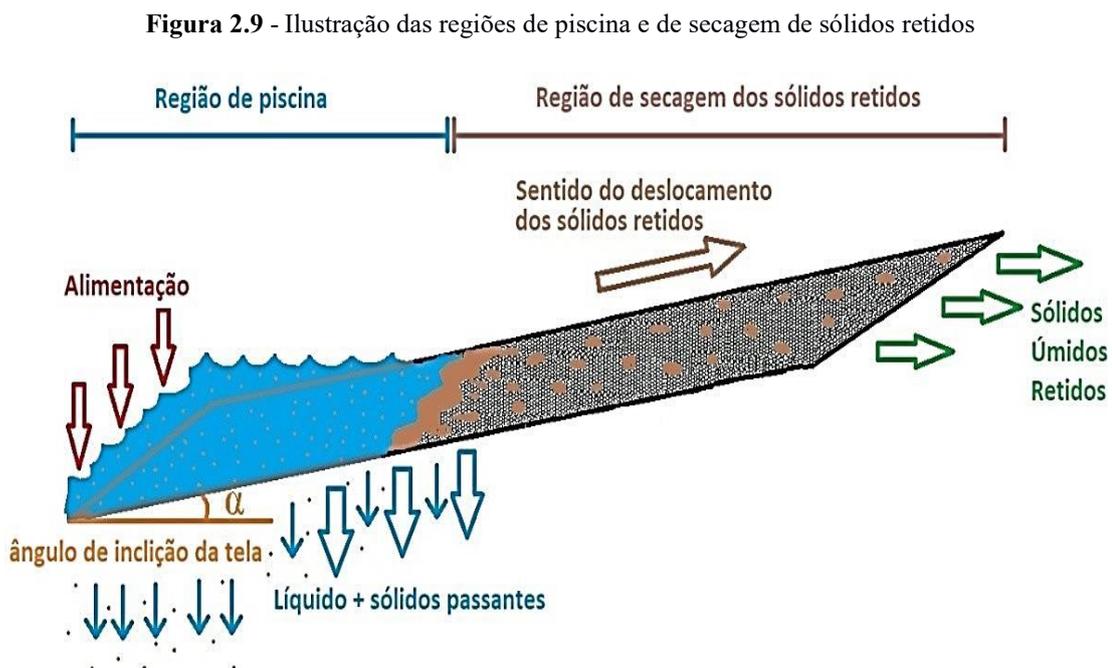
Outro ponto importante é o tamanho da abertura da tela, caracterizada pela distância entre os fios do tecido e expresso normalmente em *microns* ( $\mu m$ ). Essa

abertura deve estar diretamente relacionada à granulometria e à 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 ( $\phi$ ) em *microns*, em função do número de *mesh* (#M) e do diâmetro do fio da tela ( $d_w$ ), em polegadas.

$$\phi = 25,4 \left( \frac{1}{n} - d \right) \quad (2.1)$$

### 2.4.3.3 Inclinação da tela

A inclinação da tela está relacionada com o transporte dos sólidos e capacidade de passagem do líquido através da mesma. Quanto maior a inclinação da tela, menor a região de piscina, o que facilita a passagem de fluido pela tela, porém, oferece resistência maior ao deslocamento dos sólidos, diminuindo a vida útil da tela. Quanto menor a inclinação, mais a região de piscina avança sobre a tela, 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). A **Figura 2.9** ilustra a formação destas duas regiões citadas.



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

#### 2.4.3.4 Vibração

O objetivo da vibração imposta em peneiras vibratórias é de impulsionar as partículas de modo a transportá-las até a descarga e também fazer com que as partículas menores e o líquido agregado passem pelas aberturas da tela. Porém, a vibração excessiva pode fazer com que o sólido seja transportado de forma brusca, prejudicando a separação, e também faz com que a vida útil da tela seja reduzida. Altas vibrações são utilizadas para altas vazões de alimentação (WILLS; NAPIER-MUNN,2006).

Na literatura, uma forma usual de se medir a intensidade de vibração é através da força-g ( $F_g$ ), definida pela razão entre a aceleração vibracional e aceleração gravitacional, apresentada pela **Equação 2.2**.

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

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

$$A = \frac{w \cdot e}{W} \quad (2.3)$$

Sendo ( $w$ ) a massa do corpo excêntrico, ( $e$ ) definida como a excentricidade e ( $W$ ) a massa do cesto.

Portanto, para manter o valor da força-g 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 de força-g que altera o valor deste manipulando a frequência de rotação dos motores (**FREITAS, 2017**).

#### 2.4.4 Automação e controle de peneiras vibratórias

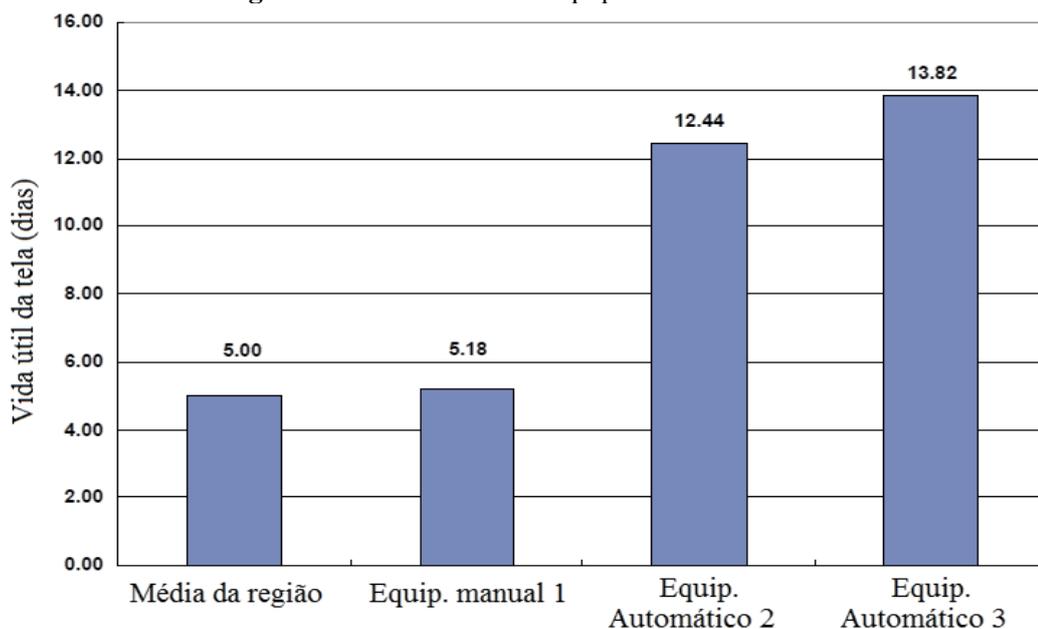
Com o aumento da competição, regulamentação ambiental e trabalhista, torna-se mais difícil manter as especificações de qualidade do produto final. Nesse cenário se insere o controle de processos, que busca manter o sistema a uma desejada condição de operação, segurança e eficiência, satisfazendo normas ambientais e garantindo a qualidade (**SEBORG**

et al., 2019). A seguir, serão 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  $\frac{3}{4}$  da área da tela se encontra inundada pelo fluido de perfuração, restando apenas  $\frac{1}{4}$  da peneira destinada para secagem do sólido retido. É comum que operações com nível de fluido maior causem perda de material. Bem como, se o processo operar abaixo do nível ótimo, a vida útil da peneira é reduzida, visto que a falta de lubrificação da tela acarreta uma menor vida útil.

Buscando essa otimização, **Scott (2006)** propõe um sistema de controle que ajusta o ângulo de inclinação da peneira. Sensores medem o nível de líquido sobre a tela e, se o nível é diferente do *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 controle diminuirá o ângulo de inclinação. Caso contrário, se o nível de fluido está maior que o desejado, o controle aumentará o ângulo de inclinação, se essa inclinação já se encontrar no nível máximo, o sistema aumentará também a força-g da peneira. Esse sistema foi testado por sete meses em operações de campo e se mostrou eficiente, visto que aumentou consideravelmente a vida útil das telas utilizadas. Na **Figura 2.10** é apresentada uma comparação da vida útil de telas utilizadas por dois equipamentos automatizados com um equipamento manual, considerando o valor médio estimado para a região onde o estudo foi realizado.

**Figura 2.10 - Vida útil dos equipamentos testados**

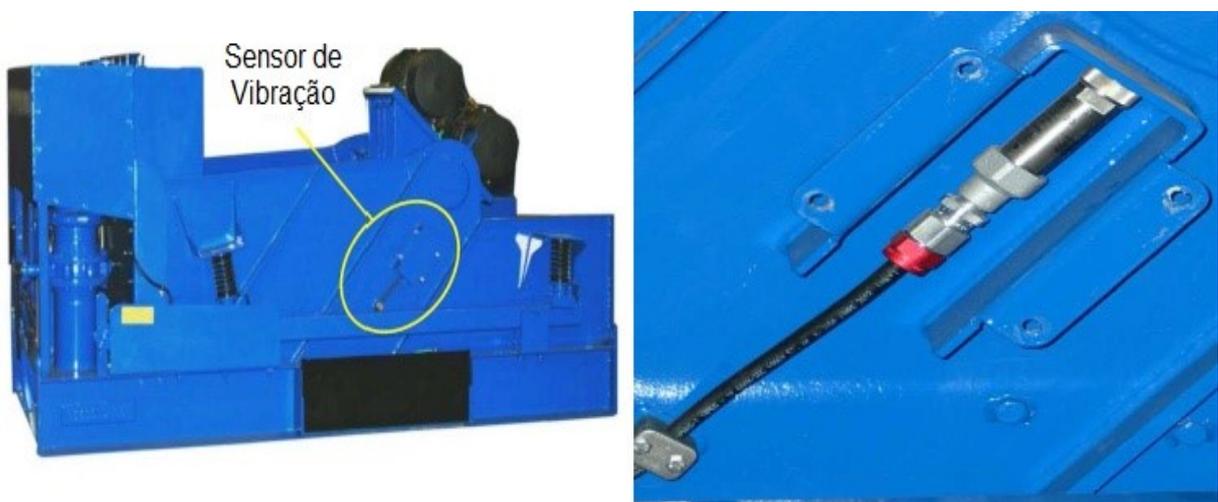


Fonte: Adaptação de **Scott (2006)**

Estudos realizados por **Dorry (2010)** sugerem que a intensidade do movimento de vibração da tela de 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 uma força 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 e o deságue do sólido retido (**DORRY, 2010**).

Para reduzir o efeito da vazão de alimentação sobre o valor do adimensional de força-g da peneira, **Dorry (2010)** propõe um sistema de controle que varia a força resultante referente à vibração para manter a aceleração da cesta constante. Nessa proposta, o valor do adimensional de força-g medido é realimentado ao sistema de controle por meio do emprego de um sensor de vibração. O sensor mede a vibração da peneira e envia um sinal elétrico proporcional a essa medida para o controlador, que interpreta esse sinal como uma porcentagem 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 força-g, o sistema é programado para operar em uma frequência de 60 Hertz, 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 2.11** é apresentado o equipamento utilizado pelo autor, destacando o sensor utilizado.

**Figura 2.11** - Peneira vibratória equipada com o sensor de vibração



Fonte: Adaptação de **Dorry (2010)**

**Dorry e Dufilho (2012)** propõem uma melhoria para o modelo apresentado anteriormente. A primeira geração desse controlador possuía três posições de força-g desejada e o operador devia escolher o *set point* a partir de suas interpretações das condições do fluido e do andamento da perfuração. **Dorry e Dufilho (2012)** afirmam que em várias situações, os operadores se esqueciam de alterar o *set point*, levando a perda do fluido, ou assumiam que a aceleração máxima era o ponto ótimo de operação, diminuindo a vida útil da peneira. Foi proposta então uma segunda geração de sistema de controle. O controlador automaticamente ajusta o *set point* de força-g 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 alto desempenho. O sistema *MultiG Shaker*, apresentado ao mercado em 2015, é capaz de operar com valores do adimensional de força-g compreendidos entre 8 e 50g, sendo relevante destacar o fato de que peneiras convencionais costumam ser operadas com valores não superiores a 9g. Nesse equipamento, o operador seleciona o valor do adimensional de força-g 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 do adimensional de força-g, de inclinação da tela, e do ângulo e 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.

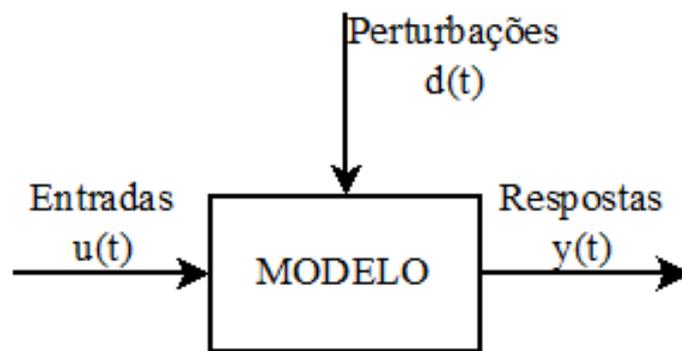
## **2.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

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 et al., 2019). Seborg et al., (2019) comparam os termos simulação e identificação de sistemas. Com base na **Figura 2.12**, 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 2.12** - Processo representado a partir de um modelo



Fonte: Adaptação de SEBORG et al., (2019)

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 aquisição 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 transferências 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 et al., 2019). A Equação 2.4 ilustra a representação típica de uma função de transferência.

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

Na qual,  $G(s)$  é uma função de transferência genérica,  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  são coeficientes constantes,  $s$  é a variável da transformada de Laplace,  $m$  e  $n$  correspondem às ordens do numerador e denominador respectivamente e  $\theta$  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 análogas. Os parâmetros utilizados nessas expressões são  $K$  (conhecido como ganho da função de transferência),  $\tau$  (constante de tempo),  $\theta$  (tempo morto) e  $\zeta$  (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 pela 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  $y$  e  $y(0^-)$  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**.

$$\left. \frac{d}{dt} \left( \frac{y}{KM_{step}} \right) \right|_{t=0} = \frac{1}{\tau} \quad (2.6)$$

**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: Adaptação de Seborg et al., (2019)

**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	$y(t) = K \cdot M_{step} \cdot \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)$

Fonte: Adaptação de Seborg et al., (2019)

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

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial	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 $t \geq \theta$ $y(t) = y_0 + K \cdot M_{step} \cdot \left( 1 - e^{-(t-\theta)/\tau} \right)$

Fonte: Adaptação de Seborg et al., (2019)

**Tabela 2.4** - Função de transferência de segunda ordem

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial	$\tau^2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$
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	<p style="text-align: center;">Para <math>\zeta &gt; 1</math></p> $y(t) = K \cdot M_{step} \cdot \left\{ 1 - e^{-\zeta t/\tau} \left[ \cosh\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t\right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sinh\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t\right) \right] \right\}$ <p style="text-align: center;">Para <math>\zeta = 1</math></p> $y(t) = K \cdot M_{step} \left[ 1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{-t/\tau} \right]$ <p style="text-align: center;">Para <math>0 \leq \zeta &lt; 1</math></p> $y(t) = K \cdot M_{step} \left\{ 1 - e^{-\zeta t/\tau} \cdot \left[ \cos\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t\right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sen\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \cdot t\right) \right] \right\}$

Fonte: Adaptação de **Seborg et al., (2019)**

Outro método é a observação do momento que a resposta alcança 63,2% da variação total proporcionada pelo degrau, representada pela **Equação 2.7 (AGUIRRE, 2007; SEBORG et al., 2019)**.

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

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 et al., 2019).

## 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, capacitância, 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 possibilitarem uma contínua repetição das medições. Contudo, a margem de erro das leituras ainda representa um desafio. Os sensores mais utilizados são os baseados na capacitância elétrica e na resistência elétrica (CARVALHO, 2016).

### 2.6.1 Sensor de Umidade Resistivo

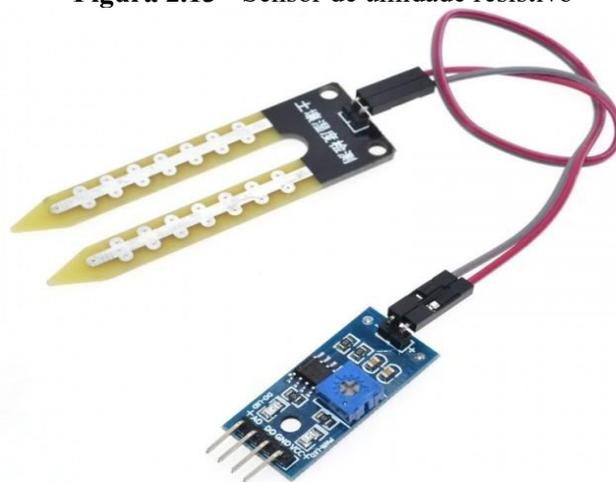
O sensor de umidade resistivo utiliza o método dos blocos de resistência elétrica e funciona monitorando a variação de resistência elétrica em dois eletrodos posicionados no solo. A resistência elétrica é inversamente proporcional a umidade de água, consequentemente a concentração da água diminui a resistência elétrica do sensor (SILVEIRA et al., 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 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 et al., 2019). Na **Figura 2.13** é apresentado o sensor em questão.

**Figura 2.13** - Sensor de umidade resistivo



Fonte: Adaptação de Silveira et al. (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 2.14** é apresentado esse modelo de sensor.

**Figura 2.14** - Sensor de umidade capacitivo



Fonte: Adaptação de **Silveira et al. (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).

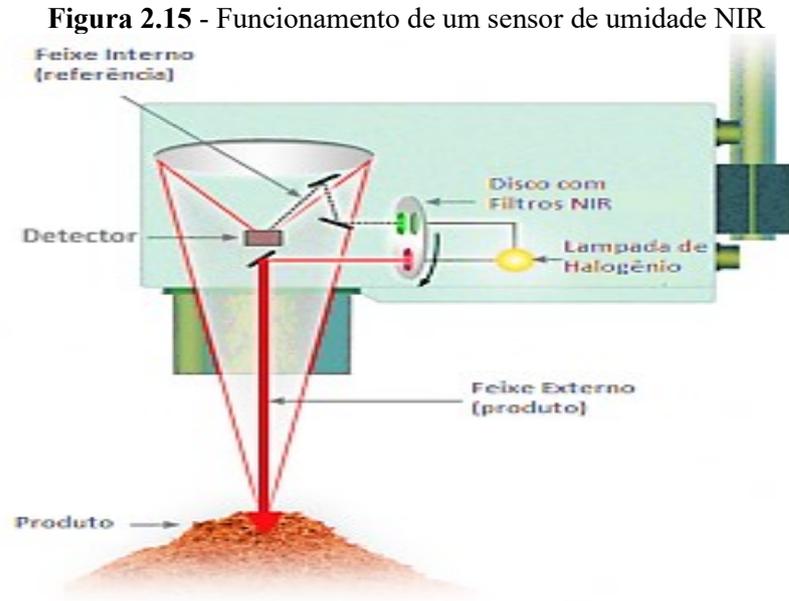
A maior parte dos sensores comercialmente disponíveis é baseada em óxidos metálicos, alumina e cerâmicas. Dependendo do tipo de material utilizado esses sensores podem ser caros e/ou requererem alto custo de manutenção (BAI, SHI, 2007).

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 específico comprimento de onda é parcialmente absorvido pela água contida no produto e refletido de forma inversamente proporcional (PROCESS SENSORS, 2013).

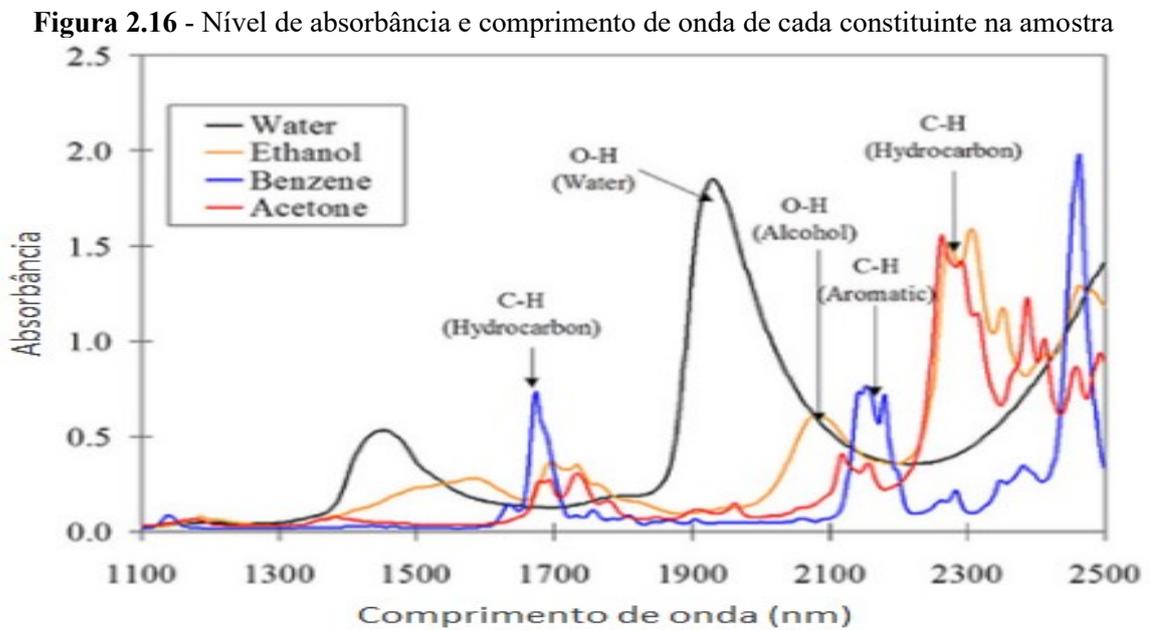
A energia resultante desse processo óptico é coletada por um detector de alta precisão e quantificada eletronicamente para ser convertida em leitura percentual de umidade, como é mostrado na **Figura 2.15**.

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 (1940 e 1420 nm) em água, CH (2340 nm) em orgânicos e óleos e NH em proteínas (PROCESS SENSORS, 2013). A quantidade do constituinte a ser

medido é proporcional ao nível de absorvância nesses comprimentos de onda específicos, como é mostrado na **Figura 2.16**.



Fonte: Adaptação de **PROCESS SENSORS (2013)**



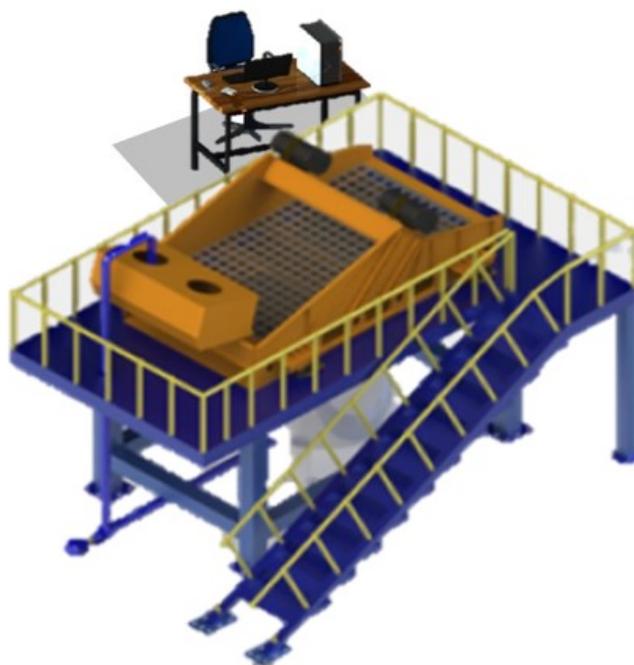
Fonte: Adaptação de **PROCESS SENSORS (2013)**

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 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 aço carbono com 3 m de altura e piso com área de 15 m<sup>2</sup> para a operação.

**Figura 3.1** - Ilustração da unidade experimental utilizada



Fonte: O autor (2021)

Na parte superior da bancada encontra-se uma peneira vibratória *Mongoose pro Shaker*, modelo mostrado na **Figura 3.2**, com área de peneiramento de 2,73 m<sup>2</sup> e dois motovibradores em contra rotação de 1800 RPM e 2,5 cv cada. Tal equipamento 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 os dados disponíveis 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, com motor WEG de 15 cv.

Para a realização dos experimentos, foi preparada uma suspensão sólido-líquida composta de areia, água e 0,1% em massa de goma xantana. A concentração volumétrica de

sólidos da suspensão foi de 2%. Para isso, foram utilizados 44 kg de areia seca (densidade de 1450 kg/m<sup>3</sup>), 1,5 m<sup>3</sup> de água e 1,5 kg de goma xantana. Além disso, foram adicionados 1,5 L de solução Formol 37% para evitar contaminação microbológica.

A goma xantana é um polímero largamente utilizado por indústrias alimentícias para aumentar a viscosidade de seus produtos. Neste experimento ela foi utilizada para simular o efeito viscoso do fluido de perfuração. Devido à complexidade do processo de hidratação desse polímero, foi necessário utilizar um mixer e realizar o preparo com 24 horas de antecedência à realização dos experimentos. Na **Figura 3.3** pode-se notar o aspecto da solução formada.

**Figura 3.2** - Peneira vibratória Mongoose pro Shaker



Fonte: Adaptação de MI SWACO (2017)

**Figura 3.3** - Aspecto da solução formada



Fonte: O autor (2021)

### 3.2 SISTEMA DE CONTROLE DO ADIMENSIONAL DE FORÇA-G DA PENEIRA

O sistema de controle automático da peneira vibratória está baseado em um medidor de vibração piezoelétrico da marca PCB Piezoelectronic modelo 646B00, apresentado na **Figura 3.4**, responsável por enviar um sinal na faixa de 4 a 20 mA correspondente à vibração aplicada à tela de separação da peneira para uma placa de aquisição de dados modelo NI USB-6008, fornecida pela empresa National Instruments, apresentada na **Figura 3.5**. Antes de chegar à placa, o sinal transmitido é convertido proporcionalmente uma faixa de tensão de 1 a 5 Vcc. A placa de aquisição de dados possui taxa de amostragem de 10 kS/s e trabalha acoplada a um computador de mesa que realiza a função de interface homem-máquina utilizando o aplicativo LabView™. Como o controle da vibração não requer uma velocidade de amostragem tão elevada, é feito o cálculo do valor médio correspondente aos dados

coletados, apresentando o resultado na taxa de amostragem de 1 ponto/segundo. No aplicativo LabView™ o sinal recebido do sensor piezoelétrico é convertido no adimensional de força-g, considerando uma faixa de medição ajustada entre 0 e 5g.

**Figura 3.4** - Sensor piezoelétrico utilizado na medição da vibração.



Fonte: Adaptação de IMI Sensors (2016)

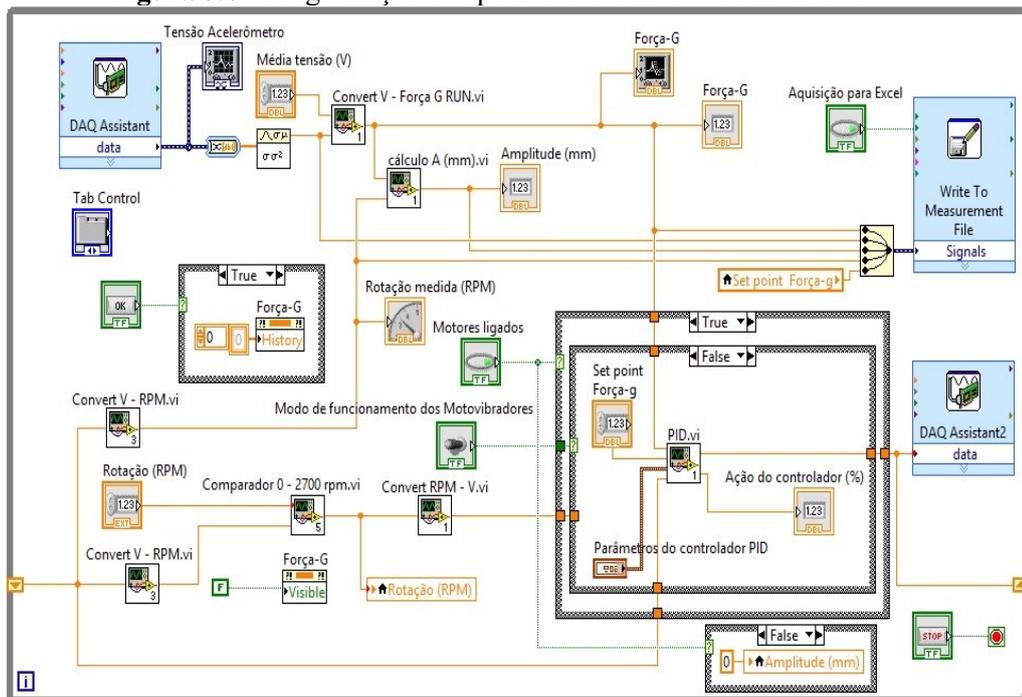
**Figura 3.5** - Placa NI USB-6008



Fonte: Adaptação de NATIONAL INSTRUMENTS (2021)

A configuração da estratégia de controle mais simples possível de ser utilizada em uma peneira vibratória é apresentada na **Figura 3.6**. Ela foi configurada e parametrizada no aplicativo LabView™, sendo possível selecionar um valor de rotação pré-determinado para funcionamento dos motovibradores ou selecionar um valor desejado de *set point* de força-g.

**Figura 3.6** - Programação do aplicativo desenvolvido no LabView™



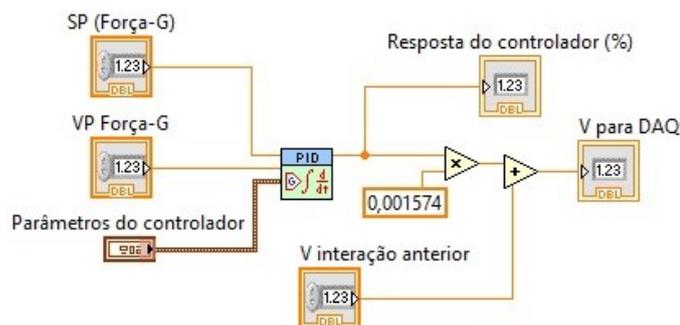
Fonte: O autor (2021)

Ao selecionar uma rotação para os motovibradores, o aplicativo gera um sinal condicionado na faixa de 0 a 5 g que é enviado pela placa de aquisição de dados ao inversor de frequência modelo CFW700, da marca WEG, que ajusta a rotação dos motovibradores.

Considerando o fato de que o valor do adimensional de força-g varia com a vazão de suspensão alimentada à tela de separação da peneira vibratória, é necessário assegurar a manutenção de um valor de força-g constante durante a realização dos experimentos (FREITAS, 2017). A estratégia de controle configurada no software LabView™ compara o valor do sinal recebido do sensor de vibração com o valor desejado e atua no inversor de frequência visando compensar quaisquer desvios. Dessa maneira, se o valor do adimensional de força-g medido for maior que o desejado (*set point*), o inversor de frequência receberá um sinal para diminuir a vibração. Analogamente, se o valor do adimensional de força-g medido for menor que o *set point*, o inversor deverá aumentar a vibração da peneira.

A programação do controlador utilizado é apresentada na **Figura 3.7**. Apesar de o controlador configurado poder atuar com o emprego dos modos de controle proporcional, integral e derivativo (PID), nesse projeto não foi parametrizado o valor da constante correspondente ao tempo derivativo devido à natureza das vibrações provocadas pelos motores vibratórios, que introduziriam ruídos aos valores de força-g medidos (DORRY, 2010).

**Figura 3.7** - Programação do controlador desenvolvido no LabView™



Fonte: O autor (2021)

Os valores dos parâmetros de sintonia correspondentes aos modos proporcional e integral foram estudados com a finalidade de operar a peneira com uma resposta estável e robusta. Avaliou-se inicialmente, de maneira empírica, a utilização de um controlador proporcional (P) ( $K_C = 20$ ) e de um controlador proporcional e integral (PI) ( $K_C = 20$  e  $\tau_I = 0,20$  min.). Esse estudo analisou a resposta da peneira por 500 segundos sob ação do

controlador. Nesse intervalo, o *set point* de força-g escolhido para iniciar a operação foi 0,5 e, aos 100 segundos, esse valor sofreu uma perturbação de 0,5 para 1,0. Novamente, aos 400 segundos, o *set point* foi alterado de 1,0 para 0,5. A determinação de qual controlador possui a melhor resposta foi realizada a partir da análise da integral do valor do erro absoluto (IAE) e do *overshoot*.

A IAE, apresentada na **Equação 3.1**, foi avaliada para cada resposta. Desse modo, os parâmetros do controlador que proporcionarem menor IAE, indicam uma resposta melhor (SEBORG et al., 2019). Na **Equação 3.2** é apresentada uma aproximação do cálculo da integral numérica IAE utilizando a Regra dos Trapézios, sendo possível calcular esse valor a partir de resultados experimentais obtidos a cada segundo (FRANCO, 2012).

$$IAE = \int_0^{500} |e(t)| dt \quad (3.1)$$

$$IAE = \sum_{i=0}^{500} (|\Gamma_i - SP_i| + |\Gamma_{i+1} - SP_{i+1}|) \left( \frac{t_{i+1} - t_i}{2} \right) \quad (3.2)$$

Na qual,  $e(t)$  é a diferença entre a variável de processo e o *set point*,  $SP_i$  e  $SP_{i+1}$  correspondem aos *set points* nos tempos  $i$  e  $i+1$  e  $\Gamma_i$  e  $\Gamma_{i+1}$ , aos valores de força-g obtidos experimentalmente nos tempos  $i$  e  $i+1$ . O *overshoot* ( $OS$ ) foi calculado pela diferença entre o máximo valor da variável controlada após a primeira perturbação e o *set point* em relação à magnitude da perturbação na força-g, assim como apresentado pela **Equação 3.3** (SEBORG et al., 2019). É desejável um *overshoot* baixo para evitar mudanças bruscas na operação dos motovibradores.

$$OS = \frac{\max(\Gamma) - SP}{M_{step}} 100\% \quad (3.3)$$

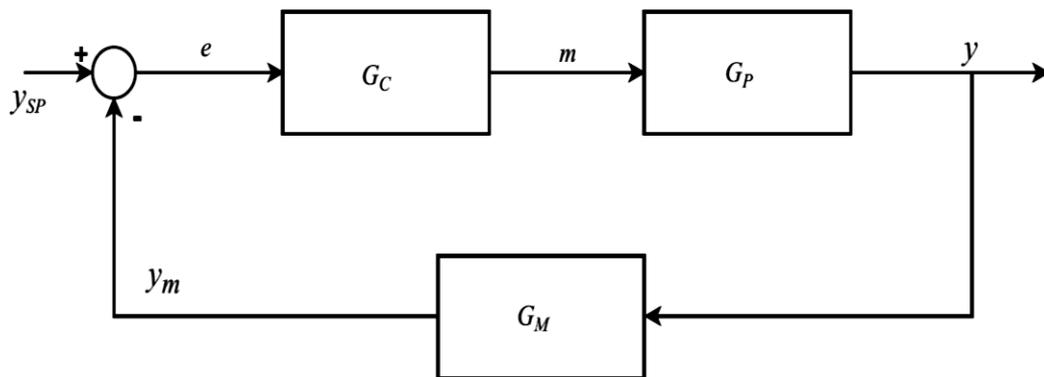
Em seguida, avaliou-se somente a resposta do controlador PI para diferentes valores de parâmetros do controlador. Esse estudo foi realizado analisando a resposta da planta por 200 segundos. Semelhantemente ao estudo anterior, o *set point* inicial escolhido foi 0,5 e, aos 100 segundos, esse valor foi alterado de 0,5 para 1,0. Os valores do parâmetro ganho proporcional ( $K_C$ ) escolhidos nesse estudo foram 15 e 20. Bem como, os valores do parâmetro

tempo integral ( $\tau_I$ ) avaliados foram 0,15; 0,20 e 0,25 min. Novamente, a resposta da peneira foi avaliada a partir da IAE e do *overshoot*. A partir dessa análise, foram escolhidos os melhores valores dos parâmetros para se realizar os demais experimentos.

### 3.3 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE FORÇA-G DA PENEIRA NO SIMULINK™

Para realizar a simulação do controle de força-g da peneira vibratória foi escolhido o ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™. A escolha dos valores dos parâmetros de sintonia dos modos de controle do controlador foi feita com base na representação clássica simplificada da malha de controle do adimensional de *força-g* composta pelos blocos do processo ( $G_P$ ), do medidor ( $G_M$ ) e do controlador ( $G_C$ ) e apresentada na **Figura 3.8**. O ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador do adimensional de *força-g* foi feito empregando o método da síntese direta (SEBORG et al., 2019).

**Figura 3.8** - Representação simplificada de uma malha de controle fechada por realimentação



Fonte: O autor (2021)

A função de transferência que relaciona o valor da variável controlada com o valor do *setpoint* pode ser obtida com base na relação de causa e efeito apresentada por cada um dos blocos mostrados na **Figura 3.8**. A **Equação 3.4** permite calcular a resposta do sistema a uma alteração no valor do *setpoint*.

Assumindo a hipótese simplificadora de que  $G_M$  não apresenta atraso na resposta, pode-se escrever que  $G_M \approx 1,0$ . Assim, isolando  $G_C$ , resulta a função de transferência do controlador. Esta equação ainda precisa ser modificada, de modo a incluir a função de

transferência que representa a dinâmica da planta em estudo, representada por  $\tilde{G}$ , como mostrado na **Equação 3.5**.

O método da síntese direta usa um padrão de resposta pré-determinado pelo projetista do sistema de controle. Nesta dissertação, a função de transferência escolhida para descrever o comportamento da resposta foi uma função de transferência de segunda ordem. A razão desta escolha deve-se ao fato de o processo apresentar uma dinâmica mais rápida do que aquela tipicamente encontrada em processos da indústria química, caracterizada pelo elevado valor da frequência de vibração imposta à tela da peneira estudada. Esta função de transferência foi modelada utilizando a aproximação da função de transferência de segunda ordem por uma de primeira ordem com tempo morto, como apresentado na **Equação 3.6**. Nesta equação,  $\theta_c$  representa o tempo morto e  $\tau_c$  o tempo de resposta estipulados para a resposta projetada.

Substituindo a **Equação 3.6** na **Equação 3.5** e desenvolvendo a mesma com a simplificação apresentada na **Equação 3.7**, a qual pode ser assumida ser válida para pequenos valores de  $\theta_c$  (SEBORG et al., 2019), obtém-se a **Equação 3.8**. O comportamento dinâmico identificado da planta também foi representado adequadamente por uma função de transferência correspondente a um sistema de primeira ordem com tempo morto (VARGAS et al., 2015), como apresentado na **Equação 3.9**, na qual  $K_p$  é o ganho da planta,  $\tau_p$  é a constante de tempo da planta e  $\theta_p$  é o tempo morto da planta. Substituindo-se a **Equação 3.9** na **Equação 3.8** e desenvolvendo a mesma, resulta na **Equação 3.10** que pode ser empregada para o cálculo do valor dos parâmetros de sintonia do controlador em estudo. Importante destacar que neste desenvolvimento foi considerado que  $\theta_c \approx \theta_p$  que é uma hipótese simplificadora usualmente adotada neste tipo de análise (SEBORG et al., 2019).

$$\frac{y}{y_{SP}} = \frac{G_P \cdot G_C}{(1 + G_M \cdot G_P \cdot G_C)} \quad (3.4)$$

$$G_C = \frac{1}{\tilde{G}} \cdot \frac{\left[\frac{y}{y_{SP}}\right]_d}{\left[\left(1 - \frac{y}{y_{SP}}\right)\right]_d} \quad (3.5)$$

$$\left[\frac{y}{y_{SP}}\right]_d = \frac{e^{-\theta_c s}}{\tau_c \cdot s + 1} \quad (3.6)$$

$$e^{-\theta_c \cdot s} = 1 - \theta_c \cdot s \quad (3.7)$$

$$G_c = \frac{1}{\tilde{G}} \cdot \frac{e^{-\theta_c \cdot s}}{(\tau_c + \theta_c) \cdot s} \quad (3.8)$$

$$\tilde{G} = \frac{K_p \cdot e^{-\theta_p \cdot s}}{(\tau_p \cdot s + 1)} \quad (3.9)$$

$$G_c = \frac{\tau_p \cdot s + 1}{K_p \cdot (\tau_c + \theta_c) \cdot s} \quad (3.10)$$

Dividindo-se o numerador e o denominador da **Equação 3.10** por  $\tau_p \cdot s$ , pode-se escrever a **Equação 3.11**, na qual o primeiro termo à direita do sinal de igualdade representa o ganho proporcional do controlador do processo e o segundo termo – entre parênteses – representa a contribuição do modo integral. Deste modo, a função de transferência do controlador, obtida pela aplicação do método da síntese direta, é dada pela **Equação 3.12**, que é a equação de um controlador com modos de controle proporcional e integral.

A sintonia dos parâmetros do controlador foi realizada a partir da análise da curva de reação do processo e da integral do valor do erro relativo quadrático acumulado e ponderado no tempo (*ERQA*) e do sobressinal da resposta do controlador. A escolha do método *ERQA* deveu-se ao fato dele ponderar o erro ao longo do tempo, penalizando mais fortemente os erros de maior amplitude e duração. Foi utilizada a **Equação 3.13** para o cálculo do *ERQA*.

$$G_c = \frac{\tau_p}{K_p \cdot (\tau_c + \theta_c)} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\tau_p \cdot s} \right) \quad (3.11)$$

$$G_c = K_c \cdot \left( 1 + \frac{1}{\tau_I \cdot s} \right) \quad (3.12)$$

$$ERQA = \int_0^t \left[ \frac{\text{força } G(t)_{real} - \text{força } G(t)_{modelo}}{\text{força } G(t)_{real}} \right]^2 dt \quad (3.13)$$

Os valores dos parâmetros do modelo do processo para a peneira vibratória em estudo, utilizando o método da síntese direta, foram os seguintes:  $K_p = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ rpm}^{-1}$ ,  $\tau_p = 20$  seg. e  $\theta_p = 1$  seg. Substituindo estes valores na **Equação 3.11**, e adotando para a constante de tempo e para o atraso de transporte da resposta projetada do controlador os valores de 45 seg. e 10 s. respectivamente, foram obtidos os valores dos parâmetros de sintonia do controlador do adimensional de força-g, apresentados na **Tabela 3.1**. Esses valores foram considerados os valores iniciais de sintonia do controlador, que foram, ao longo do desenvolvimento da dissertação, refinados e ajustados manualmente (método heurístico) para se obter um controle mais suave e com menor sobressinal.

**Tabela 3.1** - Parâmetros do controlador de força-g - Método da síntese direta/Método heurístico

<b>Método do ajuste</b>	<b><math>K_c</math> (rpm<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\tau_I</math> (min/repetição)</b>
Síntese Direta	124,32	0,33
Heurístico (Ajuste manual)	209,63	0,42

### 3.4 TESTES DE MEDIÇÃO DE UMIDADE

Para medição da umidade do material de saída da peneira, foram realizados diversos experimentos, que consistiram em utilizar tanto o método indireto, utilizado para identificar o processo em estado estacionário, quanto o método direto de medição do teor de umidade, utilizado para determinar o caráter transiente do sistema.

#### 3.4.1 Método indireto de medição

Os experimentos utilizando o método indireto consistiram em retirar diversas amostras do sólido retido durante a realização dos experimentos e acondicioná-las em béqueres que tinham a massa previamente conhecida. Ao fim das corridas realizadas em um dia de testes, os béqueres contendo as amostras de sólidos úmidos eram novamente pesados e, na sequência, introduzidos em estufa mantida a 105°C para secagem por 24 horas. Ao final do período de secagem, os béqueres eram novamente pesados, sendo o teor de umidade residual determinado pela diferença das massas anteriormente determinadas.

### 3.4.2 Identificação da dinâmica do processo no estado estacionário

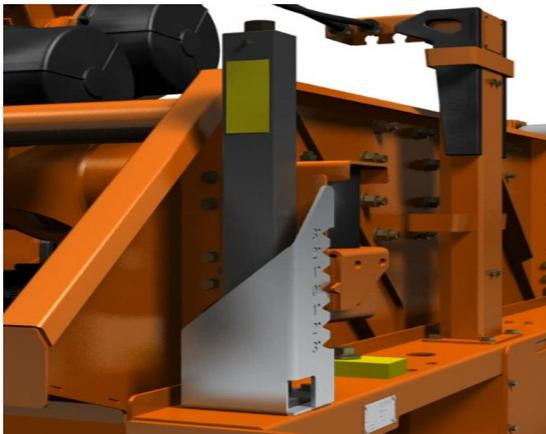
Utilizando o método indireto de medição, com o objetivo de identificar o comportamento do processo de peneiramento em estado estacionário foi realizado um planejamento composto central (PCC) com duas réplicas no centro.

Esse tipo de planejamento foi escolhido devido ao menor número de experimentos a serem realizados quando comparado a um planejamento 3k e por ser capaz de fornecer os dados necessários para um ajuste de segunda ordem, que permite quantificar a não linearidade das variáveis em relação ao processo e a realização do ajuste de superfícies de resposta (MYERS et al, 2016).

As variáveis independentes utilizadas foram:

- Força-g imposta à peneira (X1): adimensional definido como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional da terra, sendo dependente da frequência e amplitude de vibração da peneira.
- Inclinação da tela da peneira (X2): é o nível de inclinação formado entre a tela da peneira e o plano horizontal. O sistema para alteração dos níveis de inclinação pode ser observado na **Figura 3.9**.
- Frequência da bomba (X3): Como a bancada experimental não possuía um medidor de vazão, a variável controlada foi a frequência da bomba mostrada no inversor de frequência modelo WEG - CFW700, apresentado na **Figura 3.10**.

**Figura 3.9** - Sistema para alteração dos níveis de inclinação



Fonte: Adaptação de MI-SWACO (2017)

**Figura 3.10** – Inversor de frequência utilizado para alteração da vazão da bomba



Fonte: Adaptação de WEG (2021)

Na **Tabela 3.2** é apresentada a codificação das variáveis independentes utilizada na realização dos experimentos.

**Tabela 3.2 - Variáveis e níveis do PCC**

Nível	Força-g X1	Inclinação X2	Frequência X3
-1,2872	1	1,4	8,7
-1	1,3	1,5	9
0	2,3	2,0	10
+1	3,3	2,5	11
+1,2872	3,6	2,7	11,3

Fonte: O autor (2021)

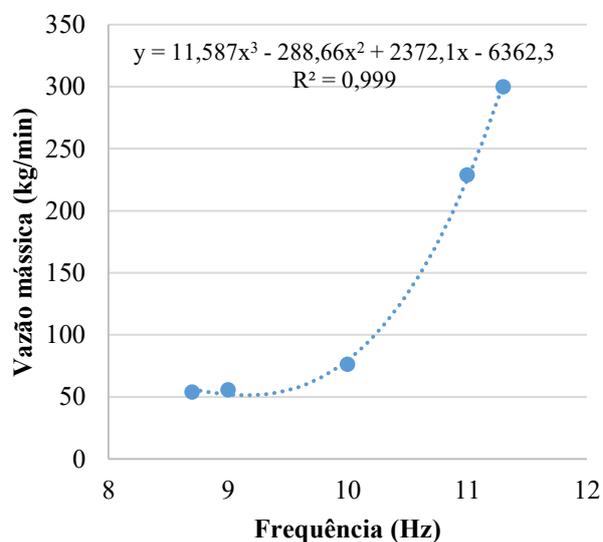
Para obter o valor da vazão mássica, primeiramente foi determinada experimentalmente a curva que relaciona o sinal indicado pelo inversor de frequência acoplado à bomba com as respectivas vazões mássicas, medidas em triplicata com o auxílio de uma balança eletrônica de precisão 5kg x 1g, da marca Marte Científica. Os resultados obtidos são apresentados na **Tabela 3.3** e na **Figura 3.11**.

**Tabela 3.3 - Frequência versus vazão mássica**

Nível do PCC	Frequência (Hz)	Vazão mássica (kg/min)
-1,2872	8,7	54,00
-1	9	55,85
0	10	76,50
+1	11	229,09
+1,2872	11,3	300,00

Fonte: O autor (2021)

**Figura 3.11 – Função que relaciona o sinal do inversor de frequência com a vazão através da bomba**



Fonte: O autor (2021)

Ao todo foram realizados 16 experimentos, sendo que para cada experimento foram coletadas 03 amostras do material retido na tela. O planejamento completo dos experimentos é mostrado na **Tabela 3.4**.

**Tabela 3.4 - Matriz do planejamento do PCC utilizado**

Experimento	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	-1,2872	0	0
12	1,2872	0	0
13	0	-1,2872	0
14	0	1,2872	0
15	0	0	-1,2872
16	0	0	1,2872

### 3.4.3 Método direto de medição

Nos experimentos realizados para a medição do teor de umidade pelo método direto foram utilizados dois tipos de elementos sensores de baixo custo, a saber: o sensor resistivo e o sensor capacitivo.

Inicialmente foram realizados testes preliminares em laboratório, nos quais foi empregado o sensor resistivo tipicamente empregado para medir a umidade de solos, visando desenvolver estudo exploratório para determinar como se daria o comportamento do sensor quando aplicado a uma medição contínua do material separado na peneira. O referido elemento sensor já foi apresentado na **Figura 2.13**.

No desenvolvimento dos estudos foi também utilizado o sensor de umidade de solo capacitivo para fins de avaliação comparativa dos valores medidos no que diz respeito à repetibilidade e precisão. Optou-se por empregar o sensor capacitivo já apresentado na **Figura 2.14**.

Após realizar vários testes comparativos, o sensor que mais se adequou ao sistema foi o sensor capacitivo, pois apresentou melhor repetibilidade nas leituras quando comparado ao sensor resistivo.

Para calibração do sensor foram preparadas amostras com umidades pré-definidas. Para isso, foi necessário pesar previamente quantidades pré-determinadas de água e areia e posteriormente realizar a mistura, conforme é mostrado na **Figura 3.12**.

**Figura 3.12** - Amostras para calibração do sensor



Fonte: O autor (2021)

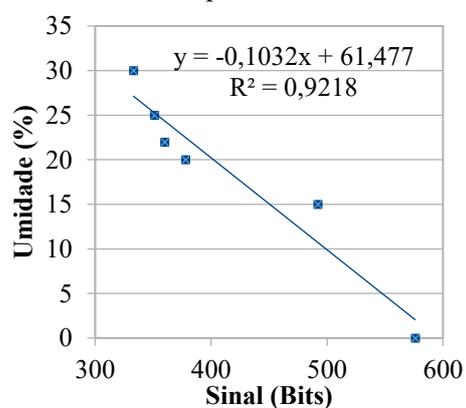
Na **Tabela 3.5** e na **Figura 3.13** são mostrados os valores lidos pelo sensor capacitivo, assim como a curva de calibração encontrada.

**Tabela 3.5** - Calibração do sensor capacitivo

Umidade (%)	Sinal (Bits)
0	576
15	492
20	378
22	360
25	351
30	333

Fonte: O autor (2021)

**Figura 3.13** - Curva de calibração do sensor capacitivo



Fonte: O autor (2021)

A leitura do sinal enviado pelo sensor foi realizada por meio da utilização da mesma placa de aquisição de dados empregada para controle de força-g, modelo NI USB-6008 da National Instruments™, já apresentada na **Figura 3.5**, associada a um código computacional desenvolvido no aplicativo LabView™.

Uma vez confirmada a possibilidade de utilização do referido elemento sensor de umidade, passou-se para a etapa de realização de experimentos exploratórios utilizando o elemento sensor acoplado 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 3.14**.

**Figura 3.14** - Amostrador desenvolvido para medição contínua de umidade



Fonte: O autor (2021)

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 elemento sensor de umidade de solo em aplicações industriais.

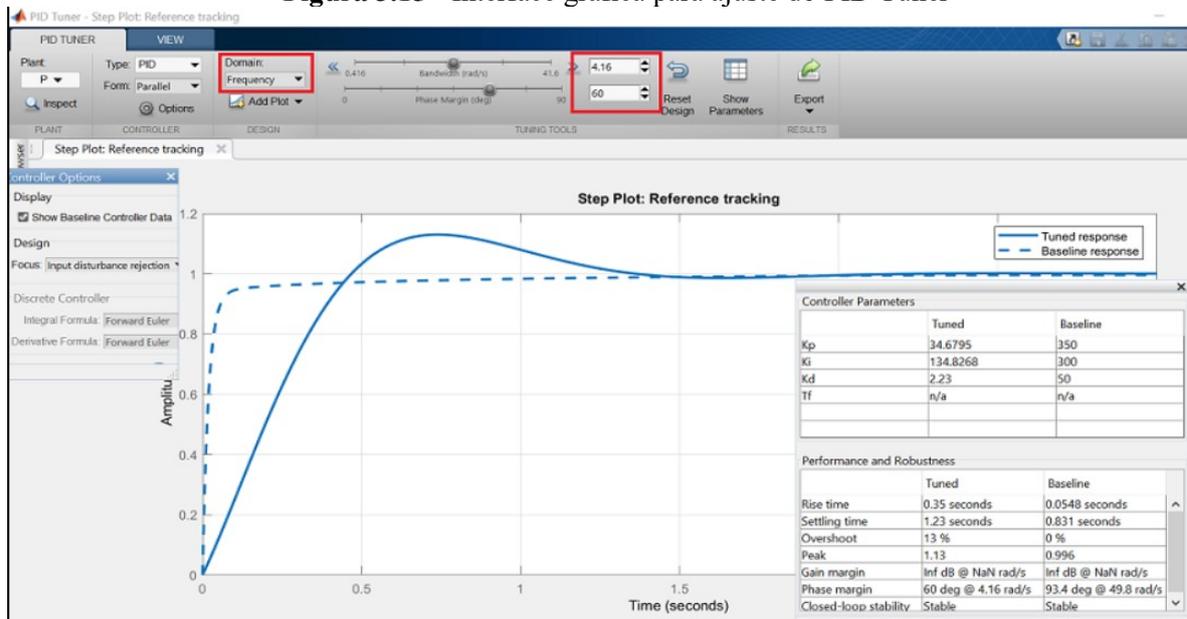
### **3.5 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE UMIDADE RESIDUAL NO SIMULINK™**

Para realizar a simulação do controle de umidade residual obtido na peneira vibratória foi escolhido o ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™ sendo que o controlador de umidade escolhido foi do tipo Proporcional e Integral. Além disso, este controlador foi configurado com uma limitação do valor do seu sinal de saída variando entre 0,9496 (menor valor de força-g possível de se manter a peneira em condição estável) e 4,0 (valor próximo ao limite máximo testado nos experimentos).

A escolha dos valores dos parâmetros de sintonia do controlador foi feita utilizando a opção **PID Tuner** disponível no aplicativo Matlab™, uma ferramenta capaz de ajustar automaticamente os valores dos parâmetros de sintonia do controlador PID, o que permite evitar o processo de tentativa e erro comumente utilizado.

O **PID Tuner** é um algoritmo de ajuste automatizado do aplicativo Matlab™ que escolhe os valores dos parâmetros de sintonia do controlador PID que consigam equilibrar desempenho (tempo de resposta, largura de banda) e robustez (margens de estabilidade). Esse algoritmo possui valores pré-definidos de tempo de resposta, largura de banda e margem de fase, mas esses valores podem ser ajustados em uma interface interativa, onde é possível observar graficamente a resposta do sistema, como mostrado na **Figura 3.15**.

**Figura 3.15** - Interface gráfica para ajuste do PID Tuner



Fonte: O autor (2021)

Os valores dos parâmetros de sintonia do controlador de umidade obtidos são apresentados na **Tabela 3.6**, e foram utilizados nas simulações abordadas nessa dissertação.

**Tabela 3.6** - Valores dos parâmetros de controle de umidade residual da peneira vibratória

Método do ajuste	$K_C$ (% umidade <sup>-1</sup> )	$\tau_I$ (min/repetição)
PID Tuner do Matlab™	0,590397	0,024796

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MODELO ESTÁTICO AJUSTADO DO TEOR DE UMIDADE

A obtenção do modelo estático representativo do comportamento do teor de umidade residual do material sólido separado foi feita com base em experimentos realizados com a peneira vibratória em escala industrial. Na **Tabela 4.1** é apresentada a média dos resultados dos experimentos com as variáveis independentes em sua forma codificada.

**Tabela 4.1** - Umidade expressa em (%) para as variáveis codificadas

Experimento	Força-g (adim.)	Inclinação (°)	Vazão (kg/min)	M (%)
1	1,3	1,50	55,9	20,33
2	1,3	1,50	229,1	25,02
3	1,3	2,50	55,9	19,97
4	1,3	2,50	229,1	20,14
5	3,3	1,50	55,9	24,89
6	3,3	1,50	229,1	25,55
7	3,3	2,50	55,9	23,39
8	3,3	2,50	229,1	24,43
9	2,3	2,00	76,5	23,26
10	2,3	2,00	76,5	22,25
11	1,0	2,00	76,5	20,96
12	3,6	2,00	76,5	24,45
13	2,3	1,35	76,5	25,58
14	2,3	2,75	76,5	22,76
15	2,3	2,00	54,0	22,64
16	2,3	2,00	300,0	25,64

A análise estatística dos dados foi realizada com o emprego do aplicativo STATISTICA 7™ com o objetivo de avaliar quais variáveis são significativas ao processo. O intervalo de confiança adotado no tratamento estatístico foi de 95%. Foram levados em conta

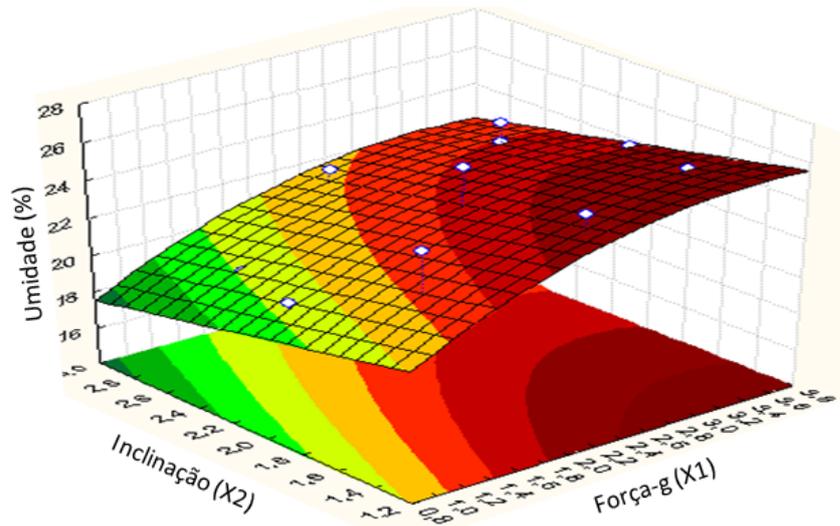
os efeitos das variáveis principais e interação entre 02 variáveis. O modelo ajustado foi de segunda ordem, com seus parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados.

O modelo estático de segunda ordem ajustado, é apresentado na **Equação 4.1**.

$$M (\%) = 19,4213 + 4,6424 \cdot X_1 - 0,6780 \cdot X_1^2 - 1,9496 \cdot X_2 + 0,0089 \cdot X_3 \quad (4.1)$$

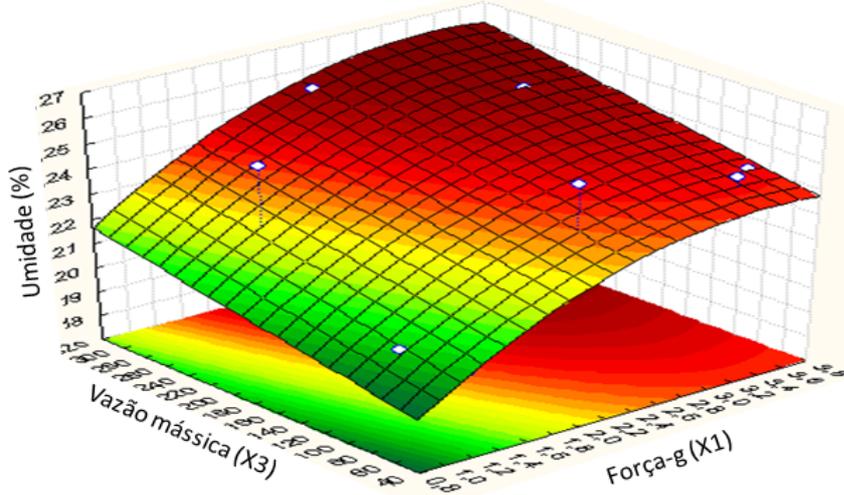
As superfícies de resposta correspondentes ao modelo obtido estão apresentadas nas **Figuras 4.1, 4.2 e 4.3**.

**Figura 4.1** - Umidade em função de Força-G (X1) e Inclinação (X2)



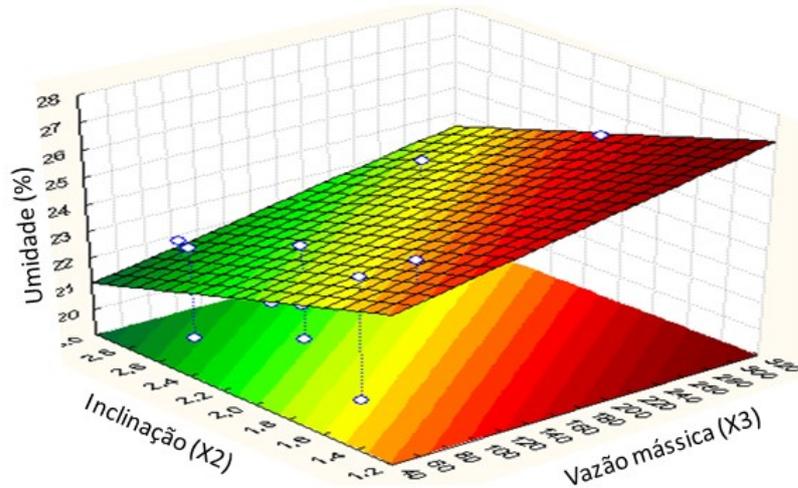
Fonte: O autor (2021)

**Figura 4.2** - Umidade em função de Força-G (X1) e Vazão mássica (X3)



Fonte: O autor (2021)

**Figura 4.3** - Umidade em função de Inclinação (X2) e Vazão mássica (X3)



Fonte: O autor (2021)

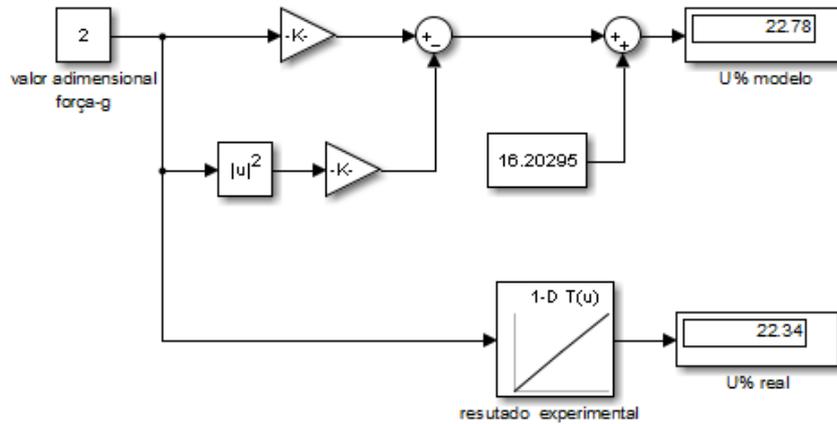
Considerando as limitações impostas pelo período excepcional de pandemia do COVID 19 que o país atravessa, as quais dificultaram sobremaneira a realização desejada de experimentos envolvendo todas as condições postuladas no planejamento experimental, foram adotados valores fixos de inclinação e vazão mássica para as simulações realizadas, avaliando apenas a o efeito da força-g em condições não estacionárias.

Os valores escolhidos para estas variáveis foram os correspondentes ao ponto central do planejamento de experimentos, ou seja, inclinação de 2° e vazão mássica igual a 76,5 kg/h. Assim, o modelo estático do teor de umidade residual foi reescrito como apresentado na **Equação 4.2**.

$$M (\%) = 16,20295 + 4,6424 \cdot Fg - 0,6780 \cdot Fg^2 \quad (4.2)$$

Esse modelo que relaciona o teor de umidade residual com o adimensional de força-g foi avaliado no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™. O diagrama de simulação apresentado na **Figura 4.4** ilustra o modelo estacionário usado para estimar o teor de umidade residual que foi desenvolvido neste trabalho. Nele é calculado o valor do teor de umidade estimado pelo modelo e o valor obtido experimentalmente em resposta a um valor previamente estabelecido para o adimensional de força-g.

**Figura 4.4** - Diagrama de simulação do cálculo do teor de umidade residual



Fonte: O autor (2021)

O erro relativo entre o valor do teor de umidade residual estimado pelo modelo estático e o medido experimentalmente, considerando a inclinação de  $2^\circ$  e vazão de  $76,5 \text{ kg/h}$ , foi calculado para os valores de adimensional de força-g testados, sendo apresentado na **Tabela 4.2**. Importante destacar que o valor do erro relativo médio global foi de aproximadamente  $2,48\%$ , o qual está contido na faixa de precisão do elemento sensor usado nos experimentos.

**Tabela 4.2** - Erro relativo entre a umidade estática simulada e a umidade medida

Força-g (adimensional)	U simulada (%)	U medido (%)	Erro relativo (%)
1,0	20,17	20,96	3,78
2,3	23,29	22,76	2,35
3,6	24,13	24,45	1,31

## 4.2 MODELO DINÂMICO DO COMPORTAMENTO DO ADIMENSIONAL DE FORÇA-G

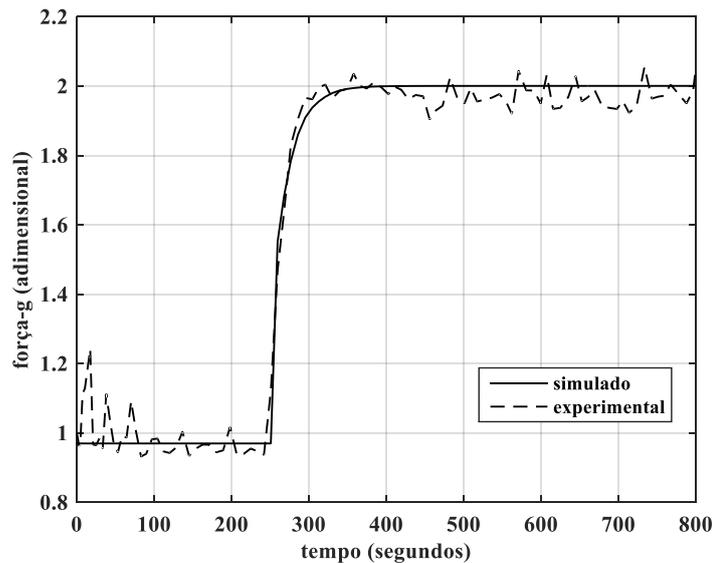
O comportamento do adimensional de *força-g* medido na peneira vibratória foi modelado considerando a relação entre a frequência de operação dos motores vibratórios com o valor do adimensional de *força-g* aplicado sobre o material sólido granular sobre a tela de separação. Este estudo foi baseado na análise da resposta dinâmica do adimensional de *força-g* imposta na peneira ao se aplicar um degrau na frequência dos referidos motores. Foi

estudado o trecho inicial do transiente de variação do adimensional de *força-g*, correspondente à aceleração imposta ao movimento oscilatório aplicado sobre a tela, pelo fato de permitir maior sensibilidade na análise da resposta do sistema (VARGAS et al., 2015). Foi identificada empiricamente a função de transferência aproximada apresentada na **Equação 4.3** que relaciona o valor do adimensional de *força-g* com o valor da frequência de vibração dos motores vibratórios.

$$\frac{\text{adim. força } g}{rpm} = \frac{0,00292}{(23.s + 1)} \cdot e^{-2.s} \quad (4.3)$$

O modelo proposto na equação anterior foi validado por comparação com os resultados experimentais, sendo o comportamento temporal apresentado na **Figura 4.5**.

**Figura 4.5** - Comportamento temporal do adimensional de força-g



Fonte: O autor (2021)

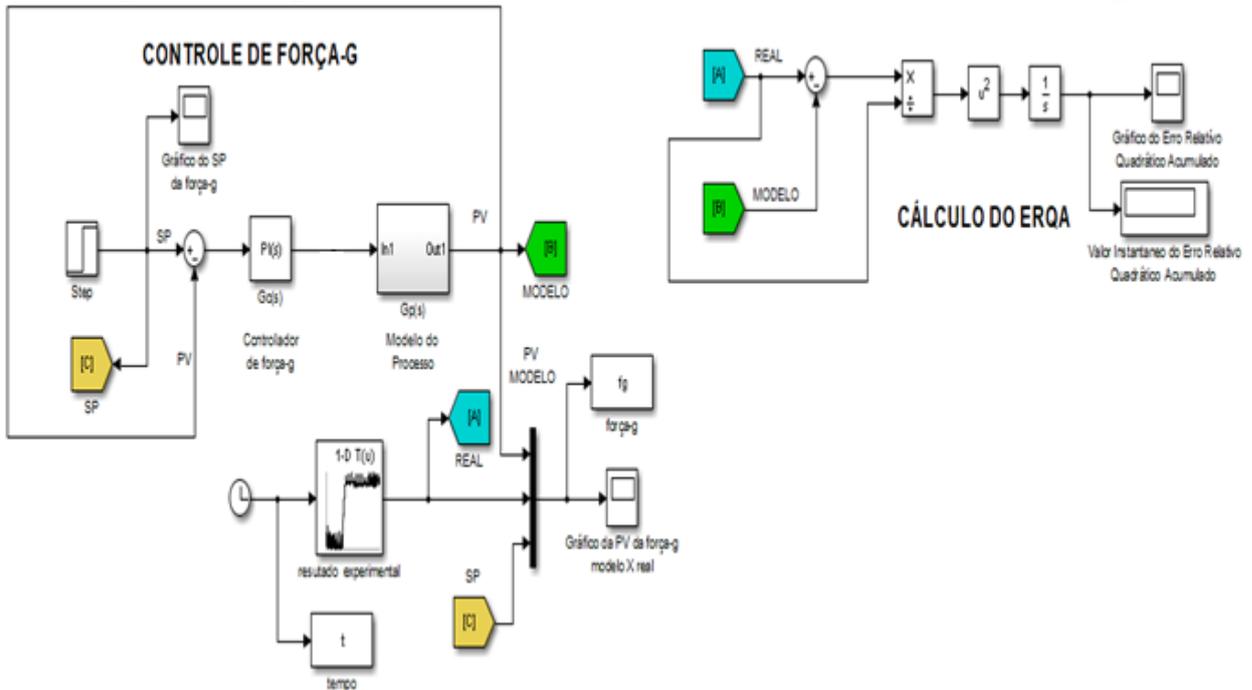
### 4.3 TESTE DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE FORÇA-G

Na **Figura 4.6** é apresentado o diagrama de simulação usado para testar o ajuste dos parâmetros do controle de força-g apresentado no **subitem 3.2**. Ele foi desenvolvido no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™, sendo formado por dois subsistemas, como apresentado na sequência.

O subsistema denominado “**CONTROLE DE FORÇA G**” é aquele que representa o modelo do processo e o controlador de *força-g*. Adicionalmente ele apresenta a resposta real do sistema por meio do bloco de função denominado “**Resultado experimental**”. As respostas real e simulada são enviadas para o bloco de função denominado “**Gráfico da força-g modelo X real**”.

O subsistema denominado “**CÁLCULO DO ERQA**” é o responsável pelo cálculo do valor do erro relativo quadrático acumulado, o qual foi utilizado na análise de sensibilidade dos parâmetros de sintonia do controlador automático de *força-g* estudados por **Vargas et al., (2015)**, em conjunto com o sobressinal e o tempo de acomodação apresentando pela resposta da variável controlada.

**Figura 4.6** - Diagrama de simulação do sistema de controle do adimensional de *força-g*



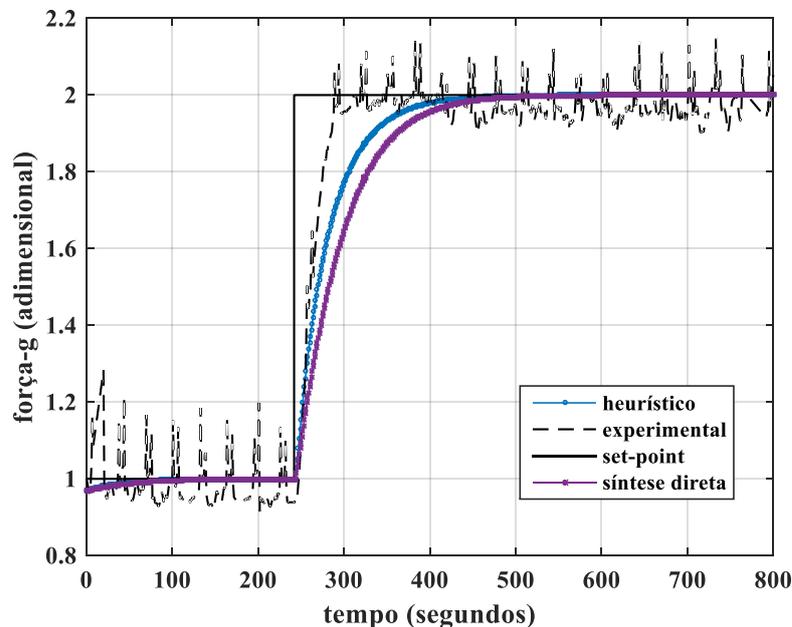
Fonte: O autor (2021)

Com base na **Figura 4.7** pode-se observar que o tempo de subida da resposta do controlador com modos de controle proporcional e integral, cujos parâmetros de sintonia foram ajustados pelo método da síntese direta, é maior do que aquele da resposta do controlador proporcional puro. Uma possível justificativa para este comportamento reside no fato de que o valor do parâmetro  $K_C$  utilizado no controlador empregado por **Guerreiro (2015)** foi ajustado pelo método da tentativa e erro (heurístico), resultando em um valor maior do que o valor obtido pelo método da síntese direta. Este fato faz com que a resposta do

sistema seja mais rápida. Entretanto, a resposta experimental do controlador empregado por **Guerreiro (2015)** apresenta maior oscilação no valor da variável controlada desde o início da resposta ao degrau imposto no valor do *setpoint* do controlador. Este comportamento não ocorre para o controlador proporcional e integral ajustado pelo método proposto neste trabalho. É importante ressaltar, que a resposta da variável manipulada apresentou comportamento suave e contínuo em torno do ponto estudado para ambos os controladores.

Outro ponto a destacar é o fato de que o comportamento do sistema controlado esteve mais próximo do *setpoint* com o uso do controlador proporcional e integral, o que era esperado. O modo de controle integral é responsável por eliminar o erro de regime decorrente da alteração imposta no valor de *setpoint*, fazendo com que a variável controlada fique mais próxima do mesmo. Adicionalmente, a resposta do controlador proporcional e integral se aproximou da resposta de um sistema de primeira ordem com tempo morto, que foi a premissa de projeto adotada para avaliar o desempenho do controlador. O valor do sobressinal na resposta do controlador proporcional e integral – com os parâmetros de sintonia ajustados pelo método da síntese direta – pode ser assumido como desprezível.

**Figura 4.7** - Resposta do controlador a degrau aplicado no *setpoint*



Fonte: O autor (2021)

Os valores do *ERQA* do sobressinal e do tempo de acomodação correspondentes ao degrau aplicado no valor do *setpoint* do controlador do adimensional de *força-g* cujos parâmetros foram ajustados pelos métodos testados na dissertação são apresentados na **Tabela**

**4.3.** Segundo **Seborg et al., (2019)** esse é um comportamento típico dos controladores com modos de controle proporcional e integral. Com a finalidade de escolher a resposta do controlador proporcional e integral mais adequada, foi realizada uma análise de sensibilidade dos valores do parâmetro  $\tau_I$ , o qual está relacionado com a obtenção de um comportamento suficientemente preciso para a variável de processo controlada e suficientemente suave para atuação sobre a variável manipulada.

**Tabela 4.3** - ERQA, sobressinal e tempo de acomodação das respostas do controle

Método do ajuste dos parâmetros	$K_C$ ( $rpm^{-1}$ )	$\tau_I$ (min)	ERQA (min)	Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (seg)
Síntese Direta	124,23	0,33	3,628	0	194
Heurístico	209,63	0,42	2,16	0	159

#### **4.4 SIMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE BASEADA NO TEOR DE UMIDADE**

O modelo dinâmico do processo de deságue foi avaliado como sendo formado pela associação do modelo estático do teor de umidade residual, obtido com base no planejamento experimental, com o modelo dinâmico do comportamento do adimensional de força-g medido na peneira vibratória.

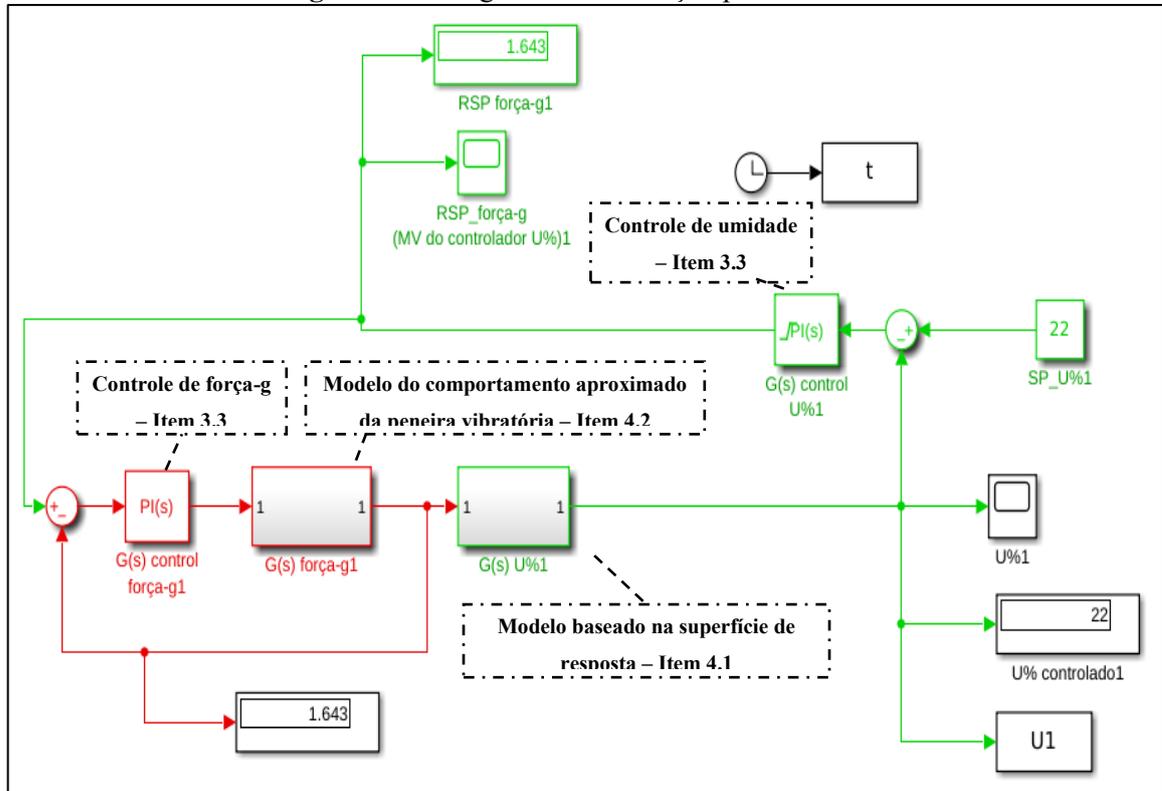
O emprego do modelo estático não afeta de maneira significativa o resultado das medições dinâmicas realizadas nos experimentos haja vista o fato do tempo de resposta do sensor de umidade do tipo capacitivo ser da ordem de 3 segundos. Deste modo, é válido considerar que a resposta do sensor de umidade utilizado é praticamente instantânea.

O diagrama de simulação apresentado na **Figura 4.8** representa a malha de controle do adimensional de *força-g* (descrita no **subtem 4.3**) acoplada à malha de controle do teor de umidade residual.

O **primeiro caso simulado** considerou a aplicação de perturbações do tipo degrau no *setpoint* do teor de umidade, variando inicialmente de 20% para 24% no instante  $t = 250$  s e de 24% para 22% no instante  $t = 500$  s. Foi considerado o início da simulação partindo da condição inicial de umidade medida durante os testes realizados com a peneira, que consideraram o valor do adimensional de *força-g* igual a 0,9496. Realizando a simulação com o modelo da estratégia de controle proposta nesta dissertação, obteve-se um comportamento

coerente com o verificado experimentalmente para os valores finais correspondentes aos estados estacionários das condições consideradas.

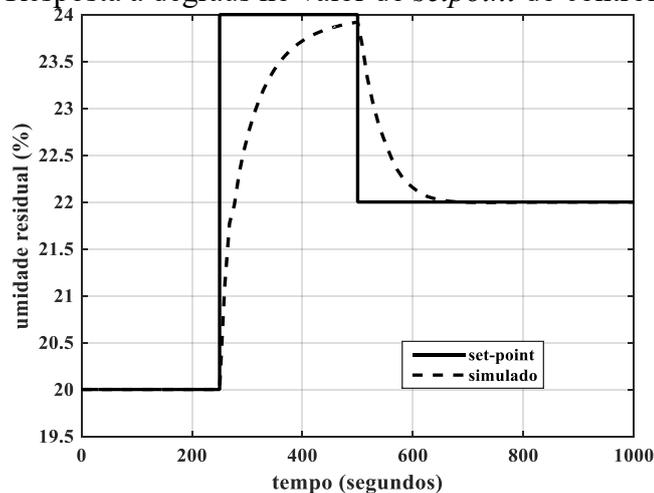
**Figura 4.8** - Diagrama de simulação para o 1º caso



Fonte: O autor (2021)

Na **Figura 4.9** é apresentada a resposta do teor de umidade residual aos degraus estabelecidos no valor do *setpoint* do controlador de umidade, para o primeiro caso em estudo.

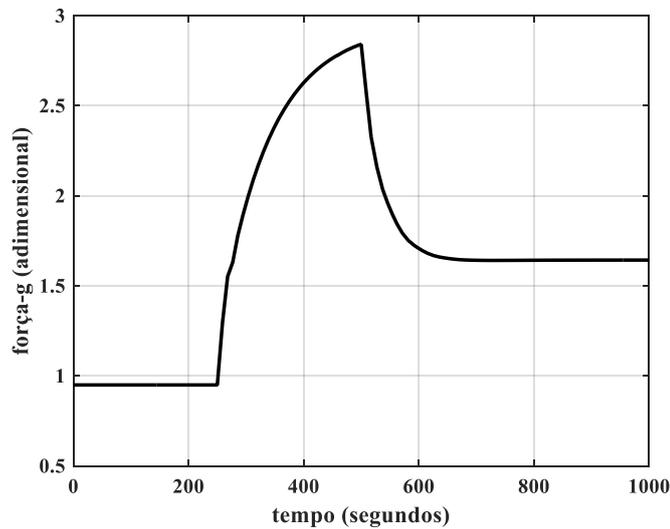
**Figura 4.9** – Resposta a degraus no valor do *setpoint* do controlador de umidade



Fonte: O autor (2021)

Na **Figura 4.10** é apresentada a resposta da variável *força-g* frente aos degraus estabelecidos no valor do *setpoint* do controlador de umidade, para o primeiro caso em estudo.

**Figura 4.10** - Resposta da *força-g* aos degraus no valor do *setpoint* do controlador de umidade

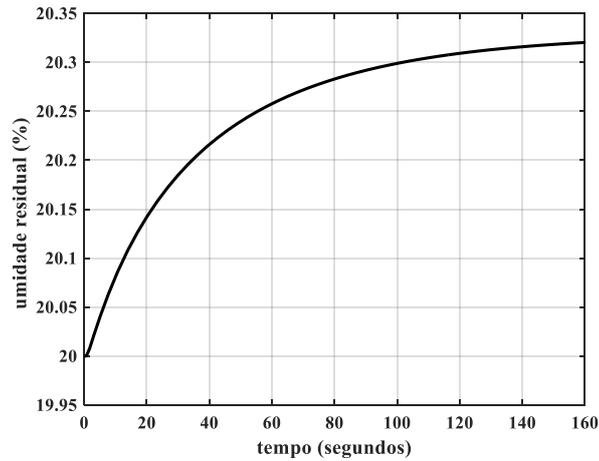


Fonte: O autor (2021)

Era esperado o aumento do valor da *força-g* em resposta ao degrau de aumento do valor do *setpoint* do controlador do teor de umidade residual, pois o adimensional de *força-g* é responsável por promover o aumento do valor da velocidade com a qual o material sólido retido é transportado sobre a tela, acarretando assim menor deságue (BARBOSA, 2018).

O **segundo caso simulado** contemplou a aplicação de uma perturbação do tipo degrau no valor do adimensional de *força-g*, representando uma variação na condição de alimentação da peneira, com amplitude igual a +0,1 no valor do adimensional de *força-g* no instante  $t = 0$  s. Foi considerado o início da simulação partindo da condição inicial da peneira com o valor do adimensional de *força-g* igual a 0,9496 e valor inicial de umidade igual a 20%. Realizando a simulação com o modelo da estratégia de controle proposta nesta dissertação, obteve-se como resposta à perturbação aplicada o valor de umidade final de 20,32%, com o valor do adimensional de *força-g* variando de 0,9496 até 1,047. Na **Figura 4.11** é apresentado o resultado obtido no segundo teste.

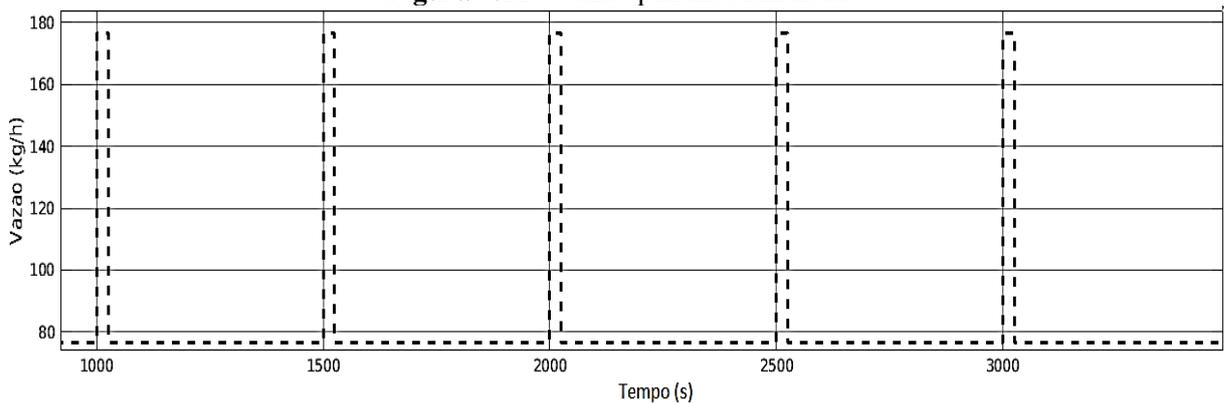
**Figura 4.11** - Resposta a degrau de amplitude 0,1 no adimensional de *força-g*



Fonte: O autor (2021)

O **terceiro caso simulado** contemplou a simulação de constantes perturbações na vazão de alimentação. Foi considerado o início da simulação partindo da condição de adimensional de *força-g* igual a 1,64, inclinação igual a 2° e vazão de alimentação igual a 76,5 kg/h. No instante  $t = 1.000$  s inicia-se a simulação dos pulsos na vazão de alimentação, variando de 76,5 kg/h para 176,5 kg/h a cada 500 s., conforme se pode observar na **Figura 4.12**.

**Figura 4.12** - Vazão pulsante simulada

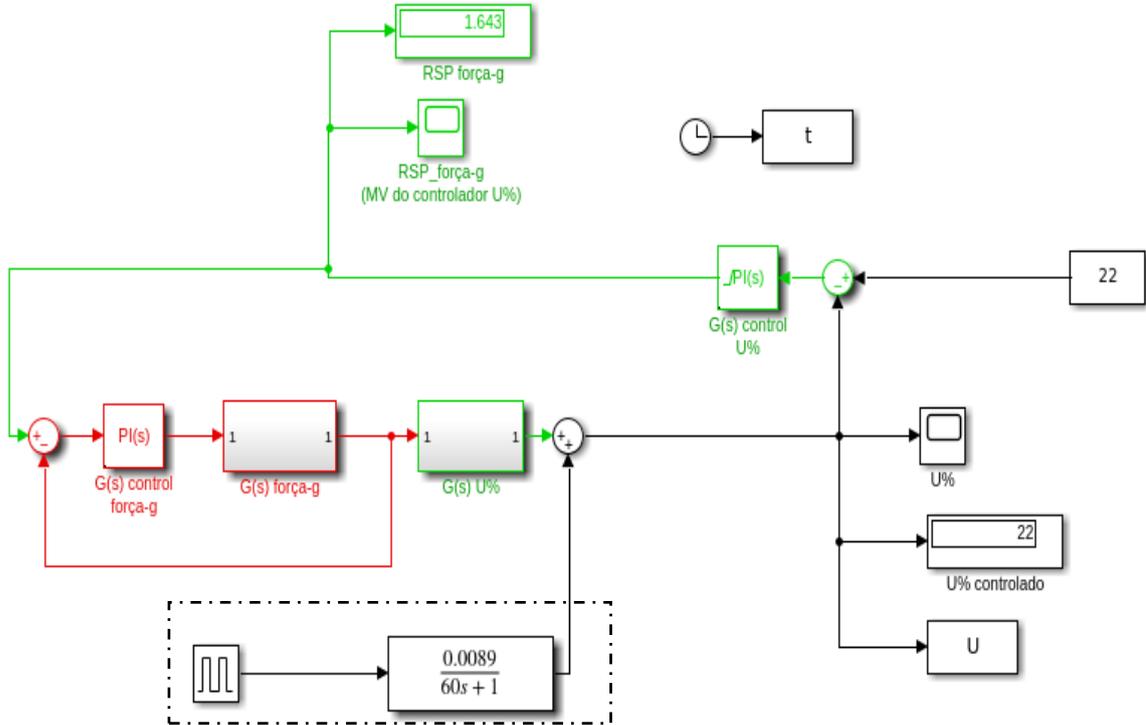


Fonte: O autor (2021)

O diagrama de simulação apresentado na **Figura 4.13** apresenta, em destaque, a função pulsante proposta juntamente com o bloco da função de transferência que representa essa situação. A função de transferência foi adotada como sendo de primeira ordem, com um ganho de 0,0089, de acordo com o fator multiplicativo para a vazão de alimentação

apresentado na **Equação 4.1**, e com uma constante de tempo igual a 60 s, visto que foi observado experimentalmente que esse era um tempo aproximado para a variação de umidade atingir 63% do valor final em uma perturbação semelhante a essa.

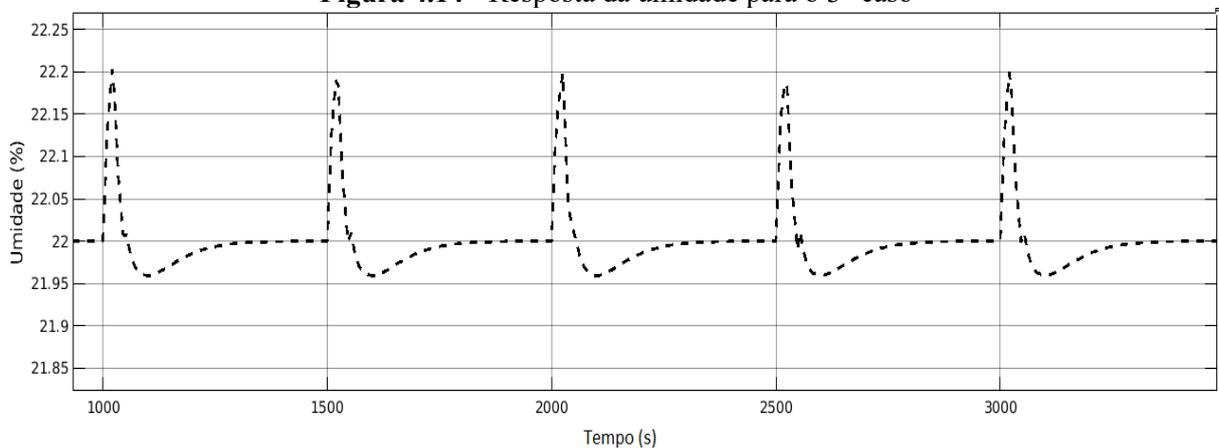
**Figura 4.13** - Diagrama de simulação para o 3º caso



Fonte: O autor (2021)

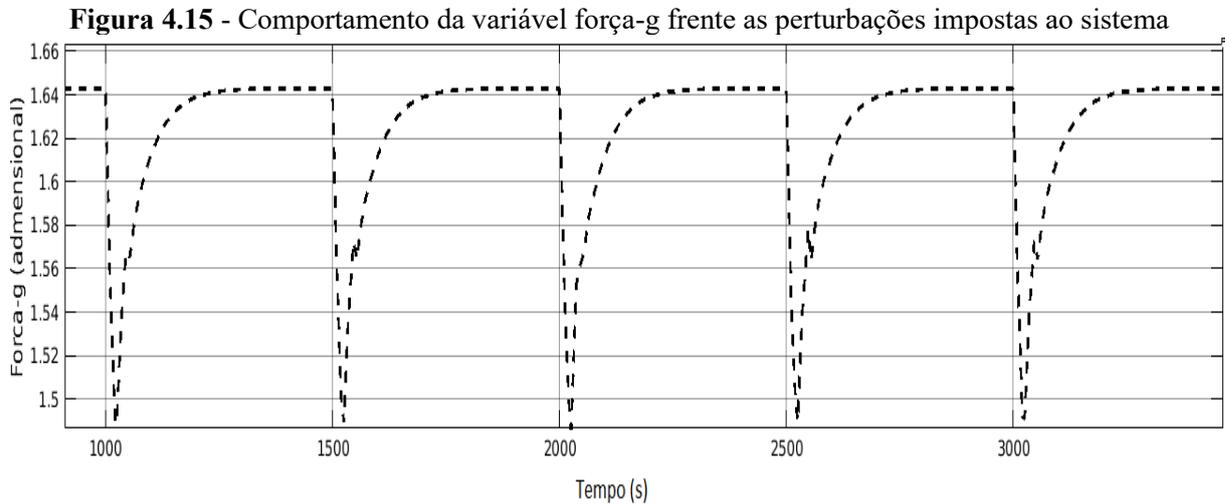
Realizando a simulação para essa nova condição, obteve-se como resposta o teor de umidade residual apresentado na **Figura 4.14**.

**Figura 4.14** - Resposta da umidade para o 3º caso



Fonte: O autor (2021)

Para manter o teor de umidade residual próximo ao valor do respectivo *setpoint* (22%), o sistema de controle do valor do adimensional de *força-g* atuou conforme apresentado na **Figura 4.15**.



Fonte: O autor (2021)

Era esperada a redução do valor do adimensional de *força-g* em resposta a cada pulso de vazão na alimentação, haja vista o fato de que os pulsos acarretam um aumento do teor de umidade residual, como observado na **Tabela 4.1**, onde se encontram os resultados do planejamento experimental realizado para essa dissertação.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados encontrados, foi possível avaliar o comportamento dinâmico, bem como simular o comportamento em estado estacionário de uma peneira vibratória em escala industrial.

Com o planejamento composto central (PCC) realizado nessa dissertação, obteve-se relações entre o teor de umidade dos sólidos retidos e a força-g, inclinação da tela de peneiramento e vazão de alimentação. O menor valor de umidade residual foi observado no experimento 03, cujo valor foi de 19,97% para os valores de força-g de 1,3, inclinação de 2,5° e vazão de alimentação de 55,9 kg/min. Já o maior valor de umidade residual foi observado no experimento 16, cujo valor foi de 25,64%, para força-g de 2,3, inclinação de 2,0° e vazão de alimentação de 300,0 kg/min.

O modelo estático identificado para o teor de umidade residual, juntamente com o modelo dinâmico que representa o comportamento do adimensional de *força-g* obtido experimentalmente, foram utilizados para simular o efeito da variável de processo adimensional de *força-g* em estado estacionário no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™, adotando uma inclinação de 2° e vazão de 76,5 kg/h. Com isso foi possível definir uma estratégia de controle do adimensional de *força-g* baseada no controle do teor de umidade residual, que se mostrou eficiente para o estudo proposto, apresentando coerência nos resultados obtidos.

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Configurar o controlador de umidade no aplicativo Labview™, acoplado ao controlador do adimensional de *força-g* existente, usando os valores dos parâmetros de sintonia dos modos de controle dos controladores obtidos nessa dissertação como ponto de partida e realizando os ajustes necessários;
- Validar experimentalmente as funções de transferência que correlacionam a umidade residual com a força-g e vazão de alimentação na peneira vibratória;
- Realizar alguns ajustes na estrutura da facilidade experimental para melhorar a condição de realização dos experimentos, tais como:
  1. **Adequação da calha de descarte de sólidos retidos na peneira.** Recomenda-se o aumento da profundidade da calha e inserir uma tubulação de recirculação a partir de uma derivação na tubulação de alimentação.

2. **Readequação do tanque de coleta de fluido passante**, aumentando as bordas do mesmo para evitar que haja respingos da solução nas proximidades da unidade experimental.
3. **Instalar um medidor de vazão/densidade do tipo Coriolis**, visto que este tipo de medidor necessita de um menor trecho reto de tubulação antes e depois do mesmo, em comparação aos medidores semelhantes. Feito isso, integrar o valor da vazão ao computador de operação da peneira e implementar um sistema de controle para manipular a rotação da bomba de recirculação/alimentação.
4. **Instalar um indicador de nível para o tanque de coleta de fluido passante**. Com a medição do nível do tanque, é possível inferir, em tempo real, a vazão de fluido passante pela peneira.

## REFERÊNCIAS

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

AFRICAN DRILLING FLUIDS. **DRILLING FLUIDS SYSTEMS**, 2020. Disponível em: <<https://africandf.com/services/drilling-fluids-systems-products>>. Acesso em: 31 de julho de 2021.

AGUIRRE, L. A. **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.  
<https://doi.org/10.3390/s7030267>

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.  
<https://doi.org/10.2118/290-G>

BRIDGES S., ROBINSON L., **A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing**, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821341-4.00011-7>

CAENN, R.; CHILLINGARB, G. 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.  
<https://doi.org/10.2118/126333-MS>

CHEN, Z; LU, C. **Humidity sensors: A review of materials and mechanisms**. *Sensors Letters*. [s.i.], p. 274-295. jul. 2005.  
<https://doi.org/10.1166/sl.2005.045>

CSA AUTOMAÇÃO. **Inversor de Frequência WEG CFW700**. Disponível em: <<https://csaautomacao.com.br/store/inversor-de-frequencia-weg-cfw700-cfw700a05p0t4db20.html>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

DIRECT INUSTRY. **Sensor de vibração ICP 622B01**. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/pcb-piezotronics/product-111589-1115533.html>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

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.

ENCICLOPEDIA BRITANNICA. **Drilling mud**, 2012. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/drilling-mud>>. Acesso em: 31 de julho de 2021.

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.

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.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.016>

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

HOBEROCK, L. L., **A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids**, Journal of Petroleum Technology, v. 32, 1980.  
<https://doi.org/10.2118/8226-PA>

MI-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.

MYERS, R. H; MONTGOMERY, D. C; ANDERSON-COOK, C., **Response Surface Methodology**, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Estados Unidos, 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USB-6008 - Dispositivo de E/S multifunção**. Disponível em: < <https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6008.html> >. Acesso em: 30 de maio de 2021.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderna**. 5 ed. São Paulo: Pearson, 2012.

PEREIRA, Ma. 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.

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.

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.  
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)80069-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)80069-3)

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.  
<https://doi.org/10.2118/125708-MS>

SEBORG, D. E; EDGAR, T. F; MELLICHAMP, D. A; DOYLE, F. J. **Process Dynamics and Control**. 4. ed. 502 p. New Jersey: John Wiley & Sons, 2019.

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

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.

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

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

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.