



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PENEIRAMENTO
VIBRATÓRIO UTILIZANDO MODELOS IDENTIFICADOS

Uberlândia - MG - Brasil

2017



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PENEIRAMENTO
VIBRATÓRIO UTILIZANDO MODELOS IDENTIFICADOS

Mateus Sousa Freitas

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 Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG - Brasil

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F866a
2018 Freitas, Mateus Sousa, 1992-
Avaliação do comportamento dinâmico do peneiramento vibratório utilizando modelos identificados [recurso eletrônico] / Mateus Sousa Freitas. - 2018.

Orientadora: Valéria Viana Murata.

Coorientador: Gedraite, Rubens.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1240>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. 2. Poços de petróleo - Fluidos de perfuração.
3. Fluidos. 4. Identificação de sistemas. I. Murata, Valéria Viana
(Orient.). II. Gedraite, Rubens (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

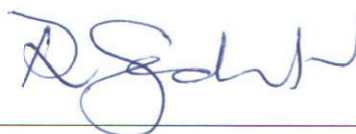
Maria Salette de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 15/02/2017.


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr.^a Maléria Viana Murata
Orientadora (FEQ/UFU)



Prof. Dr. Rubens Gedraite
Coorientador (FEQ/UFU)



Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes
(FEQ/UFU)



Dr. André Leibsohn Martins
(PETROBRAS)

Aos meus pais, LÍdia e Josué e à minha namorada, Camila.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela vida, pela capacidade de realizar este projeto e por ter conseguido chegar até aqui.

Aos meus amados pais, exemplos de caráter, pelo carinho, amor e compreensão em todos os momentos. Agradeço também por me ensinarem o caminho certo para o meu amadurecimento.

À minha namorada Camila pela paciência, amor, incentivo e parceria.

Ao professor Rubens Gedraite, coordenador deste trabalho, pelos constantes ensinamentos, cooperação e amizade. Agradeço também pela confiança depositada em mim desde o primeiro momento.

À professora Valéria Viana Murata, orientadora deste projeto, pelos ensinamentos proporcionados. Agradeço também pela contribuição grandiosa dada ao meu crescimento pessoal e profissional.

Aos professores Carlos Henrique Ataíde, Jader Conceição da Silva e Luís Cláudio Oliveira Lopes pelos aconselhamentos que permitiram a melhoria deste projeto.

Aos amigos Anderson Lima de Menezes e Vinícius Pimenta Barbosa pela constante ajuda na obtenção dos dados experimentais deste trabalho.

Aos amigos e colegas de mestrado Guilherme, Michel, Patrícia e Paula por dividirem as conquistas e angústias deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e seus docentes, por acreditarem e incentivarem o meu desenvolvimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

E a todos que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento deste projeto.

“(...) tenha sempre como meta muita força, muita determinação e, sempre, faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus que um dia você chega lá.”

Ayrton Senna

SUMÁRIO

Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xii
Lista de siglas	xiv
Lista de símbolos	xv
Resumo	xix
Abstract.....	xx
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa para a realização deste trabalho	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura desta dissertação de mestrado	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Perfuração de poços	4
2.2 Fluidos de perfuração	4
2.3 Sistema de recuperação de fluido de perfuração	5
2.3.1 Peneiramento vibratório	8
2.3.2 Removedores de gás	8
2.3.3 Hidrociclones.....	9
2.3.4 Centrífugas decantadoras.....	10
2.4 Peneiras vibratórias	11
2.4.1 Funcionamento da peneira vibratória	12
2.4.2 Tipos de movimentos vibratórios	13
2.4.3 Configurações e associação de peneiras	17
2.4.4 Tipos de telas	19

2.4.5	Desempenho de operação da peneira vibratória	22
2.4.5.1	Teor de umidade do sólido retido	22
2.4.5.2	Eficiência granulométrica de separação	23
2.4.6	Influência das variáveis de processo na operação do peneiramento vibratório	27
2.4.6.1	Influência da força-g.....	28
2.4.6.2	Influência da inclinação da peneira	28
2.4.6.3	Influência da abertura da tela	30
2.4.6.4	Influência da concentração de sólidos na alimentação	30
2.4.6.5	Influência da vazão de alimentação	31
2.4.7	Automação e controle de peneiras vibratórias	31
2.5	Identificação experimentais de processos	33
2.5.1	Representação utilizando funções de transferências	35
 CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS		39
3.1	Unidade experimental	39
3.1.1	Peneira vibratória.....	40
3.1.2	Motovibradores.....	41
3.1.3	Sistema de controle de força-g da peneira.....	42
3.2	Sintonia do controlador	44
3.3	Fluido e sólido utilizados	45
3.4	Obtenção dos resultados experimentais	46
3.4.1	Variáveis independentes avaliadas	47
3.4.2	Resposta avaliada	48
3.4.3	Estratégia experimental	49
3.5	Análise dos dados experimentais	53
3.5.1	Identificação do processo no estado estacionário.....	53
3.5.2	Identificação do processo após a perturbação	54

3.5.3 Análise do intervalo transiente	56
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 Avaliação do sistema de controle	58
4.2 Avaliação das respostas no estado estacionário	60
4.3 Avaliação das respostas após a perturbação	65
4.3.1 Resposta dinâmica em relação à força-g	65
4.3.2 Resposta dinâmica em relação à concentração de sólidos	70
4.3.3 Resposta dinâmica em relação à vazão de alimentação	73
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	76
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE A: ESTUDOS PRELIMINARES	85
APÊNDICE B: AJUSTE DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA UTILIZANDO O SOFTWARE EXCEL	88
APÊNDICE C: RESULTADOS EXPERIMENTAIS	91
C.1 Perturbação na força-g	91
C.2 Perturbação na concentração de sólidos	93
C.3 Perturbação na vazão de alimentação	95
APÊNDICE D: AJUSTE DOS MODELOS DINÂMICOS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da perfuração de poços	4
Figura 2.2 – Fluxograma do sistema de circulação do fluido de perfuração	6
Figura 2.3 – Fluxograma do tratamento do fluido de perfuração na seção de remoção	7
Figura 2.4 – Peneira vibratória industrial	8
Figura 2.5 – Ilustração do escoamento dentro de um hidrociclone	10
Figura 2.6 – Centrífuga decantadora	11
Figura 2.7 – Esquema de um equipamento de peneiramento vibratório	12
Figura 2.8 – Facilidade de peneiramento com a tela vibratória.....	13
Figura 2.9 – Ilustração do movimento elíptico desbalanceado (A) e circular (B).....	14
Figura 2.10 – Ilustração do movimento linear (A e B) e elíptico balanceado (C e D)	16
Figura 2.11 – Configurações de telas simples e em série	18
Figura 2.12 – Movimento da partícula sobre telas horizontais e com inclinação negativa	19
Figura 2.13 – Associação de telas em um único equipamento	19
Figura 2.14 – Malhas plana e quadrada (A) e multicamadas (B)	20
Figura 2.15 – Caracterização de uma tela quadrada de 8 mesh.....	21
Figura 2.16 – Fluxograma de operação da peneira	22
Figura 2.17 – Grade de eficiência real e ideal de uma peneira vibratória	26
Figura 2.18 – Processo representado a partir de um modelo	34
Figura 3.1 – Ilustração da unidade experimental utilizada	39
Figura 3.2 – Vistas lateral e superior da peneira vibratória	41
Figura 3.3 – Vistas lateral e frontal do motovibrador.....	42
Figura 3.4 – Sensor piezoelétrico utilizado na medição da vibração	42
Figura 3.5 – Programação do aplicativo desenvolvido no Labview®.....	43
Figura 3.6 – Programação do controlador desenvolvido no Labview®	44
Figura 3.7 – Diagrama de blocos do sistema de controle <i>feedback</i>	44
Figura 3.8 – Painel de operação da peneira vibratória.....	50
Figura 3.9 – Linha do tempo da realização de um experimento.....	51
Figura 3.10 – Configuração de realização dos experimentos com abordagem multivariável ..	52
Figura 4.1 – Respostas da peneira aos controladores P e PI.....	59
Figura 4.2 – Influência do parâmetro τ_1	59
Figura 4.3 – Superfície de resposta para o teor de umidade em estado estacionário	62

Figura 4.4 – Sólidos sobre a tela ($\Gamma = 3,00$; $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	63
Figura 4.5 – Sólidos sobre a tela ($\Gamma = 3,00$; $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	64
Figura 4.6 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude 2,0 força-g	68
Figura 4.7 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude 2,0 força-g	68
Figura 4.8 – Modelo ajustado (Degrau de amplitude 2,0 na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)	69
Figura 4.9 – Modelo ajustado (Degrau de amplitude 2,0 na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min)	69
Figura 4.10 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude -2,0 % na concentração de sólidos ($\Gamma = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	71
Figura 4.11 – Modelo ajustado ($\Gamma = 5,0\%$, degrau de amplitude -2,0 % em C_V e $F = 13$ kg/min)	72
Figura 4.12 – Respostas do teor de umidade em relação a um degrau de amplitude 12 kg/min na vazão de alimentação	75
Figura A.1 – Material sobre a tela da peneira ($\Gamma = 1,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	85
Figura A.2 – Material sobre a tela da peneira ($\Gamma = 2,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	86
Figura A.3 – Material sobre a tela da peneira ($\Gamma = 3,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	86
Figura A.4 – Relação entre a força-g e a rotação mínima dos motovibradores.....	87
Figura B.1 – Planilha utilizada no ajuste da função de transferência	89
Figura B.2 – Fluxograma do comportamento da terceira coluna da planilha de ajuste	90
Figura B.3 – Janela do comando <i>Solver</i>	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Nomenclatura de tela proposta pela API	22
Tabela 2.2 – Função de transferência de um sistema integrador	35
Tabela 2.3 – Função de transferência de primeira ordem.....	36
Tabela 2.4 – Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (FOPDT)	37
Tabela 2.5 – Função de transferência de segunda ordem	38
Tabela 3.1 – Equipamentos e instrumentos da unidade experimental	40
Tabela 3.2 – Granulometria do sólido utilizado	46
Tabela 3.3 – Níveis codificados utilizados no planejamento experimental.....	47
Tabela 3.4 – Tempo de amostragem dos sólidos retidos	48
Tabela 3.5 – Quantidades de cada componente da suspensão	49
Tabela 3.6 – Planejamento experimental.....	52
Tabela 3.7 – Representação dos modelos dinâmicos obtidos para o teor de umidade (M)	55
Tabela 4.1 – Comparação entre os controladores P e PI	58
Tabela 4.2 – Avaliação do controlador PI	59
Tabela 4.3 – Teores de umidade dos sólidos retidos em estado estacionário	60
Tabela 4.4 – Teores de umidade médio dos sólidos retidos em estado estacionário	61
Tabela 4.5 – Variação do teor de umidade após degrau na força-g.....	66
Tabela 4.6 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da força-g (modelo FOPDT)	66
Tabela 4.7 – Intervalos transientes após perturbação na força-g.....	68
Tabela 4.8 – Variação do teor de umidade após degrau na concentração	70
Tabela 4.9 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da concentração de sólidos	70
Tabela 4.10 – Intervalos transientes após perturbação na concentração	72
Tabela 4.11 – Variação do teor de umidade após degrau na vazão de alimentação	73
Tabela 4.12 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da concentração de sólidos ..	74
Tabela 4.13 – Intervalos transientes após perturbação na vazão de alimentação	75
Tabela C.1 – Experimento 1 (Degrau na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	91
Tabela C.2 – Experimento 2 (Degrau na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 25$ kg/min).....	91
Tabela C.3 – Experimento 3 (Degrau na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min).....	92
Tabela C.4 – Experimento 4 (Degrau na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 25$ kg/min)	92
Tabela C.5 – Experimento 5 (Degrau na concentração, $\Gamma = 3,00$ e $F = 13$ kg/min)	93
Tabela C.6 – Experimento 6 (Degrau na concentração, $\Gamma = 3,00$ e $F = 25$ kg/min)	93

Tabela C.7 – Experimento 7 (Degrau na concentração, $\Gamma = 5,00$ e $F = 13$ kg/min)	94
Tabela C.8 – Experimento 8 (Degrau na concentração, $\Gamma = 5,00$ e $F = 25$ kg/min)	94
Tabela C.9 – Experimento 9 (Degrau na vazão, $\Gamma = 3,00$ e $C_V = 1,0\%$)	95
Tabela C.10 – Experimento 10 (Degrau na vazão, $\Gamma = 3,00$ e $C_V = 5,0\%$)	95
Tabela C.11 – Experimento 11 (Degrau na vazão, $\Gamma = 5,00$ e $C_V = 1,0\%$)	96
Tabela C.12 – Experimento 12 (Degrau na vazão, $\Gamma = 5,00$ e $C_V = 5,0\%$)	96
Tabela D.1 – Parâmetros ajustados para o experimento 1	97
Tabela D.2 – Parâmetros ajustados para o experimento 2	97
Tabela D.3 – Parâmetros ajustados para o experimento 3	97
Tabela D.4 – Parâmetros ajustados para o experimento 4	97
Tabela D.5 – Parâmetros ajustados para o experimento 5	97
Tabela D.6 – Parâmetros ajustados para o experimento 6	98
Tabela D.7 – Parâmetros ajustados para o experimento 7	98
Tabela D.8 – Parâmetros ajustados para o experimento 8	98
Tabela D.9 – Parâmetros ajustados para o experimento 9	98
Tabela D.10 – Parâmetros ajustados para o experimento 10	98
Tabela D.11 – Parâmetros ajustados para o experimento 11	99
Tabela D.12 – Parâmetros ajustados para o experimento 12	99

LISTA DE SIGLAS

AADE	<i>American Association of Drilling Engineers</i> – Associação Americana de Engenheiros de Perfuração
API	<i>American Petroleum Institute</i> – Instituto do Petróleo Americano
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> – Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
BOED	<i>Barrels of Oil Equivalent per Day</i> – Barris equivalentes de óleo por dia
DEM	<i>Discrete Element Method</i> – Métodos de elementos discretos
FOPDT	<i>First Order Plus Dead Time</i> – Função de transferência de primeira ordem com tempo morto
IAE	<i>Integral of the Absolute value of the Error</i> – Integral do valor de erro absoluto
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
P	Controlador proporcional
PI	Controlador proporcional e integral
PID	Controlador proporcional, integral e derivativo
SQR	Soma quadrática de resíduos

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Aceleração da peneira	[m s ⁻²]
F_{Mot}	Força resultante referente à vibração da peneira	[N]
m_p	Massa da cesta vibratória da peneira	[kg]
m_F	Massa do fluido de perfuração	[kg]
g	Aceleração da gravidade	[m s ⁻²]
Γ	Aceleração adimensionalizada da peneira (força-g)	[-]
G_y	Aceleração do material sobre a tela na vertical	[m s ⁻²]
α	Inclinação da tela da peneira	[-]
ω	Velocidade angular	[rad s ⁻¹]
A_y	Amplitude de vibração na direção vertical	[m]
A_x	Amplitude de vibração na direção horizontal	[m]
\dot{X}	Velocidade de transporte na horizontal adimensionalizada	[m s ⁻¹]
v	Velocidade de transporte na horizontal	[m s ⁻¹]
a	Parâmetro de modelagem específico do material	[-]
b	Parâmetro de modelagem relacionado à inclinação da peneira	[-]
θ_R	Tempo de residência do material na peneira vibratória	[s]
L	Comprimento da tela da peneira	[m]
D	Tamanho da abertura de tela	[μ m]
n_{mesh}	Contagem <i>mesh</i>	[-]
d_w	Diâmetro do fio da tela da peneira	[μ m]
D_{100}	Diâmetro máximo do sólido na corrente passante	[μ m]
x'_R	Razão de fluido no sólido retido	[-]
m_m	Massa de sólido úmido	[kg]
m_d	Massa de sólido seco	[kg]
M	Teor de umidade do sólido retido na peneira	[-]
F	Vazão mássica da alimentação da peneira	[kg min ⁻¹]
R	Vazão mássica de sólido retido	[kg min ⁻¹]
U	Vazão mássica de fluido passante	[kg min ⁻¹]
x_F	Fração mássica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
x_R	Fração mássica de sólidos retidos	[-]

x_U	Fração mássica de sólidos na corrente passante	[-]
E_R	Razão entre a massa de sólidos retidos e alimentados	[-]
E_U	Razão entre a massa de sólidos passantes e alimentados	[-]
$\frac{dY_F}{d(d_p)}$	Distribuição de frequência das partículas na corrente de alimentação	$[\mu\text{m}^{-1}]$
$\frac{dY_R}{d(d_p)}$	Distribuição de frequência das partículas de sólido retido	$[\mu\text{m}^{-1}]$
$\frac{dY_U}{d(d_p)}$	Distribuição de frequência das partículas na corrente passante	$[\mu\text{m}^{-1}]$
d_p	Diâmetro de partícula	$[\mu\text{m}]$
G_R	Grade de eficiência de separação	[-]
η_R	Eficiência de separação do material retido	[-]
η_U	Eficiência de separação do material passante	[-]
Y_F	Distribuição granulométrica acumulativa dos sólidos na alimentação	[-]
Y_R	Distribuição granulométrica acumulativa de sólido retido	[-]
Y_U	Distribuição granulométrica acumulativa dos sólidos passantes	[-]
η	Eficiência granulométrica global de separação	[-]
C_V	Concentração volumétrica de sólidos na alimentação	[-]
$u(t)$	Variável de entrada de um modelo	[-]
$d(t)$	Perturbação	[-]
$y(t)$	Resposta	[-]
t, t_i, t_{i+1}	Tempo	[s]
$G(s)$	Função de transferência	[-]
α_i, β_i	Coefficientes constantes de uma função de transferência genérica	[-]
m	Ordem do numerador da função de transferência	[-]
n	Ordem do denominador da função de transferência	[-]
s	Variável referente ao tempo da transformada de Laplace	$[\text{s}^{-1}]$
θ	Tempo morto	[s]
K	Ganho da função de transferência	[-]
τ	Constante de tempo	[s]

ζ	Fator de amortecimento	[-]
M_{step}	Magnitude da perturbação degrau	[-]
$y(\infty)$	Valor da resposta em regime permanente	[-]
$y(0^-)$	Valor inicial da resposta	[-]
y_i	Resposta predita pelo modelo	[-]
Y_i	Resposta obtida a partir de experimentos	[-]
$e(t)$	Erro: diferença entre o <i>set point</i> e a variável de processo	[-]
Γ_i, Γ_{i+1}	Força-g medida no tempo i e $i+1$	[-]
SP_i, SP_{i+1}	<i>Set point</i> no tempo i e $i+1$	[-]
OS	<i>Overshoot</i>	[-]
K_C	Ganho proporcional do controlador	[rpm]
τ_I	Constante de tempo integral do controlador	[s]
x_1	Variável codificada referente à força-g	[-]
x_2	Variável codificada referente à concentração de sólidos na alimentação	[-]
x_3	Variável codificada referente à vazão de alimentação	[-]
m_s	Massa de sólido na suspensão preparada	[kg]
ρ_s	Densidade do sólido utilizado na suspensão	[kg m ⁻³]
V_w	Volume de água na suspensão	[m ³]
$b_0^{ss}, b_1^{ss}, b_2^{ss}, b_3^{ss}, b_{12}^{ss}, b_{13}^{ss}, b_{23}^{ss}$	Parâmetros da equação que relaciona o teor de umidade às variáveis independentes em estado estacionário	[-]
$K_1^M, \tau_1^M, \theta_1^M$	Parâmetros da relação dinâmica entre umidade e força-g	[-], [s], [s]
$K_2^M, \tau_2^M, \theta_2^M$	Parâmetros da relação dinâmica entre umidade e concentração	[-], [s], [s]
$K_3^M, \tau_3^M, \theta_3^M$	Parâmetros da relação dinâmica entre umidade e vazão	[s kg ⁻¹], [s], [s]
$b_0^1, b_2^1, b_3^1, b_{23}^1$	Vetores de coeficientes dos parâmetros referentes à força-g	[-]
$b_0^2, b_1^2, b_3^2, b_{13}^2$	Vetores de coeficientes dos parâmetros referentes à concentração	[-]
$b_0^3, b_1^3, b_2^3, b_{12}^3$	Vetores de coeficientes dos parâmetros referentes à vazão	[-]
t_t	Intervalo transiente	[s]
t_{t1}, t_{t2}, t_{t3}	Intervalo transiente referente à cada variável independente	[s]

$b_0^{t1}, b_2^{t1}, b_3^{t1}, b_{23}^{t1}$	Parâmetros da equação que relaciona o intervalo transiente de uma perturbação na força-g às demais variáveis independentes	[s ⁻¹]
$b_0^{t2}, b_1^{t2}, b_3^{t2}, b_{13}^{t2}$	Parâmetros da equação que relaciona o intervalo transiente de uma perturbação na concentração às demais variáveis independentes	[s ⁻¹]
$b_0^{t3}, b_1^{t3}, b_2^{t3}, b_{12}^{t3}$	Parâmetros da equação que relaciona o intervalo transiente de uma perturbação na vazão às demais variáveis independentes	[s ⁻¹]
$\bar{M}_{inicial}$ (%)	Teor de umidade médio antes da perturbação	[-]
\bar{M}_{final} (%)	Teor de umidade médio após a perturbação	[-]
$\Delta\bar{M}$ (%)	Variação do teor de umidade com a perturbação	[-]

RESUMO

A presença de sólidos no fluido de perfuração altera suas características, influenciando o tempo de perfuração, a vida útil da broca e o funcionamento dos equipamentos mecânicos envolvidos na operação. Para o reaproveitamento desse fluido e atendimento às restrições ambientais, é necessária a separação entre fluido e sólidos. A primeira etapa dessa separação utiliza peneiras vibratórias em série, que favorecem a separação e o desague da lama. O objetivo desse trabalho foi caracterizar experimentalmente o comportamento dinâmico da peneira e relacionar a umidade dos sólidos retidos com a força-g, a concentração de sólidos alimentados e a vazão de alimentação. Utilizando-se de uma lama formada por uma suspensão de areia, água e goma xantana (com densidade e reologia semelhantes ao fluido real), modelos que representam os estados estacionário e transiente da separação entre a areia e o fluido foram identificados. Os experimentos foram executados segundo um planejamento fatorial 2^k e foram realizados em uma unidade experimental em escala piloto com uma tela de 175 mesh. O modelo dinâmico foi obtido pela análise da resposta da peneira a perturbações individuais nas variáveis independentes avaliadas (força-g, concentração de sólidos e vazão de alimentação). Esses dados foram representados por funções de transferência de primeira ordem com tempo morto. Os resultados de umidade obtidos após a estabilização da resposta foram utilizados para a representação do teor em estado estacionário. O ponto de operação da peneira que proporcionou a obtenção de sólidos menos úmidos foi força-g (3,0), concentração da lama (5,0 %) e vazão da lama (13 kg/min). Uma diminuição na concentração de sólidos é capaz de dobrar o valor da umidade; em contrapartida, a vazão apresentou pouca influência no teor de umidade dos sólidos retidos. O sistema exibiu transições mais lentas após perturbações na força-g, entretanto o aumento da concentração de sólidos diminuiu significativamente o tempo dessa transição.

Palavras-chave: planejamento fatorial, identificação de sistemas, peneiramento via úmida, fluido de perfuração

ABSTRACT

The presence of solids in the drilling fluid changes its characteristics influencing the drilling time, the life of the drill and the operation of mechanical equipment involved. For the reutilization of this fluid and compliance with environmental constraints, the separation between fluid and solid is required. The first step of this separation uses shale shakers in series, favoring separation and desague mud. The purpose of this study was to experimentally characterize the dynamic behavior of the sieve and relate the moisture of the retained solid with the g-force, concentration of solids fed and feed flow. Using a fluid formed by a sand slurry, water and xanthan gum (density and reology similar to real fluids), models that describe the steady and transient state were identified. The experiments followed a factorial design 2^k and were conducted in a unit on a pilot scale with a 175 mesh sieve. The dynamic model was obtained by the analysis of the sieve answer about individual disturbances in independent variables (g-force, concentration of solids fed and feed flow). These data were represented by first order transfer functions plus dead time in which parameters were adjusted by Excel® software. The moisture data obtained after the stabilization of the response were used for the representation of the moisture content in the steady state. The best operating point of the sieve (lowest moisture) was 3.0 g-force; 5.0% concentration and 13 kg/min flow rate. A decrease in the concentration of solids is able to double the amount of moisture. On the other hand, feed flow had little influence on the response of the equipment. The system showed less agile transitions after disturbances in g-force, though the increase in solids concentration significantly decreased the time of the transition.

Keywords: factorial design, system identification, wet screening, drilling fluid

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A primeira perfuração de um poço com a finalidade de encontrar petróleo no Brasil ocorreu em 1897. Essa perfuração se estendeu por 488 metros e produziu aproximadamente meio metro cúbico total de óleo. Até o início da década de 1940, cerca de 80 poços já existiam em terras brasileiras e em 1953, o governo de Getúlio Vargas criou a Petrobras, impulsionando as pesquisas acerca do petróleo no Brasil. Nessa época, a produção brasileira correspondia a aproximadamente 120 Barris Equivalentes de Óleo por Dia (BOED). Em 2020, a Petrobras projeta alcançar uma produção de 3,7 milhões BOED (THOMAS, 2001, PETROBRAS, 2016).

Na perfuração de poços são empregados fluidos com a principal finalidade de minimizarem a concentração de sólidos ao redor da broca e ao longo do poço. O avanço e o movimento de rotação da broca quebram a formação rochosa, criando pequenos fragmentos de rochas, chamados de sólidos de perfuração. Os fluidos de perfuração são bombeados da superfície pelo duto de perfuração e retornam à superfície transportando esses sólidos pela região anular formada pelo duto e a parede do poço. Ao alcançar a superfície, os sólidos são separados de modo a permitir o reaproveitamento do fluido e atender às restrições ambientais (MARSHALL; BRANDT, 1978, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), 2005, CHARLES; SAYLE, 2010).

1.1 JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO

A peneira vibratória é o primeiro equipamento utilizado para controle de sólidos na atividade de perfuração de poços de petróleo e gás. O movimento vibratório desse equipamento induz uma força no sólido, que é empurrado para cima. Por inércia, o fluido não é capaz de acompanhar completamente o sólido, ocorrendo a separação entre esses materiais. O líquido separado escoar pelas aberturas da tela, enquanto o sólido permanece retido sobre a peneira. Essa operação é utilizada para a remoção dos sólidos mais grosseiros enquanto os mais finos são removidos em outras etapas do processo, geralmente por hidrociclones e centrífugas (LAL; HOBEROCK, 1988, ASME, 2005, RAJA, 2012). Outras maneiras de diminuir o descarte de material sólido contaminado proveniente da peneira e reduzir a reposição (*make up*) de fluido de perfuração são os principais benefícios esperados deste estudo. Dessa maneira, espera-se reduzir os impactos ambientais gerados durante a perfuração de um poço.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, há significativa dificuldade de se obter modelos fenomenológicos que sejam capazes de descrever o comportamento da mistura sólido-líquido em um processo de separação por peneiras vibratórias. Poucos trabalhos na literatura apresentam análises dinâmicas e experimentais de peneiras vibratórias. As principais variáveis que afetam o desempenho do peneiramento são: abertura da tela, aceleração do movimento vibratório da peneira, inclinação da tela, características do material sólido, reologia do fluido, distribuição de tamanho de partículas do sólido de perfuração, concentração de sólidos na alimentação, vazão de alimentação, interação partícula-partícula e fluido-partícula (FOWLER; LIM, 1959, DORRY, 2010; RAJA et al., 2012, GUERREIRO et al., 2016).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é caracterizar o comportamento dinâmico da secagem realizada por uma peneira vibratória utilizada para separar o fluido dos sólidos de perfuração, através de modelos identificados (funções de transferência de primeira ordem com tempo morto). São utilizados dados experimentais de teor de umidade dos sólidos retidos, aceleração, concentração de sólidos e vazão de alimentação para avaliar o desague da peneira vibratória.

Esse projeto busca identificar quais variáveis de processo interferem mais na secagem dos sólidos por uma peneira vibratória e em quais condições a operação proporciona um sólido com menor teor de umidade. Dessa maneira, espera-se relacionar o teor de umidade dos sólidos retidos por um protótipo de peneira vibratória com variáveis de processo importantes em sua operação: aceleração do equipamento, concentração de sólidos alimentados e vazão de alimentação. Esse projeto também visa identificar como perturbações nessas variáveis influenciam a resposta do equipamento e quão extenso são os intervalos de transição após essas perturbações.

1.3 ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Com a finalidade de se alcançar o objetivo proposto nessa dissertação, o texto a seguir é apresentado em forma de capítulos. No Capítulo 1, são apresentadas as motivações e objetivos usados na realização da pesquisa e de que maneira o texto está organizado. Em seguida, no Capítulo 2, é exposta a fundamentação teórica da perfuração de poços e remoção de sólidos do fluido de perfuração. Esse capítulo também descreve o funcionamento do peneiramento

vibratório e aborda a revisão bibliográfica pertinente a esse assunto. No Capítulo 3, são apresentados os materiais e metodologias utilizadas no desenvolvimento da pesquisa. No Capítulo 4, são exibidos e discutidos os resultados encontrados. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa desenvolvida bem como as sugestões para os próximos trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS

A perfuração de poços de petróleo e gás faz o uso de fluidos de perfuração enquanto a broca avança até a profundidade necessária. Nesse processo, o fluido é geralmente bombeado através do duto de perfuração e injetado por bocais na broca. O avanço e movimento de rotação da broca quebram a formação rochosa, criando pequenos pedaços de rochas, chamados de sólidos de perfuração. Por fim, o fluido de perfuração carrega o material sólido ao longo da região anular entre o duto e a parede do poço, impedindo o acúmulo desse material na região perfurada (CHARLES; SAYLE, 2010). Na Figura 2.1 é ilustrada essa operação.

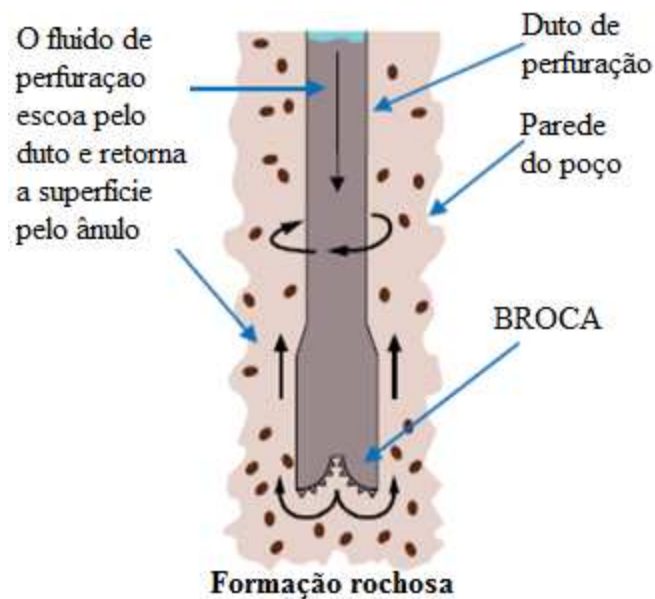


Figura 2.1 – Esquema da perfuração de poços. Adaptado de CHARLES; SAYLE (2010)

2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

O fluido de perfuração pode ser caracterizado como qualquer fluido tipicamente utilizado em perfurações de poços de petróleo e gás, sendo bombeado da superfície até a broca pelo duto de perfuração e retornando a superfície pela região anular. Esse fluido é uma mistura complexa e desempenha diversos objetivos durante a perfuração (MARSHALL; BRANDT,

1978, ASME, 2005, CHARLES; SAYLE, 2010). As principais finalidades dos fluidos de perfuração são:

- resfriar a broca;
- remover os sólidos de perfuração do fundo do poço;
- manter os sólidos em suspensão quando a circulação está parada;
- carregar os sólidos até a superfície do poço;
- selar formações rochosas permeáveis e controlar a pressão do poço;
- transmitir energia hidráulica para broca;
- minimizar os danos ao reservatório;
- possibilitar análise da formação rochosa;
- controlar a corrosão;
- facilitar a cimentação do poço;
- minimizar impactos ambientais.

Os fluidos de perfuração são comumente classificados de acordo com o fluido base. Os três principais tipos são gasosos, aquosos e não aquosos, sendo os segundo e terceiro os mais utilizados. Os fluidos de base gasosa são formados geralmente por ar ou nitrogênio. O material de base aquosa, além da água, é formado por barita e betonita para controlar a densidade da emulsão, além de outras substâncias como diluentes, lubrificantes e agentes de controle de filtração. Os fluidos de perfuração de base não aquosa são emulsões formadas por fluido não aquoso (em maior quantidade), água (em menor quantidade), barita e emulsificantes. A barita, assim como no fluido aquoso, é adicionada para o controle da densidade e a razão entre água e o fluido base altera a viscosidade. Os emulsificantes conferem estabilidade para a mistura bem como, o fluido não aquoso atua como agente lubrificante (THOMAS, 2001, ASME, 2005, CHARLES; SAYLE, 2010).

2.3 SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Os sólidos de perfuração são materiais incorporados no fluido na forma de pequenos fragmentos da rocha escavada. O tamanho dessas partículas varia entre menores que um micrômetro e maiores que 1500 micrômetros e sua composição é a mesma da formação rochosa perfurada. A presença de sólidos altera diversas características do fluido que, por sua vez,

influenciam no tempo de perfuração, na vida útil da broca, das bombas e de outros equipamentos mecânicos envolvidos na operação. Para o reaproveitamento deste fluido e atendimento às restrições ambientais, que impedem o descarte dos sólidos contaminados, é necessária a separação destes materiais (MARSHALL; BRANDT, 1978, ASME, 2005, ROBINSON, 2006, PERENCO, 2012). Na recuperação do fluido de perfuração, é comum a utilização de um sistema de circulação como apresentado na Figura 2.2, composto por seções de remoção, adição e bombeamento.

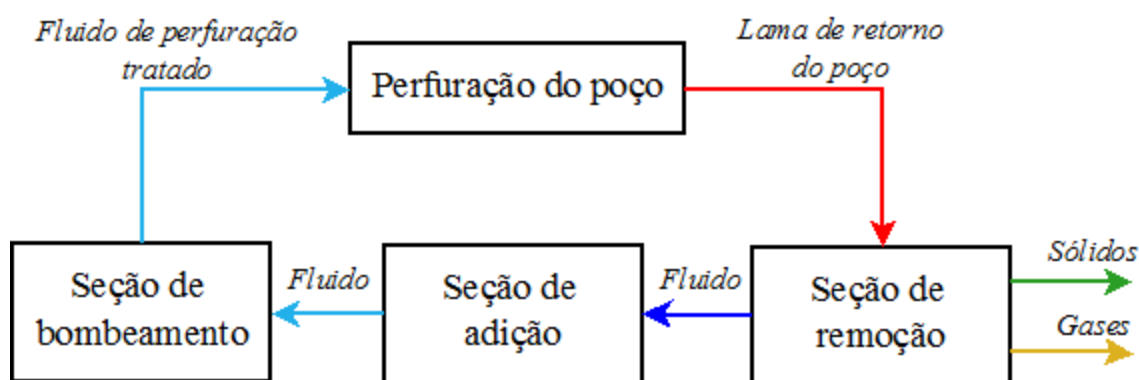


Figura 2.2 – Fluxograma do sistema de circulação do fluido de perfuração

A seção de remoção é responsável pela separação de sólidos e gases indesejáveis para o fluido. Nessa etapa, ocorre um tratamento mecânico com diferentes equipamentos e cada operação é projetada para um tamanho de partícula diferente, sendo importante remover primeiro os sólidos maiores e em seguida os menores. A peneira vibratória é o primeiro dispositivo utilizado nessa planta e é responsável pela remoção dos sólidos mais grosseiros. Já a centrífuga é um dos últimos equipamentos utilizados e é responsável pela remoção do material mais fino (MARSHALL; BRANDT, 1978, HOBEROCK, 1980, ASME, 2005). CHARLES; SAYLE (2010) explicam que esses sistemas ainda possuem a habilidade de se adaptarem a diferentes operações e é comum o *bypass* de algum equipamento dependendo das condições e características do fluido. Na Figura 2.3 é apresentado o fluxograma geral da seção de remoção de sólidos, destacando os principais separadores mecânicos utilizados.

A seção de adição é responsável por acrescentar produtos químicos, buscando manter constantes as características físico-químicas do fluido, como pH e viscosidade. Nessa etapa, ocorre a adição de barita e betonita, responsáveis pelo controle da densidade do fluido de perfuração. É comum também a adição de um novo fluido, buscando compensar as perdas durante sua circulação. Em seguida, o fluido segue para seção de bombeamento, onde são

realizadas análises físicas e químicas do material e ele retorna ao poço (ASME, 2005, CHARLES; SAYLE, 2010).

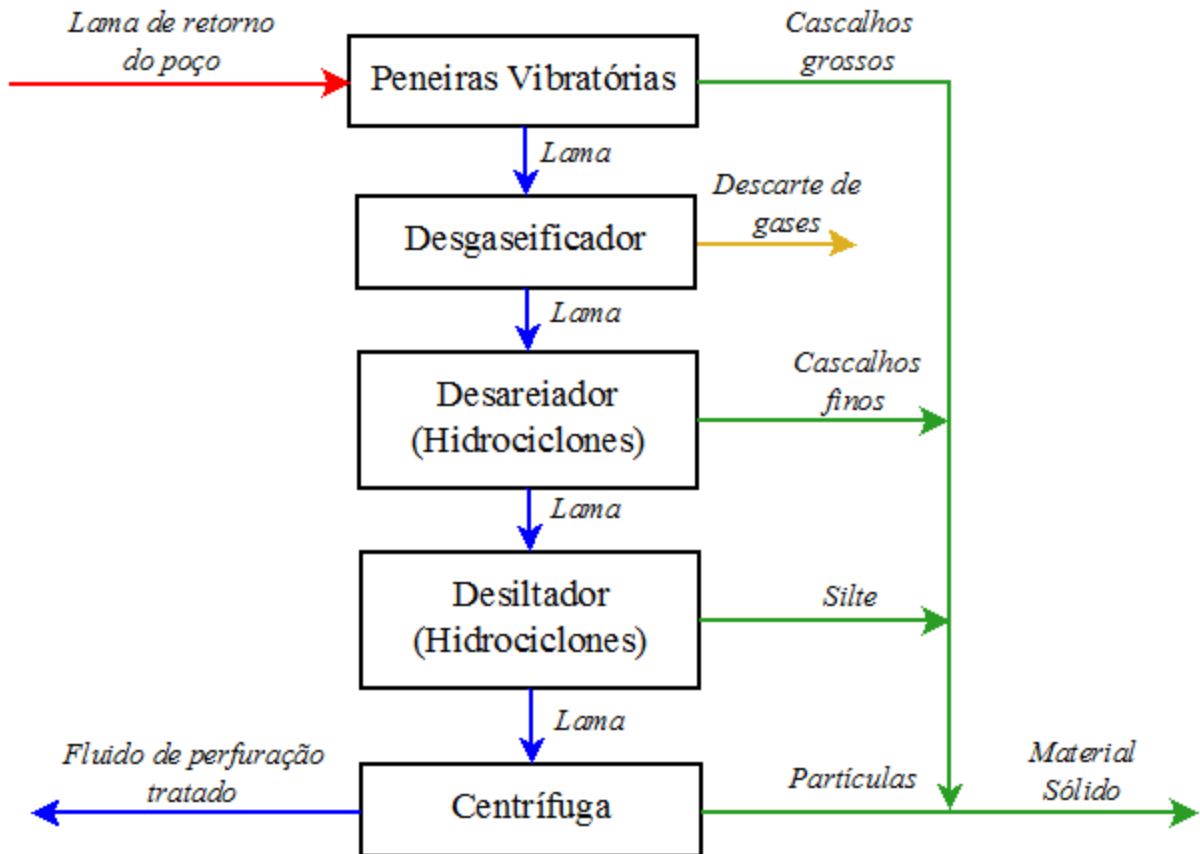


Figura 2.3 – Fluxograma do tratamento do fluido de perfuração na seção de remoção

Existem diversas vantagens para o tratamento do fluido de perfuração. A redução do custo da perfuração é o principal objetivo, visto que essa etapa diminui o gasto com um novo fluido e estende a vida útil da broca e do sistema de bombeamento. O tratamento do material também aumenta a taxa de perfuração, reduz problemas de cimentação do poço, controla a reologia da lama, reduz o volume de material descartado e maximiza a precisão e uso de informações obtidas do poço. Com o tratamento desse material, suas viscosidade e massa específica são controladas, se previne a erosão do poço e falhas nas tubulações (MARSHALL; BRANDT, 1978, NJOBUNWU, WOBO, 2007). CHARLES; SAYLE (2010) apontam que o controle de sólidos deve zelar pela segurança e saúde dos operadores e do meio ambiente.

MARSHALL; BRANDT (1978) apresentam outros métodos menos utilizados no controle de sólidos no fluido de perfuração: diluição, descarte e tratamento químico. A diluição é caracterizada pela mistura com um novo fluido, buscando diminuir a concentração dos sólidos. A ASME (2005) aponta que, se os sólidos de perfuração forem muito finos e não for

possível separá-los com o tratamento mecânico, a única solução é a diluição do material. O descarte de fluido é utilizado quando ocorrem sucessivas diluições e esse método não causa o efeito necessário. Por fim, o tratamento químico é caracterizado pelo uso da floculação para remoção dos sólidos. Geralmente, esse método é utilizado em conjunto com os separadores mecânicos (MARSHALL; BRANDT, 1978).

2.3.1 Peneiramento vibratório

As peneiras vibratórias são utilizadas em diversas indústrias com a finalidade de separar sólidos e líquidos. Em geral, elas são compostas por uma tela vibratória que facilita a passagem do fluido pelas suas aberturas, enquanto o material sólido permanece retido. As peneiras vibratórias são os primeiros equipamentos no tratamento do fluido de perfuração, sendo responsáveis por remover sólidos grosseiros, geralmente maiores que 74 μm (ASME, 2005; RAJA, 2012). Na Figura 2.4 é apresentada uma peneira vibratória utilizada no processamento de fluido de perfuração. Na Seção 2.4 será apresentada a operação de peneiramento vibratório com um maior detalhamento.



Figura 2.4 – Peneira vibratória industrial

2.3.2 Removedores de gás

É comum a presença de hidrocarbonetos gasosos dissolvidos ou comprimidos no fluido de perfuração. Ao chegar à superfície, esses gases se expandem e devem ser removidos para evitar instabilidade na operação de bombeamento. Dois tipos de desgaseificadores podem ser utilizados: atmosférico ou a vácuo. No removedor de gás atmosférico, o fluido é pulverizado

e se choca com a parede da câmara de separação. O impacto, combinado com o tamanho da gota, facilita a separação do gás. O desgaseificador a vácuo aplica uma baixa pressão enquanto o fluido escoar por defletores, provocando a remoção do gás (AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS (AADE), 1999).

2.3.3 Hidrociclones

O hidrociclone é um equipamento de separação sólido-líquido que utiliza o escoamento centrífugo como força motriz para remoção do material particulado. Nos hidrociclones, o fluido é alimentado tangencialmente ao equipamento próximo ao seu topo e com alta velocidade. A geometria dessa alimentação forma uma espiral próxima a sua parede, estabelecendo um vórtice descendente. O material particulado é separado até a parede e empurrado para baixo, saindo no *underflow*. A maior parte do líquido purificado escoar em um vórtice ascendente interior e é coletado em uma tubulação central, chamada *vortex finder*, e em seguida no *overflow* (McCABE et al., 1993). Na Figura 2.5 é ilustrado o movimento turbulento no interior de um hidrociclone.

No controle de sólidos de perfuração, os hidrociclones são capazes de separar partículas menores que a peneira vibratória, cujo diâmetro está compreendido entre 15 μm e 80 μm . Esses equipamentos removem os sólidos trazidos do poço; mas não separam toda a barita da fase fluida. Desse modo, os hidrociclones proporcionam um controle mais efetivo da concentração de material particulado, todavia a quantidade de fluido perdida no *underflow* é significativa (ROBINSON; HEILHECKER, 1975, McCABE et al., 1993, AADE, 1999).

Os equipamentos desareadores são projetados para removerem sólidos entre 50 e 80 μm . Essa bateria de hidrociclones é utilizada logo após as peneiras vibratórias, ou após os removedores de gás e, em geral, esses equipamentos possuem o diâmetro característico maior que 6 polegadas. Em seguida, o fluido de perfuração tratado é enviado para equipamentos menores, os dessiltadores. Esses hidrociclones possuem diâmetro de corpo cilíndrico entre 2 e 6 polegadas e são capazes de remover sólidos com tamanho entre 12 e 40 μm (AADE, 1999). É comum também a utilização de um equipamento chamado *mudcleaner*, que é a combinação de uma bateria de hidrociclones com uma peneira vibratória fina. Nos *mudcleaners*, o *underflow* do hidrociclone é peneirado, diminuindo a perda de fluido (ROBINSON; HEILHECKER, 1975, AADE, 1999).

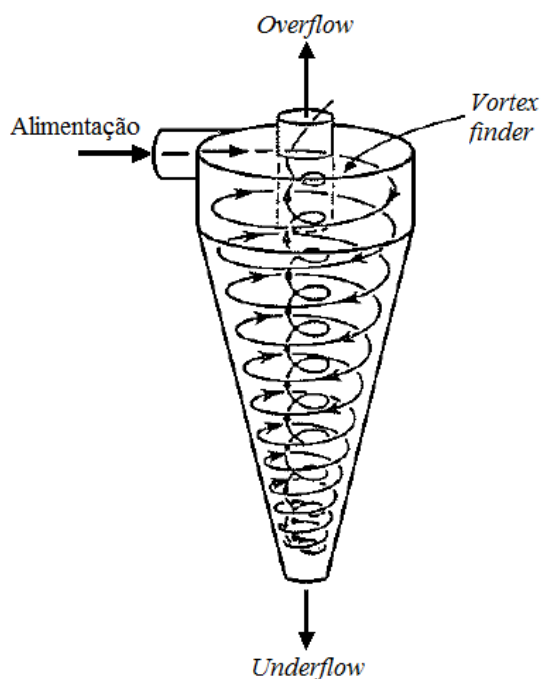


Figura 2.5 – Ilustração do escoamento dentro de um hidrociclone. Adaptado de MCCABE et al. (1993)

2.3.4 Centrífugas decantadoras

As centrífugas decantadoras são utilizadas para coletar os sólidos de menor tamanho, com diâmetro de partícula entre 2 e 10 μm . Desse modo, elas são capazes de eliminar partículas pequenas, acumuladas no fluido de perfuração, que podem causar sérios problemas no bombeamento. Esses equipamentos são constituídos por uma câmara cilíndrica ou cônica e um transportador helicoidal que giram na horizontal em alta velocidade exercendo uma alta força centrífuga no fluido. Desse modo, o material sólido é removido se houver tempo suficiente para que ele migre do fluido para a parede da câmara cilíndrica. O líquido clarificado é coletado de um lado da centrífuga enquanto o transportador helicoidal carrega o sólido para o outro extremo (BOBO; HOCH, 1954, McCABE et al., 1993, AADE,1999). Na Figura 2.6 é ilustrada a operação de uma centrífuga decantadora.

A presença da centrífuga decantadora na remoção dos sólidos mantém a viscosidade em um valor mínimo operando de maneira prática, efetiva e econômica. A operação de centrifugação também reduz os tratamentos químicos necessários no fluido durante a perfuração (BOBO; HOCH, 1954).

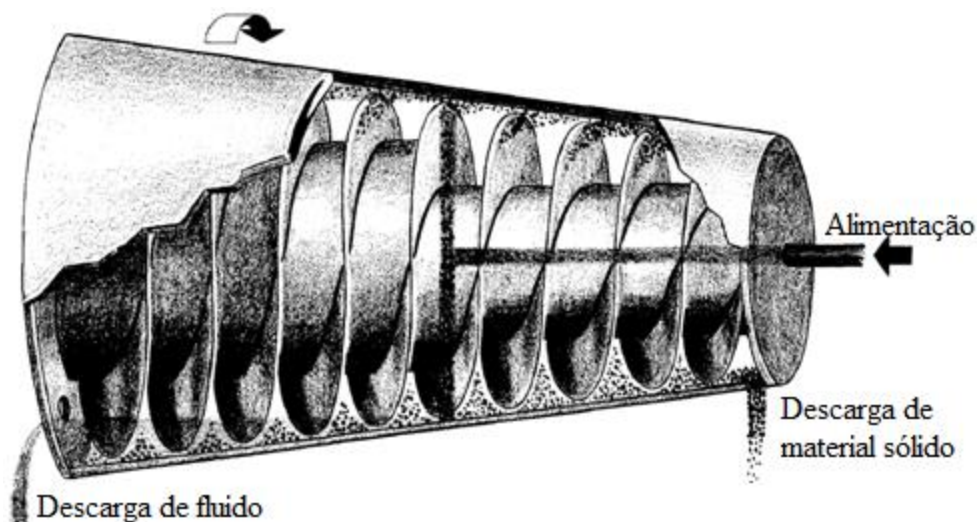


Figura 2.6 – Centrífuga decantadora. Adaptado de BOBO; HOCH (1954)

2.4 PENEIRAS VIBRATÓRIAS

Peneiras vibratórias são dispositivos utilizados na separação entre sólidos e líquidos ou sólidos e sólidos. Na maioria dos equipamentos, um fluido contendo material particulado é descarregado sobre uma tela retangular vibratória, que realiza a separação dos materiais. O líquido escoar pelos poros da tela ao longo da peneira, enquanto os sólidos mais grosseiros continuam sobre a tela, sendo retidos e coletados no final do equipamento. O fluido passante (também chamado de *underflow*) contém um material sólido com dimensões, em geral, inferiores a abertura de tela da peneira, que pode ser separado em outras etapas do processo (LAL; HOBEROCK, 1988, ASME, 2005, ZHU et al., 2012). Na Figura 2.4 é apresentada uma peneira vibratória industrial equipada com cesta vibratória dividida em quatro telas desenvolvida pela BRANDT. Na Figura 2.7 são apresentadas as partes principais de uma peneira vibratória.

Geralmente, as peneiras vibratórias industriais são compostas por um tanque de distribuição localizado à montante da tela. Esse tanque é alimentado com a suspensão a ser separada, sendo que um vertedouro distribui esse material de maneira uniforme sobre a peneira. A tela é montada sobre uma cesta que vibra, auxiliando o escoamento do fluido. A cesta vibratória se apoia sobre materiais que isolam a vibração do suporte, em geral, esses materiais são compostos por molas helicoidais e borrachas. Os isolantes absorvem o movimento vibratório e evitam que ele se propague sobre o apoio fixo do equipamento. O movimento vibratório da cesta é obtido com a utilização de motovibradores, a posição desses equipamentos em relação ao centro de gravidade da cesta controla o movimento e a direção da vibração. A

peneira ainda é composta por uma zona de descarga do fluido passante, localizada sob a tela e outra zona de descarga do material sólido retido, localizada a frente da tela (AADE, 1999).

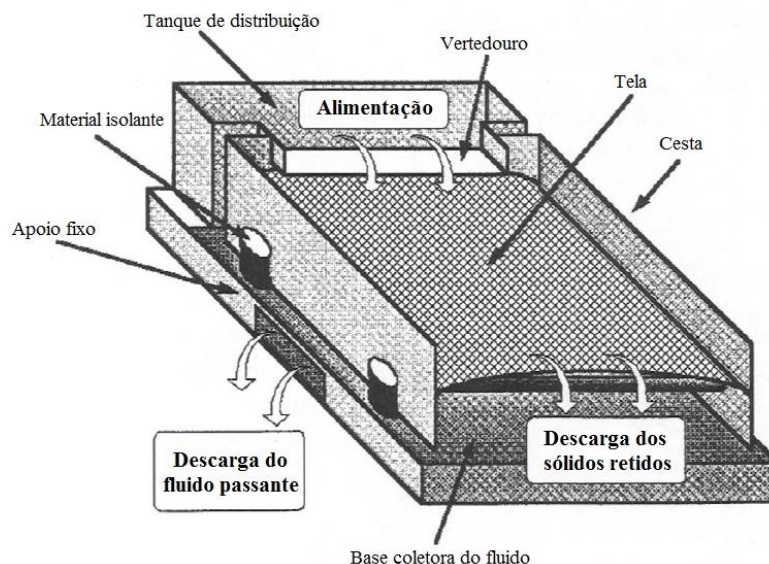


Figura 2.7 – Esquema de um equipamento de peneiramento vibratório. Adaptado de ASME (2005)

2.4.1 Funcionamento da peneira vibratória

A vibração obtida com os motovibradores introduz forças para cima e para baixo no material sobre a tela, o que favorece a separação. O movimento para cima da peneira empurra o fluido no sentido para baixo por inércia, fazendo com que ele escoe pela abertura da peneira e movendo o sólido para cima. Quando a peneira se move para baixo, os sólidos não acompanham a tela, sendo impulsionados para frente (AADE, 1999, ASME, 2005). Na Figura 2.8, é apresentada a facilidade no peneiramento ao se introduzir um movimento vibratório. Na Figura 2.8-A, é ilustrado o escoamento de um fluido genérico sobre uma tela estática, de modo que, se esse fluido possuir uma viscosidade alta, seu escoamento acontecerá bem lentamente. Na Figura 2.8-B, aplica-se um movimento acelerado na tela com sentido para cima, empurrando-a na direção do fluido, semelhantemente ao que acontece em um peneiramento vibratório e, por consequência, facilitando o escoamento do fluido.

A aceleração adquirida pelo material sobre a tela pode ser descrita a partir da Segunda Lei de Newton, conforme a Equação 2.1.

$$a_p = \frac{F_{Mot}}{m_p + m_F} \quad (2.1)$$

Na qual, a_p é a aceleração do material, F_{Mot} é a força aplicada pelo motovibrador, m_p é a massa da cesta vibratória da peneira e m_F é a massa do fluido de perfuração sobre a tela (DORRY, 2010). É comum a apresentação dessa aceleração em forma de um número adimensional de força-g (Γ), relacionando a magnitude da aceleração com a gravidade (g).

$$\Gamma = \frac{a_p}{g} \quad (2.2)$$

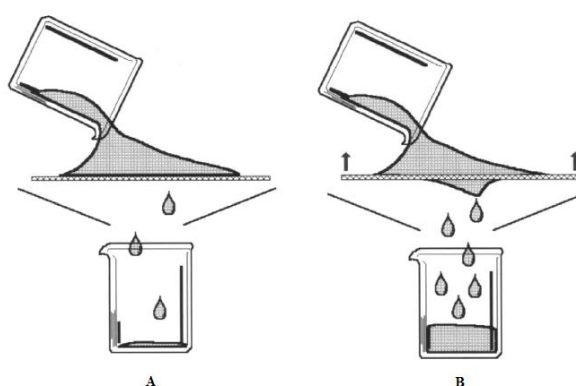


Figura 2.8 – Facilidade de peneiramento com a tela vibratória. Adaptado de ASME (2005)

Desse modo, é possível observar a influência da potência do motor e da massa de fluido sobre a peneira. Um aumento na potência do motovibrador proporciona um acréscimo na aceleração do material sobre a tela. Bem como, com o aumento da vazão, a massa de material sobre a peneira aumenta, originando uma diminuição da aceleração que o material sofre na sistema de separação (DORRY, 2010). MEINEL (2004) destaca ainda que quanto menor o sólido a ser separado, maior devem ser a frequência e intensidade da vibração para uma abertura fixa de tela. Portanto, o movimento vibratório é uma variável importante no projeto de uma peneira vibratória.

2.4.2 Tipos de movimentos vibratórios

Na indústria petroquímica, são utilizados quatro tipos de movimentos vibratórios empregados nas peneiras vibratórias, sendo fundamentais na separação e no comportamento do material sobre a tela. Cronologicamente, os primeiros equipamentos utilizados na separação do

fluido de perfuração trabalhavam com o movimento elíptico desbalanceado, em seguida surgiu o circular e os mais modernos são o movimento vibratório linear e elíptico balanceado. A operação desses movimentos é obtida dependendo da associação e posição dos motovibradores (AADE, 1999, MEINEL, 2004).

O movimento elíptico desbalanceado é obtido com a utilização de um único motovibrador localizado em um ponto acima do centro de massa da cesta vibratória. Essa configuração proporciona um movimento circular no centro da tela e movimentos elípticos no início e fim da peneira, como observado na Figura 2.9-A. Enquanto o movimento elíptico no início da tela facilita a locomoção do sólido, o mesmo não ocorre na zona de descarte do sólido, no final da tela. A inversão do eixo do movimento elíptico causa um acúmulo de sólidos na parte final da peneira, proporcionando um aumento do tempo de residência, diminuição da capacidade e impedindo a utilização de telas mais finas. Para amenizar esses problemas, é comum a operação da cesta inclinada na direção do descarte dos sólidos (inclinação descendente) (AADE, 1999; ZHAO et al., 2016).

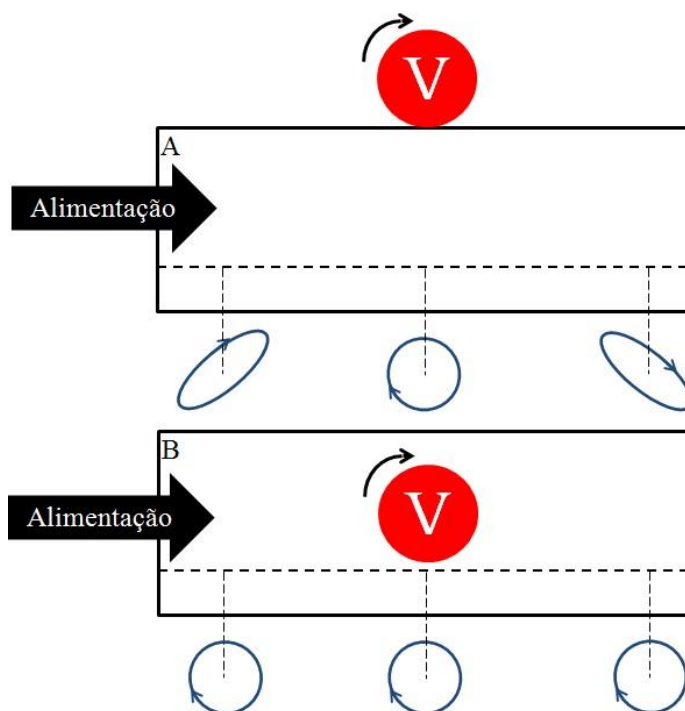


Figura 2.9 – Ilustração do movimento elíptico desbalanceado (A) e circular (B). Adaptado de AADE (1999)

O começo da utilização de peneiras vibratórias com movimento circular ocorreu em 1963. Esse movimento é obtido também com apenas um motovibrador localizado no centro de massa exato da cesta vibratória. Na Figura 2.9-B, é ilustrada a operação da peneira vibratória

com esse movimento. A vibração circular possibilitou uma melhoria no transporte do material sobre a tela comparada com a elíptica desbalanceada. O movimento circular transporta o material sem a necessidade de inclinação descendente, reduzindo a perda de fluido junto ao sólido que ocorria quando utilizava os equipamentos mais antigos inclinados (AADE, 1999).

O movimento linear surgiu em 1983 e possibilitou a utilização de telas mais finas na separação do fluido de perfuração, permitindo separar sólidos de menor tamanho. A vibração linear é obtida por um par de motovibradores, excentricamente balanceados e operando em sentidos de rotação opostos. Nas Figuras 2.10-A e 2.10-B, são ilustradas as disposições dos motovibradores em relação à cesta da peneira. Esse movimento supera as limitações dos movimentos circulares e elíptico desbalanceado, de modo que o transporte do material sólido sobre a tela acontece de maneira mais eficiente bem como aumenta a capacidade do líquido escoar por telas mais finas. Nos movimentos utilizados anteriormente somente uma parte da energia fornecida pelos motovibradores transportava o material no sentido da descarga, entretanto, o movimento linear provê um transporte sempre no sentido desejado. Outra vantagem da utilização dessa conformação está na capacidade do sistema operar com uma inclinação ascendente, ou seja, a descarga de sólido estar mais elevada que a alimentação. Esse ângulo cria um pequeno reservatório de líquido próximo à alimentação que favorece o escoamento do fluido pela tela da peneira (LAL; HOBEROCK, 1988, AADE, 1999).

O movimento elíptico balanceado é produzido a partir de um par de motovibradores, excentricamente balanceados e operando em sentidos de rotação opostos com um ângulo entre eles, assim como apresentado nas Figuras 2.10-C e 2.10-D. O aspecto do movimento elíptico é controlado pelo ângulo existente entre os dois motovibradores, de modo que, quando essa inclinação se anula, o movimento se torna linear (essa relação pode ser observada comparando as Figuras 2.10-B e 2.10-D). As principais vantagens desse sistema é o aumento da vida útil da peneira comparado com o movimento linear e a maior velocidade de transporte do material sobre a tela (LAL; HOBEROCK, 1988, AADE, 1999).

A taxa de transporte do material sobre a tela da peneira pode ser modelada em função do movimento vibratório conforme apresentada por KING (2001). A aceleração do material sobre a tela na vertical (G_y) pode ser descrita pela Equação 2.3.

$$G_y = \frac{g \cos(\alpha)}{\omega^2 A_y} \quad (2.3)$$

Na qual α é a inclinação da peneira, ω é a velocidade angular (geralmente em radianos por segundos) e A_y é a amplitude de vibração na direção vertical.

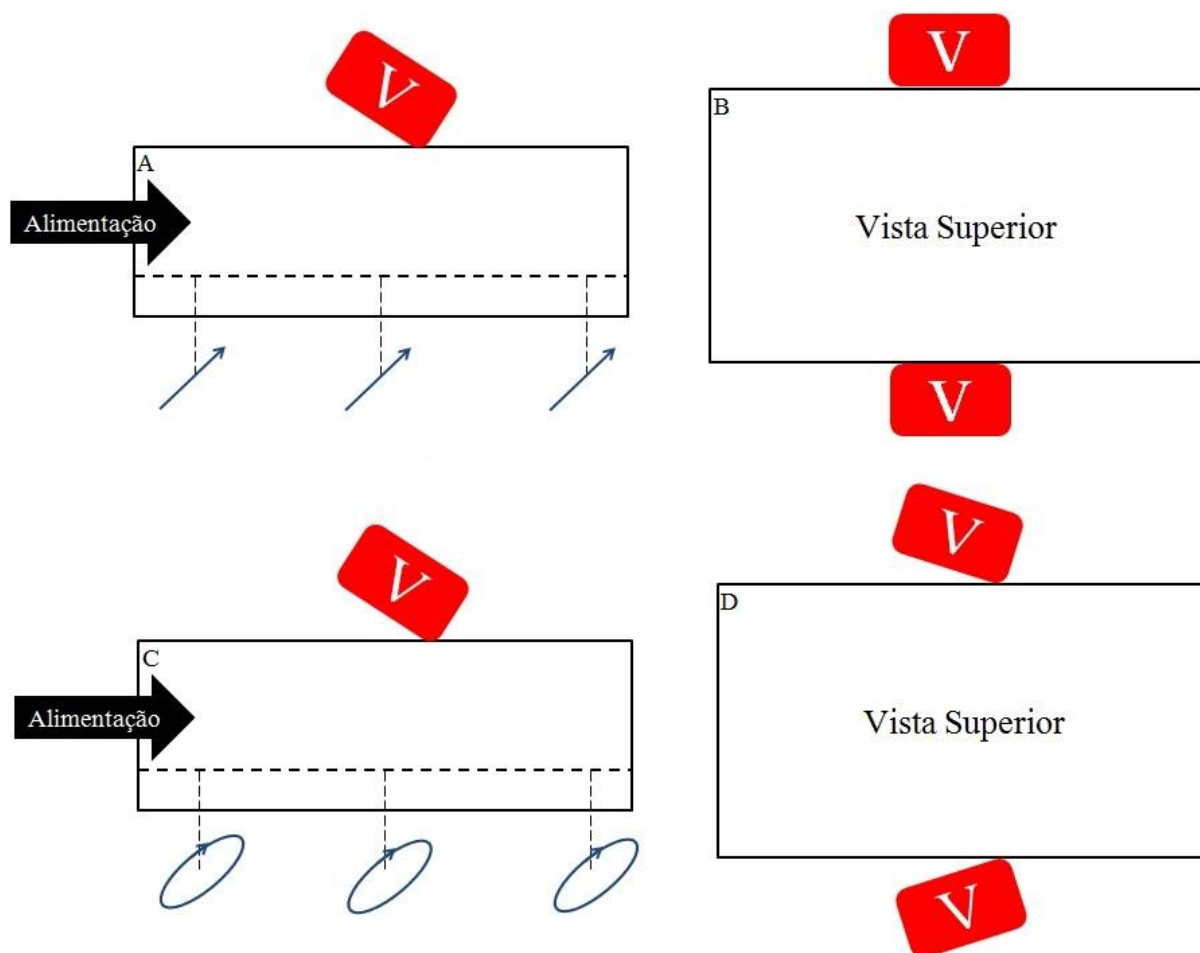


Figura 2.10 – Ilustração do movimento linear (A e B) e elíptico balanceado (C e D).
Adaptado de AADE (1999)

A velocidade de transporte na horizontal adimensionalizada (\dot{X}) é definida a partir do parâmetro anterior conforme as Equações 2.4 e 2.5.

$$\dot{X} = \frac{v}{A_x} \quad (2.4)$$

$$\dot{X} = a \exp(-b G_y) \quad (2.5)$$

Nas quais, v é a velocidade de transporte ao longo da tela, A_x é a amplitude de vibração na direção horizontal, b é um parâmetro que se relaciona com a inclinação da tela conforme a Equação 2.6 e a é um parâmetro específico do material, dependendo da distribuição granulométrica e da concentração da alimentação (KING, 2001).

$$b = 1,44 - 2,32 \alpha \quad (2.6)$$

Por fim, o tempo de residência do material na peneira vibratória (θ_R) pode ser obtido relacionando a velocidade de transporte com o comprimento da peneira (L), conforme apresentado na Equação 2.7 (KING, 2001).

$$\theta_R = \frac{v}{L} \quad (2.7)$$

2.4.3 Configurações e associação de peneiras

Em relação ao projeto de peneiras vibratórias, existem várias configurações utilizadas na indústria. A mais simples é a utilização da cesta na horizontal, semelhante à apresentada nas Figuras 2.11-C e 2.11-D. Todavia, também é comum a utilização de telas com inclinações, seja essa inclinação ascendente (Figuras 2.11-E e 2.11-F) ou descendente (Figuras 2.11-A e 2.11-B). Peneiras industriais mais modernas podem ter ainda uma tela individual projetada com diferentes ângulos, semelhante às Figuras 2.11-G e 2.11-H (AADE, 1999, ASME, 2005). Enquanto a inclinação descendente favorece o transporte do sólido sobre a tela e dificulta o líquido passante escoar pela peneira, a inclinação ascendente favorece o escoamento do líquido pela tela e dificulta o transporte do sólido.

O comportamento do material sólido sobre a tela altera conforme a configuração da cesta. Partículas transportadas em peneiras com cesta horizontal possuem movimentação linear, com um ângulo de 45° com a horizontal, enquanto nas peneiras inclinadas, as partículas descrevem trajetórias circulares num plano vertical, apresentando maior velocidade de transporte. Na Figura 2.12-A, é apresentado o movimento da partícula em uma tela horizontal e a Figura 2.12-B, em uma tela com inclinação descendente (GALERY et al., 2007 apud MILHOMEN, 2013).

A utilização de uma única tela (Figuras 2.11-A, 2.11-C, 2.11-E e 2.11-G) não é sempre favorável à separação do fluido. Desse modo, é comum a utilização de sistemas de peneiramento em série (ou em cascata). Nesses sistemas, o fluido alimenta uma peneira e o material passante é encaminhado para uma segunda peneira, havendo separação de sólidos mais grosseiros na primeira tela e de sólidos mais finos na segunda (AADE, 1999). As principais vantagens da associação de peneiras em séries são:

- maior processamento de sólidos no sistema;
- redução da carga de sólidos na tela mais fina;
- capacidade de separação de sólidos mais finos;
- aumento na vida útil da tela;
- diminuição dos custos de perfuração.

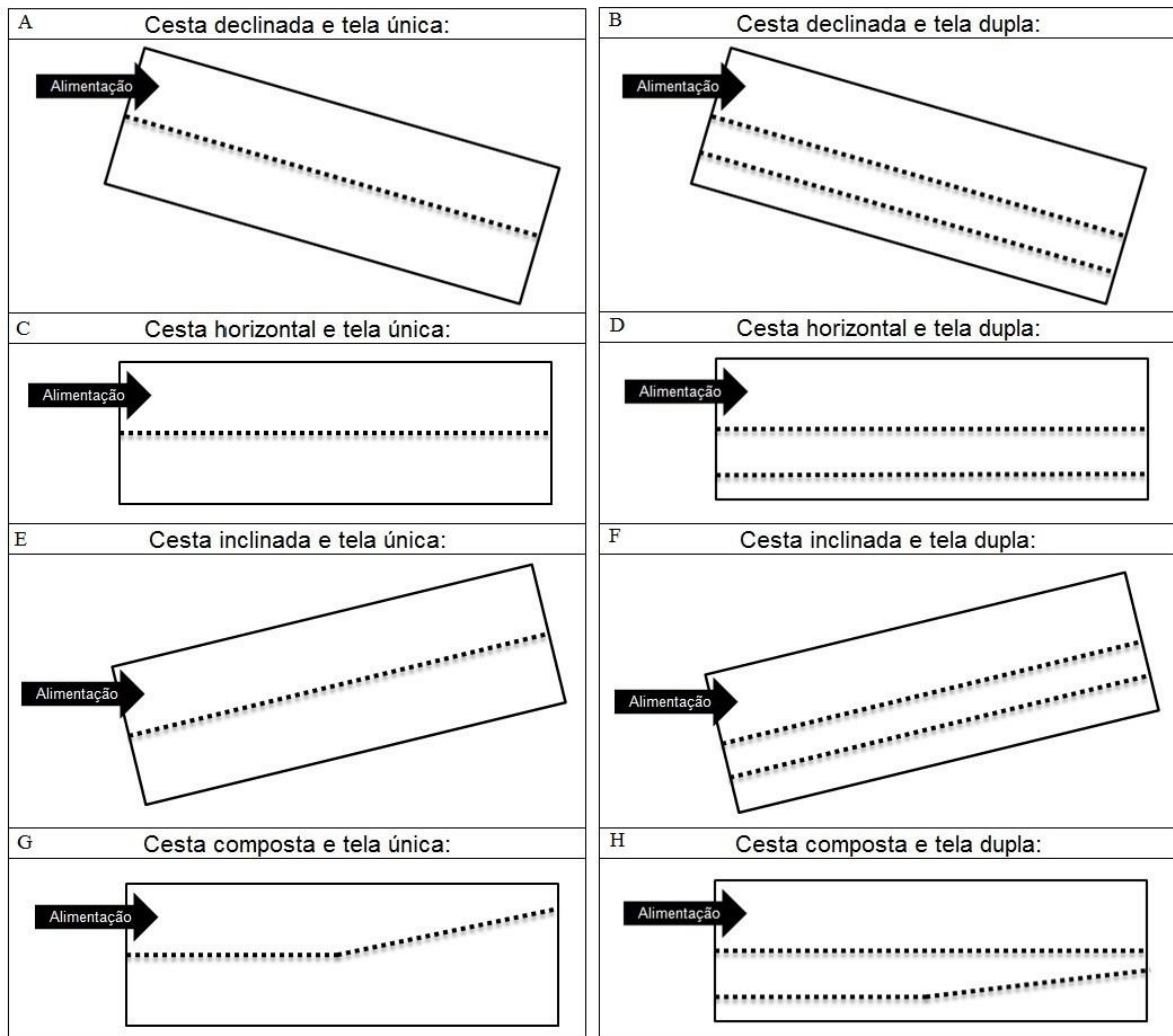


Figura 2.11 – Configurações de telas simples e em série. Adaptado de ASME (2005)

A associação dos equipamentos em série pode acontecer de três maneiras: unidades de separação individuais dispostas em série, uma única unidade de separação com telas dispostas em séries com diferentes movimentos vibratórios e, por fim, uma única unidade de separação com telas dispostas em séries com um único sistema de vibração (AADE, 1999). O segundo e terceiro tipo de associação podem ser ilustrados pelas Figuras 2.10-B, 2.10-D, 2.11-F e 2.11-H. A utilização de equipamentos individuais é o método mais simples de associação, entretanto

esses equipamentos tendem a ocupar um espaço considerável na planta. Já os sistemas integrados reduzem os custos de instalação e o espaço requerido, todavia, esse projeto limita a visibilidade das telas inferiores. Na Figura 2.13-A, é ilustrado um equipamento industrial com telas integradas dispostas em série utilizando dois tipos de movimentos vibratórios. Na Figura 2.13-B é apresentada uma peneira industrial com telas em série utilizando o mesmo sistema vibratório.

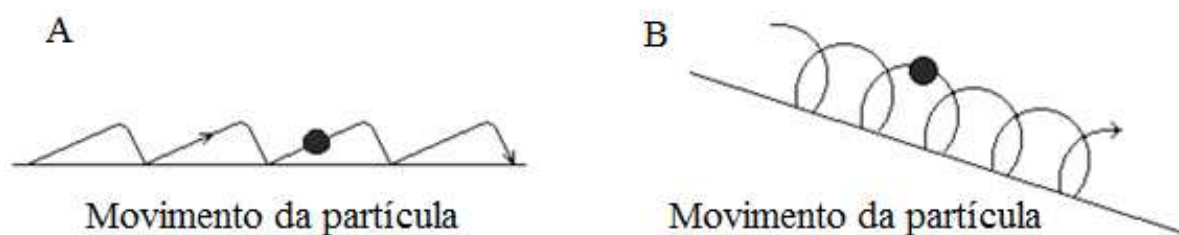


Figura 2.12 – Movimento da partícula sobre telas horizontais e com inclinação negativa. Adaptado de MILHOMEN (2013)

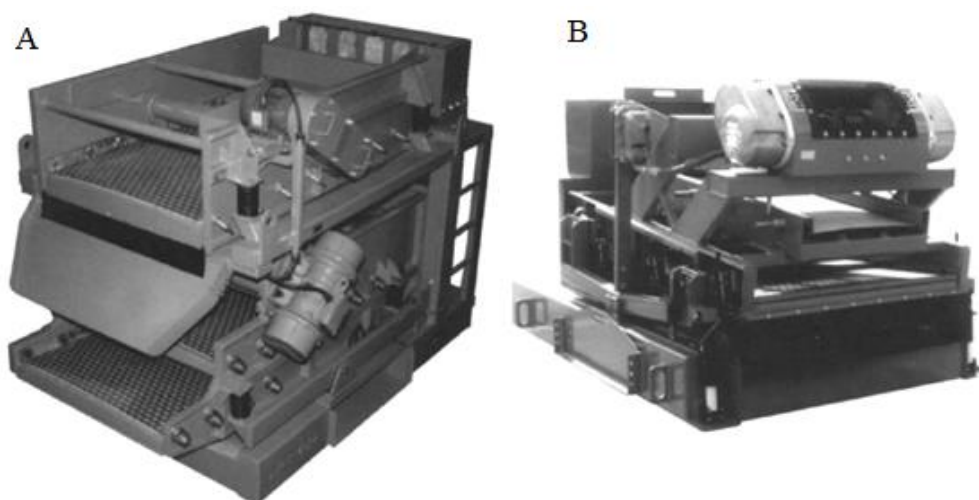


Figura 2.13 – Associação de telas em um único equipamento. Adaptado de AADE (1999)

2.4.4 Tipos de telas

A separação do peneiramento vibratório está amplamente relacionada com o tamanho e o formato da abertura da tela. No tratamento do fluido de perfuração, a tela utilizada deve possuir uma remoção econômica dos sólidos, grande capacidade de vazão de líquido, resistência ao entupimento, vida útil elevada e fácil caracterização (CUTT, 1991, AADE, 1999).

Na indústria de exploração de petróleo e gás são utilizados diferentes tipos de telas (Figura 2.14). Dentre elas, pode-se citar telas com malhas planas quadradas, com malhas planas retangulares; com malhas planas retangulares modificadas e telas com malhas multicamadas. As malhas quadradas são projetadas de modo que o espaçamento entre os fios são os mesmos em ambas as direções (Figuras 2.14-A e 2.15), enquanto as malhas retangulares são construídas havendo um espaçamento maior entre os fios de uma direção em relação à outra. Ambos os projetos proporcionam uma facilidade maior no escoamento do fluido pela abertura da tela. As malhas retangulares modificadas consistem da utilização de fios com diâmetros maiores em uma direção e um grupo de fios com diâmetros menores na outra direção. As aberturas longas e estreitas dessa tela proporcionam uma baixa resistência ao escoamento e a remoção de sólidos esféricos mais robustos (AADE, 1999, ROBINSON; STOCKS, 2012).

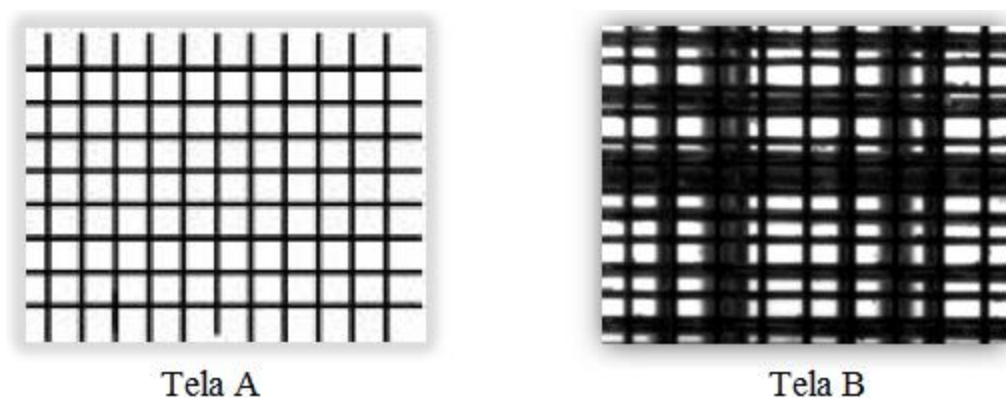


Figura 2.14 – Malhas plana e quadrada (A) e multicamadas (B). Adaptado de ROBINSON; STOCKS (2012)

Em geral, a tela impede a passagem de sólidos maiores que a abertura da peneira e permite a passagem do fluido e de sólidos menores que a abertura. Para caracterização da malha, os fabricantes utilizam a contagem *mesh*, que é determinada pelo número de aberturas ao longo de uma polegada em uma direção linear da tela (CUTT, 1991, AADE, 1999). Se a malha é quadrada, a representação da contagem *mesh* utiliza apenas um número. A malha da Figura 2.15 é de 8 *mesh*, portanto ela possui oito aberturas em uma polegada na direção horizontal e oito aberturas em uma polegada na direção vertical. Entretanto se a malha é retangular, é necessária a utilização de dois números. Por exemplo, uma tela com 80 x 50 *mesh* possui oitenta aberturas por polegada em uma direção e cinquenta em outra (AADE, 1999, ROBINSON; STOCKS, 2012).

Embora muito utilizada, a contagem *mesh* não reflete a abertura real da tela, visto que o tamanho da abertura de tela (D) é função da contagem *mesh* (n_{mesh}) e também do diâmetro do fio (d_w), conforme apresentado na Equação 2.8 para ambas as dimensões em polegadas. Ou seja, telas com a mesma contagem *mesh* podem ter aberturas de dimensões diferentes e se a tela é formada por múltiplas camadas, torna-se ainda mais difícil contabilizar essa dimensão (CUTT, 1991).

$$D = \frac{1}{n_{mesh}} - d_w \quad (2.8)$$

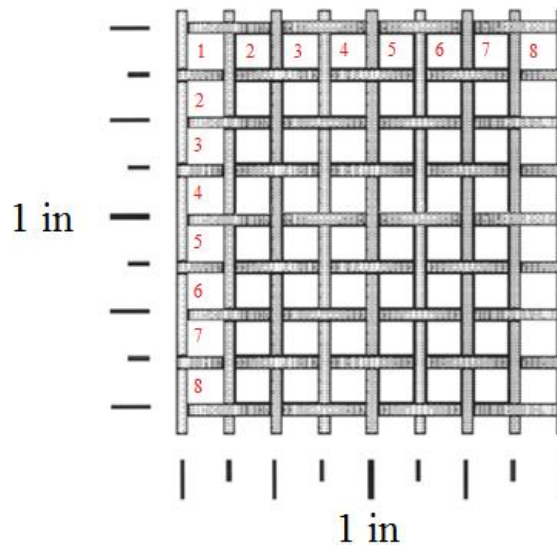


Figura 2.15 – Caracterização de uma tela quadrada de 8 mesh. Adaptado de AADE (1999)

Com a finalidade de prevenir entupimentos e aumentar a capacidade de peneiras para o controle de sólidos de perfuração, também são utilizadas telas com multicamadas (Figura 2.14-B). Essas telas possuem uma distribuição de tamanhos de abertura e são dificilmente caracterizadas pela contagem *mesh*. Desse modo, o *American Petroleum Institute* (API) propõe outra denominação para telas, correlacionando a abertura máxima da tela ou o diâmetro máximo do passante (D_{100}) com a nova nomenclatura chamada de número de peneira API (ROBINSON; STOCKS, 2012). Na Tabela 2.1, é relacionada a denominação utilizada pela API com a faixa de diâmetros máximos do material sólido passante.

Tabela 2.1 – Nomenclatura de tela proposta pela API. Adaptado de ROBINSON; STOCKS (2012)

Número API	D ₁₀₀ (μm)	Número API	D ₁₀₀ (μm)	Número API	D ₁₀₀ (μm)
API 6	3075 – 3675	API 30	550 – 655	API 140	98 – 116,5
API 7	2580 – 3075	API 35	462,5 – 550	API 170	82,5 – 98
API 8	2180 – 2580	API 40	390 – 462,5	API 200	69 – 82,5
API 10	1850 – 2180	API 45	327,5 – 390	API 230	58 – 69
API 12	1550 – 1850	API 50	275 – 327,5	API 270	49 – 58
API 14	1290 – 1550	API 60	231 – 275	API 325	41,5 – 49
API 16	1090 – 1290	API 70	196 – 231	API 400	35 – 41,5
API 18	925 – 1090	API 80	165 – 196	API 450	28,5 – 35
API 20	780 – 925	API 100	137,5 – 165	API 500	22,5 – 28,5
API 25	655 – 780	API 120	116,5 – 137,5	API 635	18,5 – 22,5

2.4.5 Desempenho de operação da peneira vibratória

O desempenho da operação de peneiramento vibratório é avaliado a partir das características das correntes efluentes do equipamento. Desse modo, uma peneira operando eficientemente possui um baixo teor de fluido nos sólidos retidos e uma alta eficiência granulométrica de separação (GUERREIRO, 2015). Na Figura 2.16, é representado o processo de peneiramento e essa ilustração será utilizada no detalhamento das respostas de desempenho da peneira vibratória.

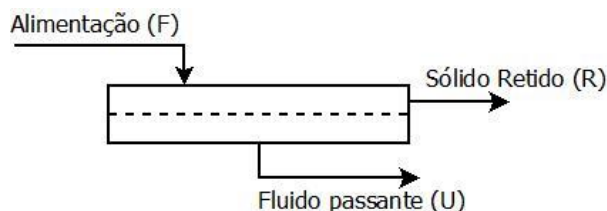


Figura 2.16 – Fluxograma de operação da peneira

2.4.5.1 Teor de umidade do sólido retido

A quantidade de líquido descartado juntamente com o material sólido indica perda de fluido de perfuração. Desse modo, um elevado teor de umidade residual indica a necessidade

de maior reposição de fluido, aumentando os custos de operação. Bem como, as restrições ambientais impedem o descarte de material sólidos contaminados com fluidos de perfuração (MARSHALL; BRANDT, 1978).

A umidade residual pode ser avaliada a partir de coletas do material sólido retido (R). O material coletado deve ser pesado úmido e, em seguida, secado. Após a secagem, o sólido é novamente pesado e a razão de fluido no sólido retido é obtida a partir da Equação 2.9 (DORRY, 2010).

$$x'_R = \frac{m_m - m_d}{m_m} \quad (2.9)$$

Na qual, x'_R é a razão de líquido no sólido retido, m_m é a massa do material úmido e m_d , a massa do material seco. O teor de umidade da corrente de sólidos retidos é a representação em porcentagem da razão de fluido x'_R .

$$M = x'_R \cdot 100\% \quad (2.10)$$

A secagem do material é realizada em uma estufa. DORRY (2010) realiza essa secagem a 180 °C até a massa do sólido permanecer constante. Entretanto, GUERREIRO (2015) utilizou, em seu estudo, a temperatura de secagem de 105 °C por 24 horas, tendo obtido resultados satisfatórios.

2.4.5.2 Eficiência granulométrica de separação

A eficiência granulométrica de separação representa o grau de proximidade entre as separações real e ideal realizadas por uma tela de um determinado tamanho específico. A partir de balanços de massa, é possível apresentar uma expressão relacionando essa eficiência com a natureza das correntes de entrada e saída da peneira (LARSON, 2007, GUERREIRO, 2015).

A partir da análise da Figura 2.16, propõe-se o balanço material global descrito na Equação 2.11.

$$F = R + U \quad (2.11)$$

Na qual, F é a vazão mássica de alimentação, R é a vazão mássica de sólido retido e U a vazão mássica de fluido passante.

Assumindo que x_F, x_R e x_U representam as frações mássicas de sólidos na corrente de alimentação, na corrente de sólidos retidos e na corrente de fluido passante respectivamente, pode-se descrever o balanço material para o material sólido com base na Equação 2.12 (LARSON, 2007).

$$F x_F = R x_R + U x_U \quad (2.12)$$

De modo a continuar o cálculo da eficiência granulométrica de separação, faz-se pertinente dividir toda equação pela quantidade de material sólido na alimentação ($F x_F$).

$$\frac{F x_F}{F x_F} = \frac{R x_R}{F x_F} + \frac{U x_U}{F x_F} \quad (2.13)$$

$$1 = \frac{R x_R}{F x_F} + \frac{U x_U}{F x_F} \quad (2.14)$$

O primeiro termo do lado direito da Equação 2.14 representa a razão entre a quantidade de material sólido retido e a quantidade de material sólido alimentado (E_R). Bem como, o segundo termo representa a razão entre a quantidade de material sólido passante e a quantidade de material sólido alimentado (E_U).

$$E_U = \frac{U x_U}{F x_F} \quad (2.15)$$

$$E_R = \frac{R x_R}{F x_F} \quad (2.16)$$

Desse modo,

$$E_R + E_U = 1 \quad (2.17)$$

Buscando uma expressão para a eficiência de separação da peneira também se faz necessária a apresentação do balanço material do sólido para partículas em uma faixa de tamanho específico:

$$F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)} = R x_R \frac{dY_R}{d(d_p)} + U x_U \frac{dY_U}{d(d_p)} \quad (2.18)$$

Na qual, $\frac{dY_F}{d(d_p)}$ representa a distribuição de frequência das partículas na alimentação, ou seja, a fração mássica de cada faixa de tamanho do material particulado na alimentação, $\frac{dY_R}{d(d_p)}$ e $\frac{dY_U}{d(d_p)}$ representam a distribuição de frequência das partículas na corrente de sólidos retidos e de fluido passante respectivamente. Os dados de caracterização de um conjunto de partículas são essenciais no cálculo da eficiência e podem ser obtidos a partir de vários métodos: microscopia ótica, microscopia eletrônica, foto-sedimentação, contadores *Coulter*, peneiramento e difração de raio laser (GUERREIRO, 2015).

Realizando o mesmo procedimento de cálculo utilizado na Equação 2.13, divide-se a Equação 2.18 pelo primeiro termo, ou seja, a quantidade de material sólido de um determinado tamanho na alimentação.

$$\frac{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}}{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}} = \frac{R x_R \frac{dY_R}{d(d_p)}}{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}} + \frac{U x_U \frac{dY_U}{d(d_p)}}{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.19)$$

$$1 = \frac{R x_R \frac{dY_R}{d(d_p)}}{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}} + \frac{U x_U \frac{dY_U}{d(d_p)}}{F x_F \frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.20)$$

Substituindo os termos E_R e E_U :

$$1 = E_R \frac{\frac{dY_R}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} + E_U \frac{\frac{dY_U}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.21)$$

O primeiro termo da somatória da Equação 2.21 descreve a razão de partículas de um determinado tamanho que são retidas. Esse termo é conhecido como eficiência granulométrica de coleta de partículas de tamanho d_p ou grade de eficiência de separação do material sólido retido (G_R).

$$G_R(d_p) = E_R \frac{\frac{dY_R}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.22)$$

ROBINSON; STOCKS (2012) apontam que o potencial de separação real de uma peneira é amplamente dependente da distribuição das partículas alimentadas na tela, como evidenciado na Equação 2.22. Entretanto, os autores também afirmam que a força-g, as propriedades do fluido e do sólido e a abertura da tela influenciam na separação da peneira. A Figura 2.17 apresenta a grade de eficiência ideal e real (calculada pela Equação 2.22) para o peneiramento com uma tela de abertura 75 µm. A eficiência granulométrica de separação do peneiramento está relacionada ao quão próximo a grade de eficiência real (linha tracejada e Equação 2.22) se encontra da grade de eficiência ideal (linha cheia) (LARSON, 2007, GUERREIRO, 2015).

A partir do comportamento da grade de eficiência, definem-se dois conceitos: eficiência de separação do material passante (η_U) e retido (η_R). O primeiro conceito é representado pela razão entre a massa de sólidos menores que a abertura de tela na corrente passante e a massa de sólidos menores que a abertura de tela na alimentação. Do mesmo modo, a eficiência de separação do material retido é representada pela razão entre a massa de sólidos maiores que a abertura de tela na corrente retida e a massa de sólidos maiores que a abertura de tela na alimentação.

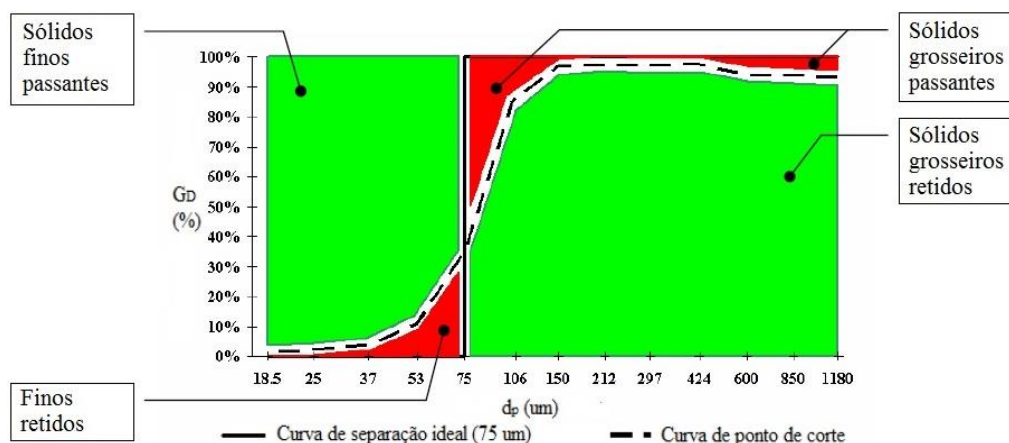


Figura 2.17 – Grade de eficiência real e ideal de uma peneira vibratória. Adaptado de LARSON (2007)

$$\eta_U = \frac{U x_U Y_U(d_p \rightarrow D)}{F x_F Y_F(d_p \rightarrow D)} \quad (2.23)$$

$$\eta_R = \frac{R x_R [1 - Y_R(d_p \rightarrow D)]}{F x_F [1 - Y_F(d_p \rightarrow D)]} \quad (2.24)$$

Na qual, Y_F representa a distribuição acumulativa do material na alimentação, ou seja, a fração de partículas que possuem um diâmetro menor que a abertura de tela D . Do mesmo modo, $1 - Y_F(d_p \rightarrow D)$ é a fração de partículas que possuem um diâmetro maior que D . Y_U caracteriza a distribuição acumulativa dos sólidos na corrente passante e Y_R , a distribuição acumulativa dos sólidos passantes.

Por fim, a eficiência granulométrica global de operação (η) correlaciona os termos apresentados nas Equações 2.23 e 2.24. Desse modo, a eficiência é obtida a partir da somatória da massa de sólidos menores que a abertura de tela no passante e a massa de sólidos maiores que a abertura de tela no retido relacionada com a massa total alimentada (GUERREIRO, 2015).

$$\eta = \frac{U x_U Y_U(d_p \rightarrow D) + R x_R [1 - Y_R(d_p \rightarrow D)]}{F x_F} \quad (2.25)$$

$$\eta = \frac{U x_U Y_U(d_p \rightarrow D)}{F x_F} + \frac{R x_R [1 - Y_R(d_p \rightarrow D)]}{F x_F} \quad (2.26)$$

Substituindo novamente os termos E_R e E_U , a Equação 2.27 descreve a eficiência granulométrica global de separação.

$$\eta = E_U Y_U(d_p \rightarrow D) + E_R [1 - Y_R(d_p \rightarrow D)] \quad (2.27)$$

2.4.6 Influência das variáveis de processo na operação do peneiramento vibratório

As principais variáveis que influenciam no desempenho da operação da peneira vibratória são: magnitude da aceleração do material sobre a tela (comumente representada pela força-g), inclinação da cesta da peneira, vazão de alimentação e características da tela de peneiramento e dos sólidos na alimentação (FOWLER; LIM, 1959, DORRY, 2010, RAJA et al., 2012; GUERREIRO et al., 2016).

2.4.6.1 Influência da força-g

DORRY (2010) avaliou experimentalmente o comportamento da peneira vibratória para operações em diversos valores de força-g. A capacidade de operação da peneira (ou vazão de fluido máxima que a peneira suporta) tende a aumentar de maneira não linear com o aumento da aceleração aplicada, todavia essa curva não possui o mesmo comportamento para diferentes tipos de peneiras e tipos de movimentos vibratórios. Para operações com movimento vibratório linear, a capacidade do sistema é maior que para o movimento elíptico. RAJA et al. (2012) também constataram o aumento da capacidade de operação com o acréscimo de força-g em peneiras atuando com diversas inclinações.

A velocidade de transporte do material sobre a peneira também foi avaliada por DORRY (2010). Para esse teste foi utilizada uma bola de tênis de mesa colocada sobre a tela e se mediu o tempo de residência da bola na peneira. Notou-se que a velocidade aumentava com um incremento da força-g em uma relação linear.

Para magnitudes maiores de força-g (entre 5 e 9), DORRY (2010) observou que essa variável não interferia significativamente na umidade do material sólido retido (M) bem como, nesse caso, a diferença de movimentos vibratórios também não exerciam diferenças significativas na secagem do sólido. Para magnitudes menores de força-g (entre 1 e 3,5), GUERREIRO (2015) observou experimentalmente que, para uma concentração pequena de sólidos na alimentação da peneira, o aumento da força-g possuía realmente pouca influência na umidade do material sólido retido. Entretanto, para concentrações um pouco maiores, a aceleração da tela possuía uma influência maior no comportamento da umidade dos sólidos retidos. Com o aumento da força-g, observou-se um aumento do teor de umidade. Bem como, quanto maior a concentração volumétrica de sólidos na alimentação, maior influência da aceleração na umidade. Esse estudo também relacionou uma diminuição da eficiência granulométrica de separação com o aumento da magnitude de aceleração do material sobre a tela.

2.4.6.2 Influência da inclinação da peneira

FOWLER; LIM (1959) avaliaram experimentalmente a influência da inclinação descendente da cesta da peneira na eficiência de peneiramento a seco de areia. Foram avaliadas as inclinações com ângulos de 6°, 11°, 15° e 20°. O estudo revelou que o aumento da inclinação

descendente proporciona um aumento na eficiência média do processo para operações com rotações menores dos motovibradores. Entretanto, com maiores vibrações, a eficiência decresce com o aumento da inclinação.

HOBEROCK (1980) estudou, a partir de modelagem e experimentos, a influência da inclinação descendente da cesta da peneira na distância máxima percorrida pelo fluido (somente pelo fluido) sobre a tela. Ou seja, foi relacionada a inclinação com a área molhada da tela. Nesse estudo foram avaliadas inclinações de 10° e 30° e se percebeu um aumento da distância máxima percorrida pelo fluido com o aumento da inclinação. Desse modo, peneiras com inclinações descendentes maiores necessitam de um comprimento maior de tela para a separação.

LAL; HOBEROCK (1988) desenvolveram um modelo capaz de descrever a velocidade de transporte do fluido de perfuração sobre a tela da peneira vibratória. A partir desse modelo, avaliaram como a inclinação da cesta da peneira afetava a velocidade de transporte. O estudo abrangeu inclinações ascendentes e descendentes de 0° a 8° . Observaram que, com o aumento da inclinação ascendente, a velocidade de transporte diminuía. Entretanto, com o aumento da inclinação descendente, a velocidade de transporte do material aumentava. LAL; HOBEROCK (1988) constataram também que essa velocidade se tornava instável para ângulos maiores bem como o movimento vibratório circular era mais afetado pela inclinação que os movimentos elíptico e linear.

RAJA et al. (2010) avaliaram a influência de uma inclinação ascendente, entre 3° e 5° , na vazão de fluido passante e no comprimento de tela utilizando um modelo de filtração. O modelo proposto nesse estudo relatou uma diminuição da vazão de fluido passante com o aumento da inclinação. Entretanto, a inclinação não apresentou efeito considerável para partículas pequenas. O estudo também revelou uma diminuição do comprimento de tela com o aumento da inclinação da peneira independentemente do tamanho do sólido.

A capacidade de peneiramento relacionada com a inclinação da peneira também foi avaliada experimentalmente por RAJA et al. (2012). Nesse estudo, foram avaliadas inclinações ascendentes e descendentes entre 0 e 3° . Com o aumento da inclinação descendente, observou-se uma diminuição da capacidade de operação. Todavia, com o aumento da inclinação ascendente, verificou-se um aumento da capacidade.

GUIFENG; XIN (2011) realizaram simulações avaliando as interações das partículas no peneiramento vibratório utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM). Nesse estudo, avaliou-se a influência da inclinação de tela descendente, entre 0° e 35° , na eficiência de separação ao longo do comprimento de uma peneira vibratória a seco. A inclinação da tela

influencia na projeção horizontal das aberturas da peneira. A partir dessas simulações, notou-se que a eficiência de separação aumenta ao longo do comprimento da tela bem como diminui com o aumento da inclinação. Esses dados condizem com os obtidos experimentalmente por FOWLER; LIM (1959) para vibrações mais elevadas.

2.4.6.3 Influência da abertura da tela

FOWLER; LIM (1959) também avaliaram experimentalmente a influência da abertura de tela no peneiramento a seco de areia. Foram estudadas telas quadradas de 30, 40, 50 e 60 *mesh* com aberturas correspondentes de 596, 447, 318 e 276 μm . O estudo revelou um aumento da eficiência de separação com o aumento da abertura de tela. Enquanto a tela de 30 *mesh* apresentou eficiências maiores que 80%, a de 60 *mesh* possuía uma eficiência menor que 50%.

Em contrapartida, ao analisar telas mais finas e utilizando uma mistura de sólidos e líquido, GUERREIRO (2015) observou que a eficiência de separação diminuiu com o aumento da abertura da tela. Nesse estudo, foram avaliadas telas de 125, 150 e 175 *mesh*, com aberturas de 130, 106 e 95 μm respectivamente. Enquanto a tela de 175 *mesh* apresentou eficiência maior que 85%, a de 125 apontou uma eficiência 10% menor. Do mesmo modo, GUERREIRO (2015) avaliou também a influência da abertura de tela no teor de umidade do sólido retido. As telas de 125 e 175 *mesh* proporcionaram sólidos com teores de umidade menores.

HOBEROCK (1980) avaliou a influência da abertura de tela na distância máxima percorrida pelo fluido sobre a peneira. O seu estudo avaliou telas de 60 e 100 *mesh* e foi constatado que, com a diminuição da abertura, aumentou a distância máxima percorrida pelo fluido. Desse modo, telas com aberturas menores necessitam de um comprimento maior para separarem o material.

2.4.6.4 Influência da concentração de sólidos na alimentação

LAL; HOBEROCK (1988) idealizaram um modelo capaz de prever a capacidade do peneiramento a partir da concentração de sólidos e a capacidade da peneira operando somente com fluido. De maneira que a capacidade de operação diminui com o aumento da concentração de sólidos alimentados.

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. Bem como, concentrações maiores de sólido na alimentação da peneira proporcionaram uma eficiência de separação menor. Dessa maneira, avaliou-se que uma carga maior de sólidos sobre a tela favoreceu a competição pelas aberturas da tela, diminuindo a eficiência do sistema. Essa relação também foi identificada experimentalmente por ROGERS; BRAME (1985).

O modelo identificado por GUERREIRO (2015) relaciona o teor de umidade e eficiência de separação com a força-g, concentração de sólidos e abertura da tela, representada pela contagem *mesh*. Essa representação é válida para uma força-g entre 1,00 e 3,50, concentração de sólidos entre 1,0 e 3,0% e abertura de tela entre 125 e 175 *mesh*.

2.4.6.5 Influência da vazão de alimentação

FOWLER; LIM (1959) investigaram a influência da vazão de alimentação na eficiência de separação do peneiramento vibratório a seco. A vazão foi controlada variando o diâmetro do orifício do funil de alimentação previamente calibrado e, desse modo, foram estudadas vazões de 5,5; 7,25; 10,0 e 15,45 lb/min. Com exceção dos estudos realizados em telas com maiores aberturas, o aumento da vazão de alimentação do sistema promoveu uma diminuição na eficiência de separação. Todavia, no peneiramento com tela com abertura maior (595 μm), o aumento da vazão não proporcionou uma alteração significativa na eficiência.

ROGERS; BRAME (1985) avaliaram experimentalmente o desempenho do peneiramento de suspensões de carvão, calcário e minério em telas com aberturas quadradas e aberturas entre 111 e 292 μm . A peneira vibratória possuía uma área de 0,35 m^2 e operavam a 3600 rpm. A concentração volumétrica das suspensões analisadas variava entre 18 e 28% e sua distribuição de tamanho era controlada por um moinho de bolas em escala piloto de modo que 50% do material passava por uma tela de 200 *mesh*. Dessa maneira, avaliou-se que a vazão de alimentação não influencia na razão entre material sólido retido e alimentado (E_R).

2.4.7 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., 2003). 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 a baixo do nível ótimo, a vida útil da peneira é reduzida, visto que a falta de lubrificação da tela acarreta em 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 for diferente do *set point*, o sistema atua em câmaras de ar localizadas sob a peneira que ajustam o ângulo de inclinação da cesta. 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.

DORRY (2010) avalia o funcionamento da peneira a partir da segunda lei de Newton, conforme apresentado na Equação 2.1. Se a vazão de alimentação do fluido sobre a peneira aumentar, a massa total do sistema também aumentará e por consequência, para uma força constante, a aceleração irá diminuir. A desaceleração do sistema pode alterar a capacidade de escoamento, a velocidade de transporte do material sólido sobre a tela e a secagem do sólido retido (DORRY, 2010).

Para reduzir o efeito da vazão de alimentação na aceleração 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, a peneira é retroalimentada com um sensor de vibração e um controlador PID. 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 vibradores. O sistema de controle possui três posições de *set point*, as quais o operador pode escolher dependendo das condições de operação. Caso ocorra algum defeito na leitura da vibração, 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.

DORRY; 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; 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 há falha no 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 *MultiGShaker* lançado em 2015 é capaz de operar com uma força entre 8 e 50 G's (Peneiras convencionais atuam até 9 G's). Nesse equipamento, o operador opta pela intensidade de vibração em um painel e a peneira busca esse *set point*. Outro equipamento, o *ProgiG*, recebe dados de medidores de vazão, viscosidade plástica, densidade e distribuição de tamanho de partículas *online* e se ajusta utilizando algoritmos internos buscando a melhor força-g, inclinação da tela, ângulo e frequência de vibração. O equipamento *Hyper-G* possui um controle que atua na inclinação da tela por um sistema de engrenagens buscando uma melhor separação e também permite que o operador escolha a intensidade de vibração. Essa peneira vibratória foi projetada buscando maior confiabilidade e flexibilidade.

2.5 IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAIS DE PROCESSOS

Um modelo matemático é uma representação de uma ou mais característica observada em um sistema real e pode ser classificado em fenomenológico ou empírico. 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 experimental de processos 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., 2003). SEBORG et al. (2003) comparam os termos simulação e identificação de sistemas. Com base na Figura 2.18, 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 a partir de perfis dinâmicos conhecidos.

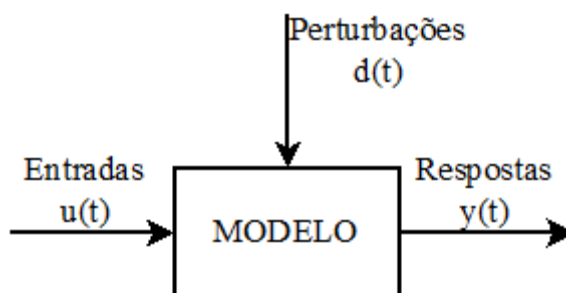


Figura 2.18 – Processo representado a partir de um modelo. Adaptado de SEBORG et al. (2003)

O processo de identificação de processos consiste de quatro principais etapas:

- obtenção de dados;
- formulação do modelo;
- estimativa de parâmetros e
- validação do modelo.

A obtenção de dados experimentais é a etapa mais importante na identificação de processos, 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).

2.5.1 Representação utilizando funções de transferências

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 oriundas de equações diferenciais lineares a partir da transformada de Laplace (AGUIRRE, 2007; SEBORG et al., 2003). A Equação 2.28 ilustra a representação típica de uma função de transferência.

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m \beta_i s^i}{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i} e^{-\theta s} \quad (2.28)$$

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

Nas Tabelas 2.2, 2.3, 2.3 e 2.5, 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), τ (constante de tempo), θ (tempo morto) e ζ (fator de amortecimento). Nessas equações, $Y(s)$ representa a resposta do modelo, $U(s)$, a entrada (ambas no domínio de Laplace) e M_{step} , a magnitude do degrau.

Tabela 2.2 – Função de transferência de um sistema integrador

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial (2.29)	$\frac{dy(t)}{dt} - Ku(t) = 0$
Função de transferência (2.30)	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s}$
Equação de resposta a um degrau (2.31)	$y(t) = K \cdot M_{step} \cdot t$

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 2.32:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0^-)}{M_{step}} \quad (2.32)$$

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

Tabela 2.3 – Função de transferência de primeira ordem

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial (2.33)	$\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$
Função de transferência (2.34)	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$
Equação de resposta a um degrau (2.35)	$y(t) = K \cdot M_{step} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$

A constante de tempo pode ser obtida de também de diferentes maneiras pelo método gráfico. A primeira é pela inclinação da curva da tangente inicial, assim como apresentado pela Equação 2.36:

$$\left. \frac{d}{dt} \left(\frac{y}{KM_{step}} \right) \right|_{t=0} = \frac{1}{\tau} \quad (2.36)$$

Tabela 2.4 – Função de transferência de primeira ordem com tempo morto (FOPDT)

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial (2.37)	Para $t < \theta$ $\frac{dy(t)}{dt} = 0$
	Para $t \geq \theta$ $\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$
Função de transferência (2.38)	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$
Equação de resposta a um degrau (2.39)	Para $t < \theta$ $y(t) = y_0$
	Para $t \geq \theta$ $y(t) = y_0 + K \cdot M_{step} \cdot \left(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}\right)$

Outro método é a observação do momento que a resposta alcança 63,2% da resposta final proporcionada pelo degrau, assim como apresentada na Equação 2.40 (AGUIRRE, 2007, SEBORG et al., 2003).

$$y(\tau) = 0,632 \cdot [y(\infty) - y(0^-)] + y(0^-) \quad (2.40)$$

Outro critério amplamente utilizado na estimativa de parâmetros de funções de transferência é minimizar a soma quadrática dos resíduos (SQR), assim como apresentado na Equação 2.41.

$$\min_{K, \tau, \theta, \zeta} SQR = \min_{K, \tau, \theta, \zeta} \sum (Y_i - y_i)^2 \quad (2.41)$$

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., 2003).

Tabela 2.5 – Função de transferência de segunda ordem

Tipo da representação	Expressão matemática
Equação diferencial (2.42)	$\tau^2 \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) - K \cdot u(t) = 0$
Função de transferência (2.43)	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1}$
Sobreamortecido (para $\zeta > 1$)	
$y(t) = K \cdot M_{step} \cdot \left\{ 1 - e^{-\zeta t/\tau} \left[\begin{array}{l} \cosh\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t\right) + \\ \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sinh\left(\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} t\right) \end{array} \right] \right\}$	
Criticamente amortecido (para $\zeta = 1$)	
Equação de resposta a um degrau (2.44)	$y(t) = K \cdot M_{step} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{-t/\tau} \right]$
Subamortecido (para $0 \leq \zeta < 1$)	
$y(t) = K \cdot M_{step} \left\{ 1 - e^{-\zeta t/\tau} \cdot \left[\begin{array}{l} \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\tau} \cdot t\right) + \\ \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \sen\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\tau} \cdot t\right) \end{array} \right] \right\}$	

A partir dos estudos apresentados anteriormente, notou-se a importância das peneiras vibratórias e sua finalidade no processamento e secagem do fluido de perfuração. A partir desse conhecimento e utilizando técnicas de identificação de sistemas, avaliou-se como a força-g, concentração de sólidos e vazão de alimentação interferem na resposta de um protótipo de peneira vibratória.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados na unidade experimental apresentada pela Figura 3.1. Essa bancada está montada na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e é formada por uma peneira vibratória em escala piloto, equipada com dois motovibradores, uma tela de separação e um sistema de controle de força-g. Esse sistema é semelhante ao utilizado por GUERREIRO (2015). Com finalidade de se obter uma melhor agitação e uma alimentação homogênea, equipou-se o tanque de 500 litros de alimentação com um sistema de agitação mecânica e uma tubulação de recirculação. Quatro válvulas controlam a recirculação e redirecionam parte da mistura para alimentar a peneira. Um medidor de vazão tipo coriolis modelo Contech TCM28K mede a vazão mássica de mistura alimentada na peneira. Uma calha instalada ao fim dessa tubulação permite uma melhor distribuição da alimentação sobre a tela. A Tabela 3.1 indica os equipamentos e instrumentos apresentados na Figura 3.1.

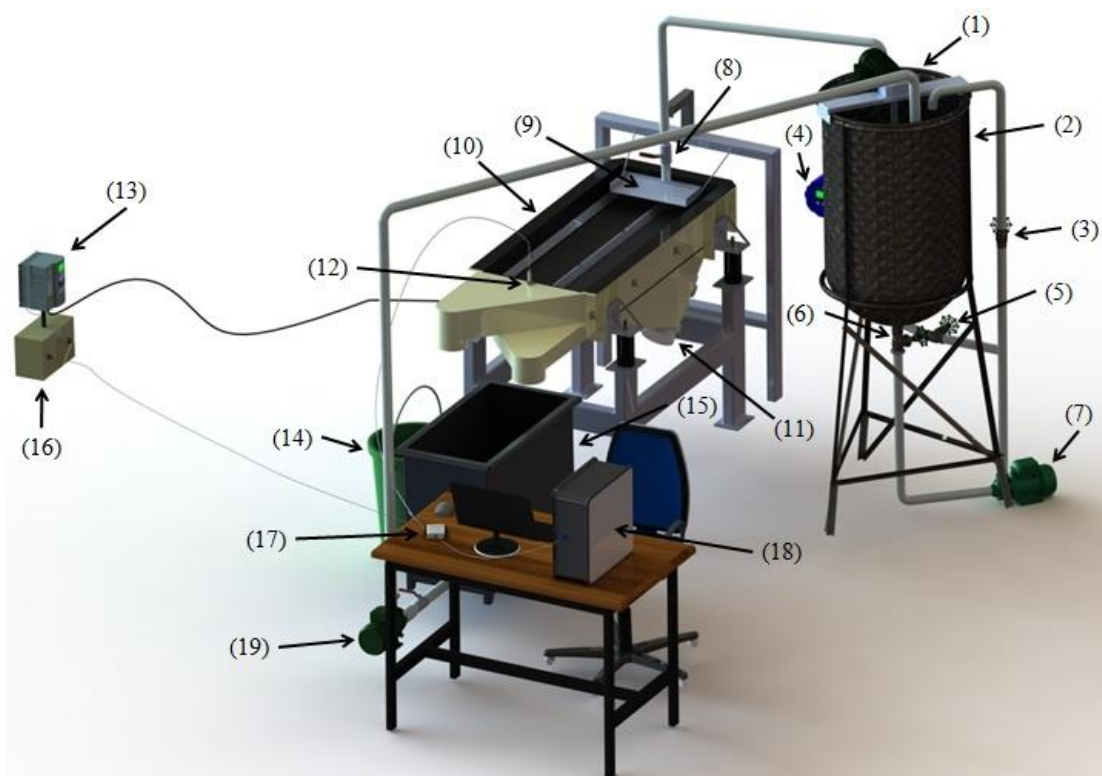


Figura 3.1 – Ilustração da unidade experimental utilizada

Tabela 3.1 – Equipamentos e instrumentos da unidade experimental

Número	Equipamento/Instrumento
(1)	Agitador
(2)	Tanque de mistura de alimentação
(3)	Válvula gaveta de recirculação
(4)	Medidor de vazão
(5)	Válvula gaveta de alimentação da peneira
(6)	Válvula gaveta de abertura do tanque de alimentação
(7)	Bomba de recirculação/alimentação
(8)	Válvula borboleta de alimentação da peneira
(9)	Calha de distribuição da alimentação sobre a tela da peneira
(10)	Peneira vibratória
(11)	Motovibradores
(12)	Sensor piezoelétrico
(13)	Inversor de frequência
(14)	Tanque de coleta do sólido retido
(15)	Tanque de coleta do fluido passante
(16)	Quadro de carga dos equipamentos e instrumentos da peneira
(17)	Placa de aquisição de dados
(18)	Computador de operação da peneira
(19)	Bomba de realimentação do tanque de mistura

Um tanque de 200 litros foi utilizado para coleta do fluido passante pela peneira. Esse tanque está ligado a uma tubulação que realimenta o tanque de alimentação, entretanto, durante os experimentos, a bomba centrífuga de realimentação permanece desligada para não haver diluição do material alimentado. Para a coleta do material sólido retido, utilizou-se um tanque com aproximadamente 80 litros. Esse tanque se encontra posicionado sobre uma balança, UDC CO 30/5 sendo possível acompanhar a quantidade de sólido retido.

3.1.1 Peneira vibratória

O protótipo de peneira vibratória utilizado foi fornecido pela empresa Vibrokraft, sediada em Valinhos/SP. As dimensões do equipamento (cotas em milímetros) são apresentadas

na Figura 3.2 juntamente com o desenho das vistas lateral e superior do mesmo. A empresa Tegape, sediada em Curitiba/PR, forneceu a tela de 175 mesh e 95 μm de abertura utilizada no peneiramento. Essa tela é construída de aço carbono com fios de 50 μm . A escolha dessa tela para realização dos experimentos é justificada devido aos melhores resultados de eficiência de separação e teor de umidade de sólidos encontrados por GUERREIRO (2015).

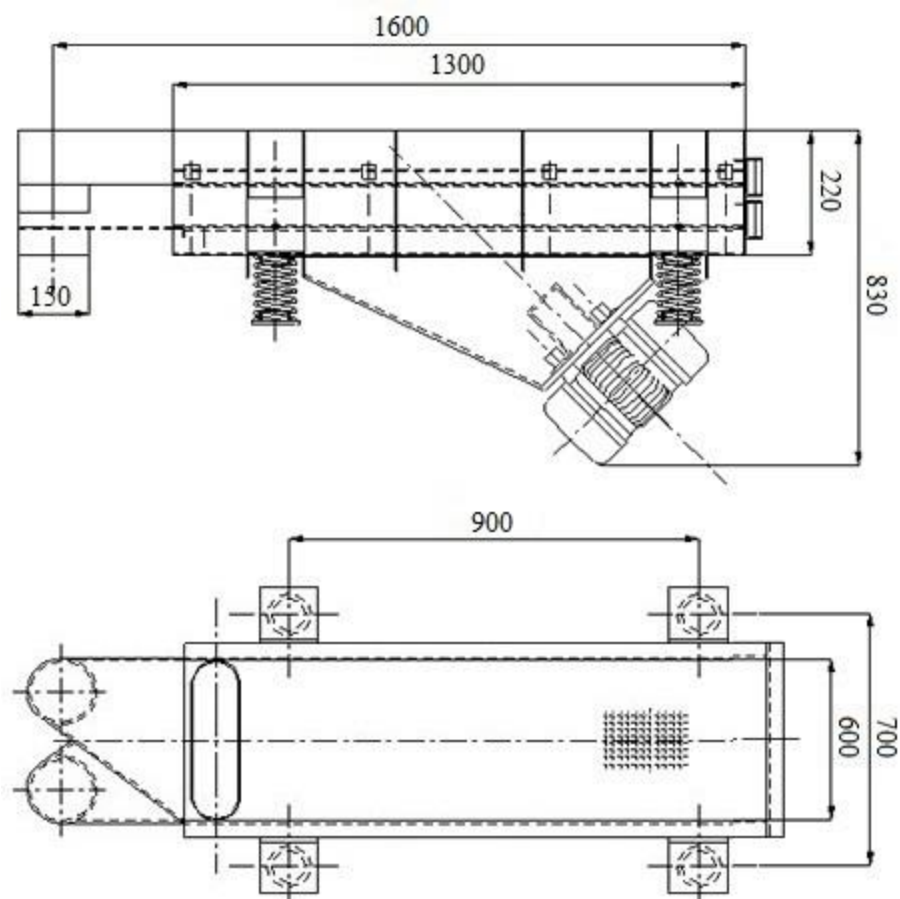


Figura 3.2 – Vistas lateral e superior da peneira vibratória. Adaptado de Vibrokraft

3.1.2 Motovibradores

Na base inferior da cesta da peneira, encontram-se parafusados dois motovibradores VR4-07 fornecidos pela Vibrokraft. Cada vibrador possui uma potência de 0,75 cv e uma rotação máxima de 1700 rpm. O equipamento possui uma massa de 28 kg e é capaz de gerar um torque de 21 $\text{cm}\cdot\text{kgf}$. As dimensões de cada motovibrador (cotas em milímetros) são apresentadas na Figura 3.3, juntamente com as vistas lateral e frontal do equipamento. A disposição espacial dos motovibradores garantem uma vibração linear à peneira.

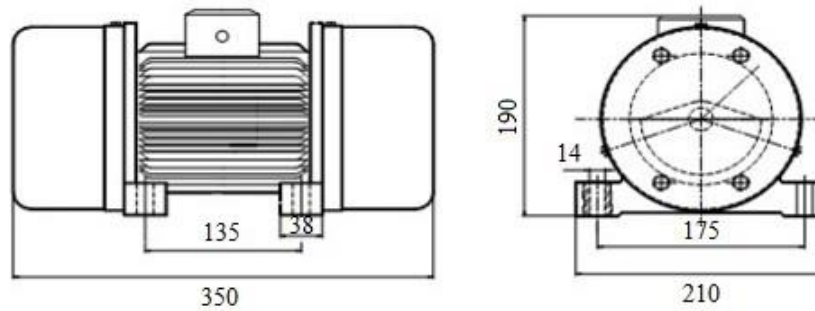


Figura 3.3 – Vistas lateral e frontal do motovibrador. Adaptado de Vibrokraft

3.1.3 Sistema de controle de força-g da peneira

A peneira vibratória está ligada a um medidor de vibração piezoelétrico da marca PCB Piezoelectronic modelo 646B00 (Figura 3.4), responsável por enviar um sinal na faixa de 4 a 20 mA a um computador através da placa de aquisição de dados National Instruments modelo USB 6008. Esse sinal é transmitido em uma faixa de tensão entre 1 e 5 V. Em seguida, são coletados 1000 valores por segundo de tensão e se calcula a média dessa medida, sendo convertida em força-g em seguida. A aceleração da vibração é obtida para um intervalo entre 0 e 10 g.



Figura 3.4 – Sensor piezoelétrico utilizado na medição da vibração. Adaptado de IMI (2016)

O sinal recebido da placa de aquisição de dados é encaminhado a um programa implementado no aplicativo LabView® da National Instruments, apresentado pela Figura 3.5. A coleta de dados, monitoramento da unidade experimental e controle de força-g são realizados com auxílio desse aplicativo. Nesse sistema, é possível selecionar um valor de rotação para funcionamento dos motovibradores ou selecionar um *set point* de força-g. Ao selecionar uma rotação para os motovibradores, o aplicativo gera um sinal condicionado entre uma tensão de 0

a 10 que é enviado pela placa de aquisição de dados ao inversor de frequência WEG CFW700, que ajusta a rotação dos motovibradores.

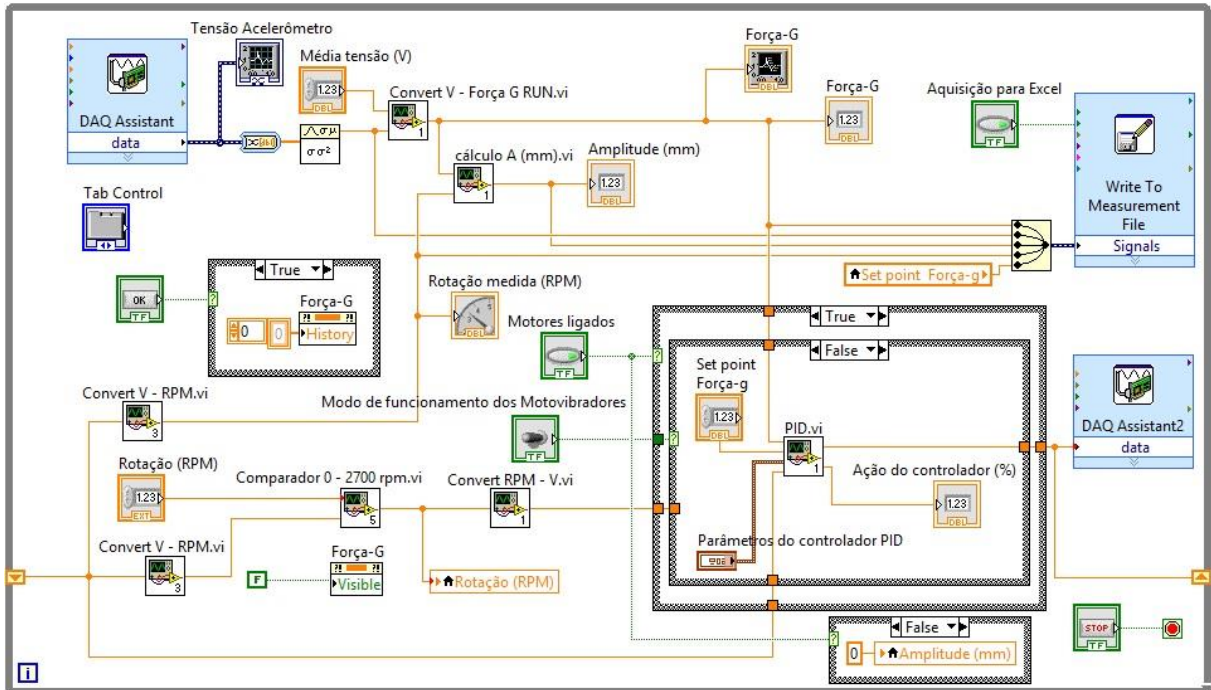


Figura 3.5 – Programação do aplicativo desenvolvido no Labview®

Na realização dos experimentos, é necessária uma força-g constante. Entretanto, como apresentado pela Equação 2.1, a aceleração da peneira tende a diminuir com a adição de material sobre a tela. Nesse caso, é necessário operar a unidade utilizando o controle de força-g e selecionando um *set point* para essa aceleração. O aplicativo compara a medição recebida do acelerômetro com o valor alvo e atua no inversor de modo a compensar esse erro. Dessa maneira, se a força-g medida for maior que a desejada, o inversor de frequência receberá um sinal para diminuir a vibração. Analogamente, se a força-g medida for menor que o *set point*, o inversor deverá aumentar a vibração da peneira. A programação do controlador utilizado é apresentada na Figura 3.6. Apesar do controlador desenvolvido poder atuar de maneira proporcional, integral e derivativa (PID), nesse projeto o parâmetro derivativo foi anulado devido às oscilações e ruídos dos valores de força-g medidos. O sistema de controle empregado é semelhante ao utilizado por DORRY (2010) e o diagrama de blocos simplificado do mesmo é apresentado na Figura 3.7.

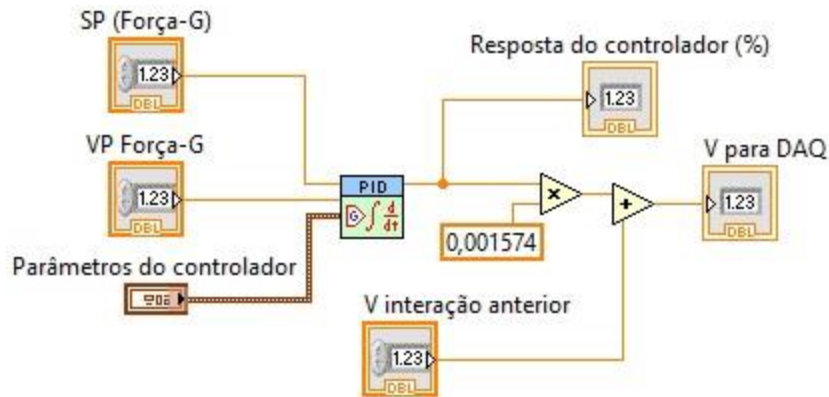


Figura 3.6 – Programação do controlador desenvolvido no Labview®

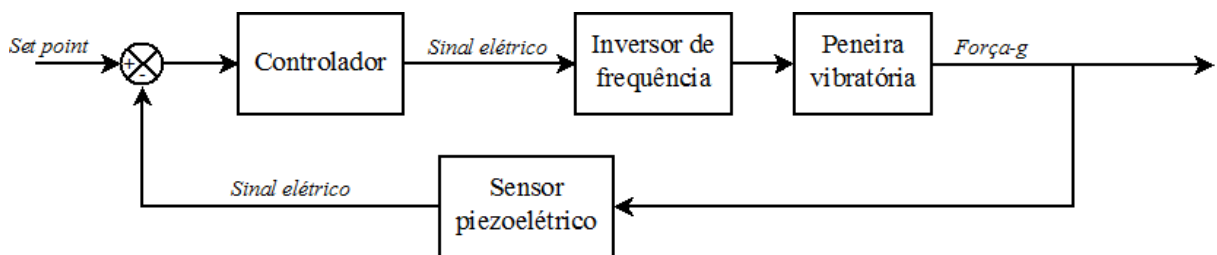


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do sistema de controle *feedback*

3.2 SINTONIA DO CONTROLADOR

O ganho proporcional e a constante de tempo integral foram estudados com finalidade de operar a peneira com uma resposta estável e robusta. Avaliou-se inicialmente, de maneira experimental, a utilização de um controlador proporcional (P) com $K_C = 20$ rpm, assim como realizado por GUERREIRO (2015). Bem como, um controlador proporcional e integral (PI) ($K_C = 20$ rpm e $\tau_I = 0,20$ min) na unidade experimental. 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. 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 sintonia do controlador 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., 2003). A Equação 3.2 apresenta 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).

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

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

Na qual, $e(t)$ é a diferença entre o *set point* e a variável de processo, SP_i e SP_{i+1} correspondem aos *set points* nos tempos i e $i+1$ e Γ_i e Γ_{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 a magnitude da perturbação na força-g, assim como apresentado pela Equação 3.3 (SEBORG et al., 2003). 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 (τ_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, escolheu-se os melhores valores dos parâmetros para se realizar os demais experimentos.

3.3 FLUIDO E SÓLIDO UTILIZADOS

Para a realização dos experimentos, foram utilizados um sólido e um fluido que buscavam simular o fluido real contendo sólidos de perfuração. Segundo PEREIRA (2013), os sólidos de perfuração são gerados com diâmetros relativamente grandes, entretanto esse material é fragmentado pela ação da broca, atingindo o tamanho de poucos micrômetros. PERENCO (2012) avalia também que a distribuição de tamanho dos sólidos de perfuração altera significativamente com a profundidade e localidade do poço. Desse modo, torna-se árdua a tarefa de encontrar um sólido que represente com fidelidade o sólido de perfuração.

O sólido utilizado foi areia padronizada fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Foram escolhidas três frações granulométricas de areia e uma mistura foi preparada com porções iguais de cada sólido, simulando a variedade de dimensões dos sólidos de perfuração. Na Tabela 3.2, é apresentada a granulometria da areia utilizada. Os valores obtidos se encontram dentro da faixa granulométrica de sólidos de perfuração reais avaliados por PEREIRA (2013).

Tabela 3.2 – Granulometria do sólido utilizado

Sólido	Fração mássica utilizada (%)	Tamanho máximo (mm)	Tamanho mínimo (mm)
Areia 100	33,3	0,30	0,15
Areia 50	33,3	0,60	0,30
Areia 30	33,3	1,20	0,60

Fonte: IPT, 2016.

O fluido utilizado foi uma mistura de água e goma xantana. Para a realização dos experimentos, utilizou-se uma concentração mássica de 0,1% de goma xantana. Segundo BICALHO (2015), o comportamento reológico desse fluido é não-Newtoniano e se assemelha a fluidos de perfuração reais utilizados pela Petrobras. A preparação da solução foi realizada com 24 horas de antecedência com finalidade de se obter completa hidratação da goma xantana. Com a finalidade de se inibir o desenvolvimento de microorganismos, adicionou-se uma pequena quantidade de formol à solução (BICALHO, 2015). O volume (em mililitros) da solução de formaldeído 31% adicionada ao fluido é numericamente igual à massa (em gramas) de goma xantana adicionada, assim como adotado por PEREIRA (2006) e BICALHO (2015).

3.4 OBTENÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A obtenção dos resultados experimentais foi realizada a partir da análise da resposta do sistema à perturbação degrau em uma variável independente. Somada a essa estratégia, aplicou-se um planejamento fatorial de experimentos 2^k nas demais variáveis independentes, sendo possível representar o comportamento multivariável do processo (BARROS NETO et al., 2001; FREGOLENTE, 2009). As variáveis independentes, a resposta avaliada e a estratégia experimental são apresentadas a seguir.

3.4.1 Variáveis independentes avaliadas

As variáveis estudadas nesse projeto são: aceleração da peneira, descrita em forma adimensional de força-g (codificada em x_1), concentração de sólidos na vazão de alimentação (x_2) e vazão de alimentação (x_3). Tais variáveis foram escolhidas por se mostrarem fortemente influentes no processo de peneiramento e possuem facilidade em se aplicar uma perturbação degrau com magnitude controlável na unidade experimental utilizada.

No planejamento fatorial 2^k , estuda-se cada variável independente em dois valores, um nível inferior e outro superior. Na Tabela 3.3, são apresentados os níveis de codificação de cada variável avaliada no experimento. Essas condições propostas foram consideradas adequadas à dimensão do protótipo, de maneira a permitir o estudo da dinâmica do processo de peneiramento bem como, por apresentarem proximidade com valores utilizados em operações reais de peneiramento. No caso da força-g, foram estudados valores capazes de impedir o encerramento da tela. No Apêndice A são apresentadas ilustrações do protótipo operando com valores de força-g abaixo dos apresentados na Tabela 3.3, não sendo possível operar a peneira nesses valores.

Tabela 3.3 – Níveis codificados utilizados no planejamento experimental

Variável independente	Nível inferior (-1)	Nível superior (+1)	Codificação
x_1	3,0	5,0	$x_1 = \Gamma - 4$ (3.4)
x_2	1,0%	5,0%	$x_2 = \frac{C_V - 3}{2}$ (3.5)
x_3	13	25	$x_3 = \frac{F - 19}{6}$ (3.6)

Com a finalidade de se estudar o comportamento dinâmico da peneira vibratória, foi avaliada a resposta do equipamento a perturbações do tipo degrau. Essas perturbações ocorreram de forma independente, de modo que, em cada experimento, somente uma variável era perturbada. A perturbação na força-g foi realizada alterando o *set point* dessa variável no controlador. Antes de alterar o valor do *set point*, selecionava-se um novo valor de rotação para os motovibradores mais próximo da força-g alvo. Essa rotação era escolhida a partir de um estudo realizado previamente que relacionava a rotação mínima (com a peneira operando vazia) com a força-g. Esse gráfico é apresentado no Apêndice A. A magnitude do degrau de força-g

aplicado na peneira foi a diferença entre os níveis apresentados na Tabela 3.3, ou seja, o degrau ocorria de 3,0 para 5,0.

O degrau de concentração se fez pela adição de sólido no tanque de alimentação. A magnitude desse degrau foi a metade da diferença entre os níveis avaliados. Desse modo, a perturbação na concentração foi realizada de 3,0 % para 5,0%. Por fim, a perturbação na vazão de alimentação se deu pela abertura das válvulas de alimentação da peneira. O controle da vazão foi realizado por ação manual a partir da leitura do medidor de vazão. Semelhantemente à força-g, a magnitude do degrau de vazão foi a diferença entre os níveis apresentados pela Tabela 3.3, de 13 kg/min para 25 kg/min.

3.4.2 Resposta avaliada

A resposta avaliada foi escolhida com base na sua relevância na operação industrial, considerando o fato de que tal variável dificilmente é obtida a partir de uma modelagem fenomenológica convencional. A resposta avaliada nesse projeto foi o teor de umidade de sólidos retidos. A escolha dessa variável também está fundamentada no difícil monitoramento contínuo em tempo real desse teor. Para a análise desenvolvida neste trabalho, foram coletadas amostras de sólidos retidos com intervalo de tempo de 1 minuto. A amostra era coletada com um béquer de 50 mililitros posicionado próximo ao bocal de saída dos sólidos. A amostragem do material era realizada por um intervalo de tempo que era função da vazão e concentração de sólidos. A variação desse intervalo buscava uma amostragem representativa de sólido retido bem como, evitava a retirada de uma quantidade grande de material do sistema. O tempo de amostragem é apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Tempo de amostragem dos sólidos retidos

Vazão de alimentação (kg/min)	Concentração de sólidos (%)	Tempo de amostragem (s)
13	1,0	60
25	1,0	30
13	3,0 ou 5,0	15
25	3,0 ou 5,0	15

Em seguida, o sólido úmido coletado era pesado e encaminhado a uma estufa aquecida a 105 °C. O sólido era mantido na estufa por 24 horas e a massa de sólido seco era pesada novamente. As Equações 2.10 e 2.11 foram utilizadas para se obter a teor de umidade da amostra. Desse modo, foi possível acompanhar o teor de umidade do sólido retido pela peneira vibratória a cada 1 minuto.

3.4.3 Estratégia experimental

Primeiramente, para a coleta de dados, preparou-se uma suspensão de água, goma xantana, formol e sólido (areia padronizada) nas condições iniciais de operação. A quantidade dos componentes em cada mistura é apresentada na Tabela 3.5. A quantidade de sólido é estimada pela Equação 3.7.

$$m_s = \rho_s V_w \frac{C_V(\%)}{100 - C_V(\%)} \quad (3.7)$$

Na qual, m_s é a massa de areia adicionada, ρ_s , a densidade do sólido e V_w , o volume de água na suspensão. A densidade do sólido, segundo GREEN; PERRY (2008), é 2,3 g/cm³. Essa mistura foi preparada no tanque de alimentação com a válvula de recirculação aberta e a bomba de recirculação e o agitador acionados. Desse modo, a suspensão ficava em constante agitação, proporcionando uma homogeneização completa da mistura.

Tabela 3.5 – Quantidades de cada componente da suspensão

C_V (%)	Água	Goma xantana	Formol	Areia
1,0	200 l	200 g	200 ml	4,65 kg
3,0	200 l	200 g	200 ml	14,23 kg
5,0	200 l	200 g	200 ml	24,21 kg

A tela da peneira era lubrificada inicialmente com água com finalidade de minimizar a interferência causada por atrito entre o material alimentado e a tela no início da operação, como proposto por GUERREIRO (2015). Em seguida, acionavam-se os motores vibratórios da peneira. O movimento vibratório era iniciado pelo sinal proveniente do inversor de frequência,

consistindo na escolha do *set point* de força-g e posteriormente acionando o botão “Motores ligados” presente no painel de acionamento da peneira (Figura 3.8).

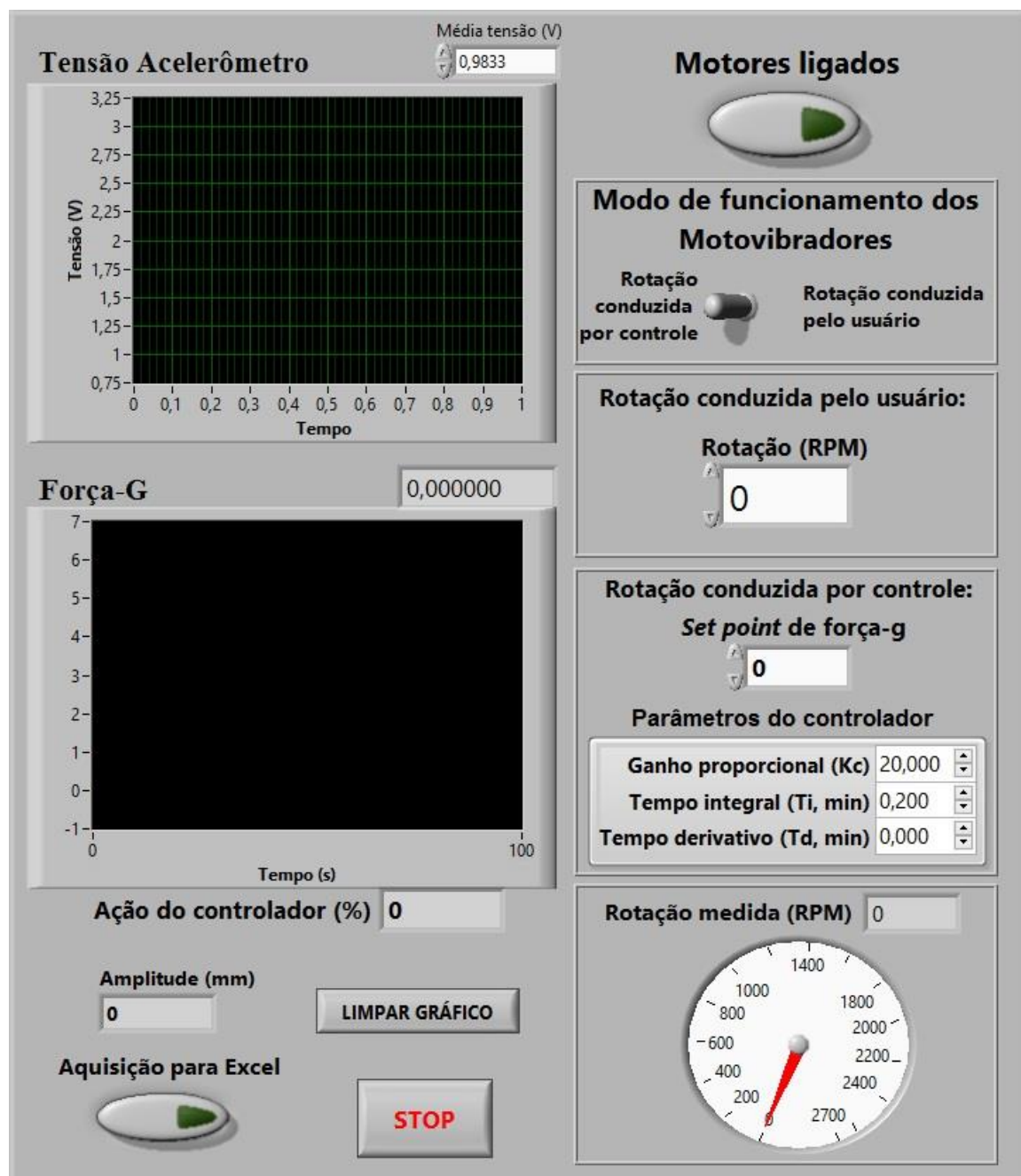


Figura 3.8 – Painel de operação da peneira vibratória

O experimento era iniciado com a abertura da válvula de alimentação. Em seguida, ajustava-se o valor da vazão de alimentação da peneira para o valor desejado por meio de uma válvula manual e se esperava até que o material sólido atravessasse a peneira e fosse coletado. Nesse instante, começava a aquisição de dados pelo aplicativo Labview®, pressionando o botão

“Aquisição para Excel”, e o gráfico de força-g apresentado no painel era limpo utilizando o botão “LIMPAR GRÁFICO”. Antes do início da coleta de material sólido, aguardava-se mais 100 segundos, nos quais era observado se a força-g e vazão se mantinham constantes. Após esse tempo inicial, o material sólido do *overflow* era coletado com intervalos de tempo de 60 segundos.

O equipamento era operado por mais 240 segundos nas condições iniciais, de modo que se atingia um comportamento próximo ao de estado estacionário. Após esse tempo, aplicava-se a perturbação de grau na variável estudada. Após a perturbação, a coleta de dados continuava com intervalos de tempo de 60 segundos. O experimento continuava por mais 300 segundos, sendo possível coletar dados da transição temporal do teor de umidade. Desse modo, o experimento se encerrava 640 segundos após o início da aquisição de dados. Na Figura 3.9, é apresentada a linha do tempo da realização do experimento, expondo o início da coleta de dados, perturbação e fim da corrida.

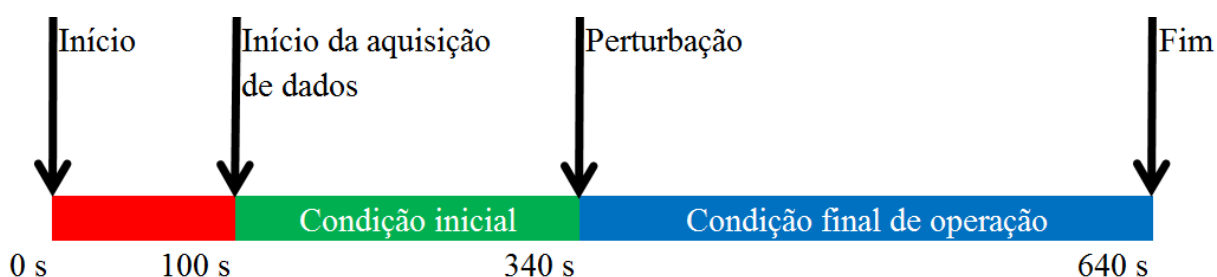


Figura 3.9 – Linha do tempo da realização de um experimento

Os experimentos foram agrupados em três conjuntos, cada grupo se referia a análise dinâmica de uma variável. Assim como proposto por FREGOLENTE (2009), em cada grupo de experimentos, perturbou-se uma variável independente em diferentes níveis das demais variáveis independentes. Tal abordagem contempla a característica multivariável do processo, de modo que todas as variáveis são avaliadas ao mesmo tempo (BARROS NETO, et al., 2001, FREGOLENTE, 2009). A Figura 3.10 apresenta a configuração das variáveis independentes de um grupo de experimentos realizados.

O primeiro grupo de experimentos realizados corresponde à análise dinâmica da força-g. Esse grupo equivale aos experimentos de 1 a 4. Dessa maneira, em cada experimento foi perturbada a variável independente força-g com a peneira vibratória operando com concentração de sólidos e vazão de alimentação constantes. A cada experimento realizado, o valor de concentração e/ou vazão se alteravam em relação à corrida anterior, assim como

apresentado pela Tabela 3.5. Do mesmo modo, os experimentos de 5 a 8 correspondem à análise dinâmica da concentração de sólidos alimentada, realizados com valores constantes de força-g e vazão de alimentação. Por fim, os experimentos de 9 a 12 equivalem à análise dinâmica da vazão de alimentação. Em cada corrida apresentada na Tabela 3.6, foram coletadas amostras dos sólidos retidos com finalidade de se avaliar o teor de umidade desse material. Os ensaios foram realizados em triplicatas visando avaliar a variabilidade das respostas obtidas, totalizando 36 experimentos e 324 amostras de sólidos coletadas.

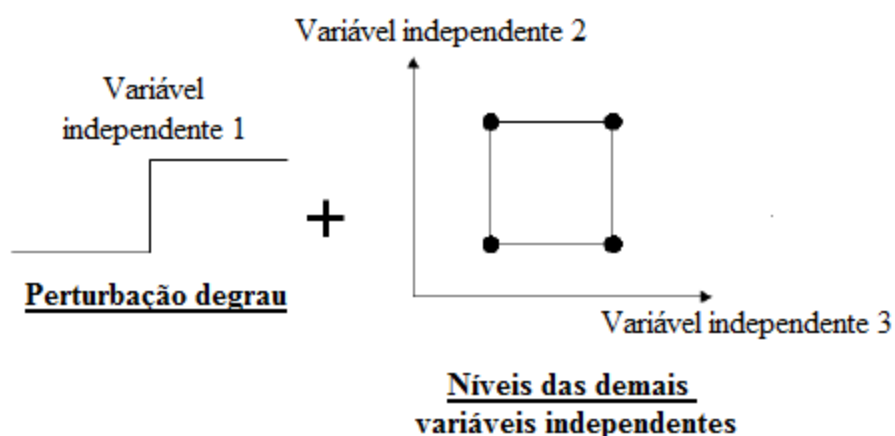


Figura 3.10 – Configuração de realização dos experimentos com abordagem multivariável.
Adaptado de Fregolente (2009)

Tabela 3.6 – Planejamento experimental

Número do experimento	x_1	x_2	x_3
1	Degrau	-1	-1
2	Degrau	-1	+1
3	Degrau	+1	-1
4	Degrau	+1	+1
5	-1	Degrau	-1
6	-1	Degrau	+1
7	+1	Degrau	-1
8	+1	Degrau	+1
9	-1	-1	Degrau
10	-1	+1	Degrau
11	+1	-1	Degrau
12	+1	+1	Degrau

3.5 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A partir dos resultados coletados foram identificados modelos que representassem o comportamento do estado estacionário e transiente correspondentes ao teor de umidade dos sólidos retidos pela peneira vibratória. Desse modo, pôde-se avaliar diferentes características da operação contínua do equipamento tendo em vista a variável de processo escolhida. Os procedimentos para obtenção desses modelos são descritos a seguir.

3.5.1 Identificação do processo no estado estacionário

Com a finalidade de se representar o teor de umidade dos sólidos retidos pela peneira vibratória operando em estado estacionário, foram selecionados os dados de umidade antes da perturbação e ao final da mesma para cada experimento. Para essa análise, foram adotados somente os experimentos com degrau na força-g e na vazão e, de cada corrida, foram coletados dois valores de umidade antes do degrau e dois ao final do experimento. Nessa análise, descartou-se os dados obtidos após a perturbação da concentração de sólidos, por estarem em uma condição intermediária. Dessa maneira, para cada valor de força-g, concentração e vazão, foram selecionados 12 valores de teor de umidade.

Com base nos resultados experimentais obtidos de teor de umidade, calculou-se a média e desvio padrão referentes a cada valor das variáveis independentes e em seguida, ajustaram-se os parâmetros da Equação 3.8 com auxílio do *software Statistica*, baseado em um planejamento fatorial 2^3 .

$$M = b_0^{SS} + b_1^{SS} x_1 + b_2^{SS} x_2 + b_3^{SS} x_3 + b_{12}^{SS} x_1 x_2 + b_{13}^{SS} x_1 x_3 + b_{23}^{SS} x_2 x_3 \quad (3.8)$$

Na qual, b_0^{SS} representa o parâmetro referente a média dos valores de umidade, b_1^{SS} , b_2^{SS} e b_3^{SS} se referem aos efeitos de cada variável independente no teor e b_{12}^{SS} , b_{13}^{SS} e b_{23}^{SS} , aos parâmetros correlacionados com a interação entre as variáveis avaliadas.

Utilizando o aplicativo *Statistica*, foi avaliada a superfície de resposta correspondente aos resultados obtidos pela Equação 3.8 e quais seriam as condições de operação, dentre as estudadas, que favoreciam o menor teor de umidade dos sólidos. Ou seja, quais valores das variáveis independentes que permitiam a obtenção de um sólido mais seco e, portanto, maior

recuperação do fluido de perfuração. Por fim, avaliou-se também quais eram as variáveis independentes que apresentavam maior efeito sobre o teor de umidade.

3.5.2 Identificação do processo após a perturbação

Para representação dos modelos dinâmicos identificados de teor de umidade foram escolhidas funções de transferência de primeira ordem com tempo morto, como apresentado na Tabela 2.4. A escolha dessa forma de representação está baseada na simplicidade das equações bem como, no fato de esses modelos serem utilizados frequentemente em estratégias de controle de processos na indústria. TRUMIC; MAGDALINOVIC (2011) também utilizaram modelos lineares para representar a vazão de material passante em peneiramento de sólidos.

A partir dos experimentos realizados, para cada corrida, identificou-se uma relação dinâmica entre o teor de umidade dos sólidos retidos e a variável perturbada, conforme apresentado pela Tabela 3.7. Dessa maneira, para cada corrida, ajustou-se os parâmetros da função de transferência (ganho, constante de tempo e tempo morto) e em seguida, foi calculada a média de cada parâmetro para a triplicata. Para o ajuste dos parâmetros apresentados, foi utilizada a equação de resposta ao degrau exibida pela Tabela 2.4, considerando como critério de ajuste a minimização da soma quadrática dos resíduos, assim como demonstrado pela Equação 2.41. O aplicativo utilizado para essa tarefa foi o *Excel*® e no Apêndice B é apresentado o detalhamento de como a mesma foi realizada. Essa ferramenta utiliza o algoritmo *Simplex* para resolução de problemas

A Equação 3.8, apresentada na Tabela 3.7, indica a relação dinâmica entre o teor de umidade dos sólidos retidos e a força-g. Com base na metodologia proposta por FREGOLENTE (2009), os parâmetros da Equação 3.8 são funções das demais variáveis independentes (x_2 e x_3). Da mesma maneira, a Equação 3.9 representa a relação entre umidade e concentração e seus parâmetros são funções de x_1 e x_3 . Por fim, a Equação 3.10 indica a relação dinâmica entre o teor de umidade e a vazão de alimentação bem como, os parâmetros dessa equação são dependentes dos valores de x_1 e x_2 .

Assim como no modelo para estado estacionário, os coeficientes apresentados na segunda coluna da Tabela 3.7 foram obtidos por meio da aplicação de planejamento fatorial do valor médio dos parâmetros obtidos em cada triplicata. Novamente, para essa análise, foi utilizado o aplicativo *Statistica*®. Dessa maneira, o primeiro grupo de experimentos foi

utilizado para o ajuste dos parâmetros do modelo dinâmico da força-g, como apresentado pela Equação 3.11.

$$\begin{pmatrix} K_1^M \\ \tau_1^M \\ \theta_1^M \end{pmatrix} = b_0^1 + b_2^1 x_2 + b_3^1 x_3 + b_{23}^1 x_2 x_3 \quad (3.11)$$

Na qual, b_0^1, b_2^1, b_3^1 e b_{23}^1 representam os vetores de coeficientes obtidos a partir do planejamento fatorial 2^k . De modo que, o primeiro vetor representa a média de cada parâmetro obtido, e os demais apresentam a influência de cada variável e da interação entre elas no valor dos parâmetros.

Tabela 3.7 – Representação dos modelos dinâmicos obtidos para o teor de umidade (M)

Variável manipulada	Representação em forma de função de transferência	Parâmetros
Força-g	$\frac{M(s)}{F(s)} = \frac{K_1^M e^{-\theta_1^M s}}{\tau_1^M s + 1} \quad (3.8)$	$K_1^M = K_1^M(x_2, x_3)$ $\tau_1^M = \tau_1^M(x_2, x_3)$ $\theta_1^M = \theta_1^M(x_2, x_3)$
Concentração de sólidos	$\frac{M(s)}{C_V(s)} = \frac{K_2^M e^{-\theta_2^M s}}{\tau_2^M s + 1} \quad (3.9)$	$K_2^M = K_2^M(x_1, x_3)$ $\tau_2^M = \tau_2^M(x_1, x_3)$ $\theta_2^M = \theta_2^M(x_1, x_3)$
Vazão de alimentação	$\frac{M(s)}{F(s)} = \frac{K_3^M e^{-\theta_3^M s}}{\tau_3^M s + 1} \quad (3.10)$	$K_3^M = K_3^M(x_1, x_2)$ $\tau_3^M = \tau_3^M(x_1, x_2)$ $\theta_3^M = \theta_3^M(x_1, x_2)$

Semelhantemente à equação anterior, as Equações 3.12 e 3.13 descrevem o comportamento dos parâmetros dos modelos dinâmicos de concentração de sólidos e vazão de alimentação, respectivamente.

$$\begin{pmatrix} K_2^M \\ \tau_2^M \\ \theta_2^M \end{pmatrix} = b_0^2 + b_1^2 x_1 + b_3^2 x_3 + b_{13}^2 x_1 x_3 \quad (3.12)$$

$$\begin{pmatrix} K_3^M \\ \tau_3^M \\ \theta_3^M \end{pmatrix} = b_0^3 + b_1^3 x_1 + b_2^3 x_2 + b_{12}^3 x_1 x_2 \quad (3.13)$$

Na qual, b_0^2, b_1^2, b_3^2 e b_{13}^2 indicam os vetores de coeficientes obtidos a partir do planejamento fatorial 2^k do segundo grupo de experimentos, representando a média, a influência de cada variável individualmente e a interação entre as variáveis. Do mesmo modo, b_0^3, b_1^3, b_2^3 e b_{12}^3 são obtidos do planejamento fatorial do último grupo de experimentos, referente à vazão de alimentação. Assim como realizado anteriormente, também foi feita a análise de sensibilidade dos modelos para avaliar quais variáveis independentes que exerciam maior efeito sobre cada parâmetro, utilizando o aplicativo *Statistica*®.

3.5.3 Análise do intervalo transiente

A partir dos modelos dinâmicos identificados e de seus respectivos parâmetros, calculou-se o intervalo transiente (t_t) de cada perturbação. Ou seja, o tempo necessário para que o sistema atinja um novo estado estacionário. O cálculo desse valor considerou a Equação 2.43, com a qual se estimou em qual tempo a resposta $y(t)$ atingiria um estado de equilíbrio pela Equação 3.14.

$$\frac{dy(t)}{dt} = 0 \quad (3.14)$$

A partir dessa análise, avaliou-se que um novo estado estacionário só seria atingido em um tempo infinito e que o seu valor seria $K \cdot M_{step}$. Desse modo, foi proposto analisar o tempo que a resposta do sistema em estudo levaria para alcançar 95% do valor correspondente a um novo estado estacionário, como proposto pela Equação 3.15 (SEBORG et al., 2003).

$$y(t) = 0,95 \cdot K \cdot M_{step} \quad (3.15)$$

Substituindo a Equação 3.15 na Equação 2.43, pôde-se avaliar o intervalo transiente da resposta do sistema a uma perturbação.

$$0,95 \cdot K \cdot M_{step} = K \cdot M_{step} \cdot \left(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}\right) \quad (3.16)$$

$$t_t = \theta + 2,996 \cdot \tau \quad (3.17)$$

A partir da Equação 3.17 e dos valores médios dos parâmetros dos modelos dinâmicos obtidos pela análise experimental, foi estimado o intervalo transiente de cada experimento proposto pela Tabela 3.6. A partir desses dados, um último planejamento fatorial foi proposto com finalidade de avaliar em quais condições a perturbação proporciona um maior tempo de acomodação do sistema. Semelhantemente à avaliação anterior, para cada grupo de experimentos, criou-se um planejamento 2^2 . De modo que o intervalo transiente referente à perturbação em uma variável independente pôde ser descrito em função das demais variáveis independentes. As Equações 3.18, 3.19 e 3.20 descrevem essas relações.

$$t_{t1} = b_0^{t1} + b_2^{t1}x_2 + b_3^{t1}x_3 + b_{23}^{t1}x_2x_3 \quad (3.18)$$

$$t_{t2} = b_0^{t2} + b_1^{t2}x_1 + b_3^{t2}x_3 + b_{13}^{t2}x_1x_3 \quad (3.19)$$

$$t_{t3} = b_0^{t3} + b_1^{t3}x_1 + b_2^{t3}x_2 + b_{13}^{t3}x_1x_2 \quad (3.20)$$

Nas quais, t_{t1} , t_{t2} e t_{t3} representam o intervalo transiente referente à resposta da perturbação nas variáveis x_1 , x_2 e x_3 respectivamente. Bem como, os demais parâmetros representam a influência das demais variáveis independentes no valor do intervalo transiente. Semelhantemente aos planejamentos anteriores, utilizando o aplicativo *Statistica*, avaliou-se em quais condições a perturbação se prolongava por um tempo maior e quais variáveis apresentavam uma maior influência nesse tempo.

A partir das estratégias e materiais apresentados nesse capítulo, os experimentos foram realizados e com base em seus resultados foram avaliadas a importância e influência das variáveis de processo escolhidas na secagem realizada pela peneira vibratória. Com base também na metodologia apresentada, avaliou-se quais condições de operação da peneira proporciona um sólido mais seco.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Na Figura 4.1, é apresentada a comparação entre as respostas do protótipo da peneira vibratória em operação, equipada com controladores da variável força-g empregando modos de controle P e PI. Com base na Figura 4.1, pode-se observar que o tempo de subida da resposta do controlador PI é 10 % da resposta do controlador P. Entretanto, também é possível destacar a grande oscilação no início da resposta do controlador PI que não ocorre para o outro controlador. Os valores da IAE e do sobressinal no primeiro degrau apresentado pela resposta do controlador para ambos os modos de controle são apresentados na Tabela 4.1. A integral do erro para o modo PI foi aproximadamente a metade a do P. Todavia, assim como observado pela Figura 4.1, houve *overshoot* somente na resposta do controlador PI. Segundo SEBORG et al. (2003) e OGATA (2012) esse é um fenômeno comum e indesejável de controladores PI.

Tabela 4.1 – Comparação entre os controladores P e PI

Controlador	K_C (rpm)	τ_I (min)	IAE (min)	Sobressinal (%)
P	20	-	29,55	0,0
PI	20	0,20	15,62	92,5

Com a principal finalidade de diminuir o sobressinal apresentado na resposta do controlador PI, foi realizada uma análise de sensibilidade dos valores dos parâmetros desse modo de controle. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2 e também na Figura 4.2, nas quais são apresentadas comparações entre os valores da integral do erro absoluto e do sobressinal para os valores estudados de K_C e τ_I . Primeiramente, é necessário ressaltar que o sistema não se mostrou estável para as condições de $K_C = 20$ rpm e $\tau_I = 0,15$ min porque a resposta do controlador proporcionou um aumento de rotação da peneira além do suportado pelo motor. Com base nos resultados obtidos, é possível destacar que o aumento do valor do parâmetro K_C do controlador não interferiu significativamente no valor da IAE para os valores estudados. Entretanto, um aumento em K_C , aumentou o sobressinal.

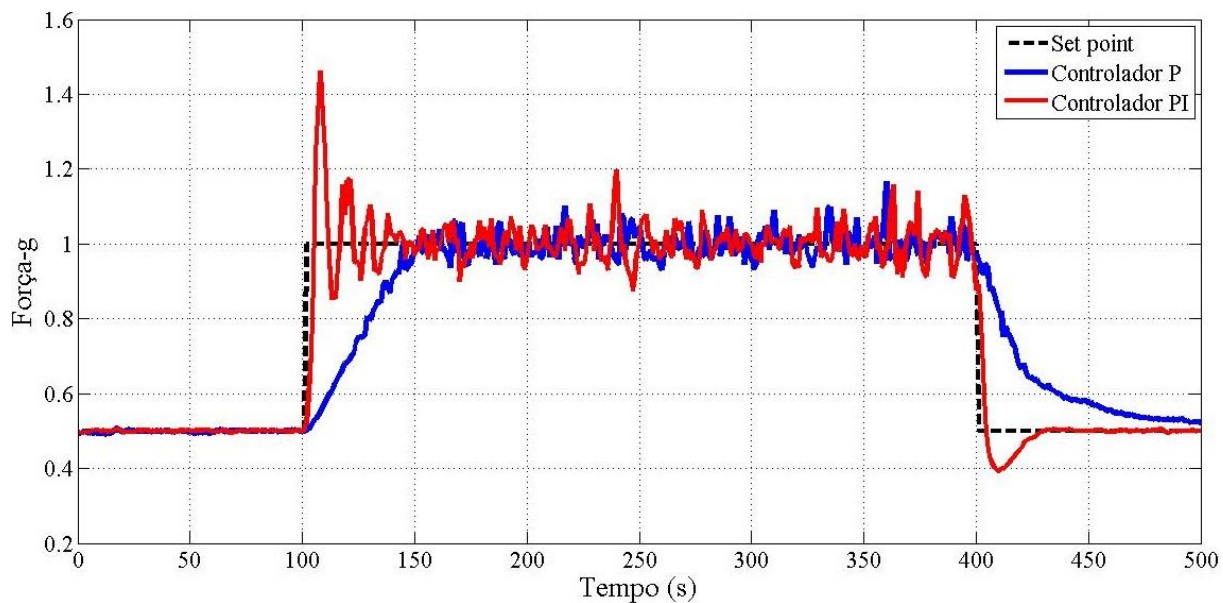


Figura 4.1 – Respostas da peneira aos controladores P e PI

Tabela 4.2 – Avaliação do controlador PI

K_C	τ_I (min)	IAE (min)	Overshoot (%)
20	0,15	-	-
20	0,20	6,46	92,5
20	0,25	5,06	62,2
15	0,15	8,08	91,6
15	0,20	6,35	70,3
15	0,25	6,16	58,8

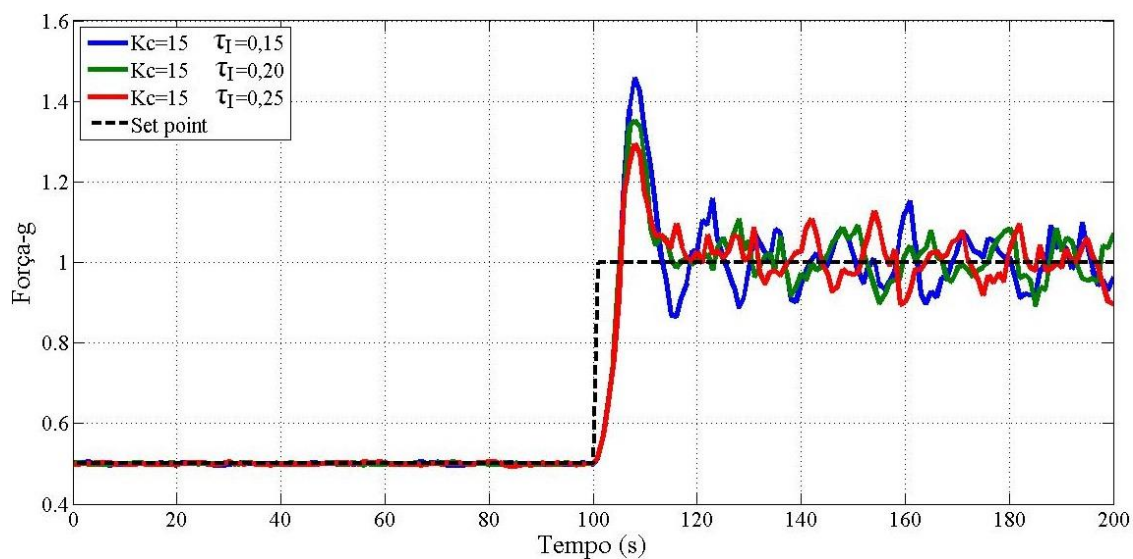


Figura 4.2 – Influência do parâmetro τ_I

Analogamente, o aumento do valor do parâmetro tempo integral interfere positivamente na resposta. Um incremento em τ_I , descrece o valor da IAE e do sobressinal. A diminuição do sobressinal com o aumento de τ_I e $K_C = 15$ rpm é destacada na Figura 4.2. SEBORG et al. (2003) destaca que valores maiores de ganho e menores do tempo integral aumentam a oscilação e sobressinal da resposta. Os valores dos parâmetros utilizados nos experimentos para obtenção do modelos da planta foram os que apresentaram a menor IAE e sobressinal, ou seja, 15 e 0,25 min. A diferença entre os valores da IAE nas Tabelas 4.1 e 4.2 está relacionada com o tempo de análise. Após essa sintonia, os experimentos foram realizados com os parâmetros escolhidos.

4.2 AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS NO ESTADO ESTACIONÁRIO

Todos os resultados coletados experimentalmente são apresentados no Apêndice C. Os resultados selecionados para se analisar o estado estacionário da peneira vibratória são apresentados na Tabela 4.3. Nessa tabela é feita a correlação do teor de umidade dos sólidos retidos em estado estacionário com as condições de operação da peneira: força-g, concentração de sólidos alimentados e vazão de alimentação. Em complemento a esses resultados, o valor médio e o desvio padrão desses valores (excluindo os *outlets*) são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Teores de umidade dos sólidos retidos em estado estacionário

x_1	x_2	x_3	Teor de umidade dos sólidos retidos em estado estacionário (%)											
-1	-1	-1	34,0	34,6	29,0	27,7	31,6	30,8	48,9	43,6	56,9	61,3	40,8	42,8
-1	-1	+1	28,8	30,1	32,6	31,2	35,0	35,1	44,4	44,6	40,2	37,5	36,5	33,7
-1	+1	-1	29,1	22,3	23,0	23,0	21,2	20,3	20,7	20,4	19,2	19,4	19,6	18,8
-1	+1	+1	21,4	24,2	22,9	22,3	23,1	21,8	20,5	21,2	20,5	21,3	21,3	20,9
+1	-1	-1	38,1	35,1	39,5	40,4	42,7	40,7	42,2	45,7	45,2	46,4	46,1	45,8
+1	-1	+1	41,5	45,4	44,4	48,2	39,5	50,4	31,8	38,8	43,1	40,6	49,9	47,8
+1	+1	-1	22,0	21,6	20,8	21,1	21,0	21,7	23,3	22,6	22,0	21,6	22,9	22,2
+1	+1	+1	23,4	23,4	23,2	22,5	23,2	22,7	21,4	22,5	22,8	23,6	22,8	22,9

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 é possível notar uma maior variabilidade das respostas para uma concentração de sólidos menor. O maior desvio padrão para o nível -1 da variável x_2 é 6,1; em contrapartida, para o nível +1 o maior desvio é 1,4. A

baixa concentração de sólidos formavam aglomerações de sólidos muito pequenas sobre a tela em comparação com aquelas obtidas para valores mais elevados de concentração. Em consequência da pequena massa das aglomerações sobre a tela da peneira, essas eram mais afetadas pelo movimento vibratório e possuíam uma trajetória mais instável, sendo arremessadas mais alto, o que proporcionava pequenas perdas no sistema. A trajetória instável aliada às perdas podem ter contribuído para justificar a maior variabilidade nos resultados em condições de concentração baixa de sólidos.

Tabela 4.4 – Teores de umidade médio dos sólidos retidos em estado estacionário

x_1	x_2	x_3	Teor de umidade médio (%)	Desvio padrão
-1	-1	-1	38,4	6,1
-1	-1	+1	36,4	4,6
-1	+1	-1	20,7	1,4
-1	+1	+1	21,6	0,8
+1	-1	-1	43,4	2,5
+1	-1	+1	43,2	3,2
+1	+1	-1	21,9	0,7
+1	+1	+1	22,9	0,6

A partir dos resultados médios dispostos na Tabela 4.4, foram obtidos os parâmetros da Equação 3.8, utilizando o aplicativo *Statistica*. A Equação 4.1 apresenta os valores desses coeficientes, sendo o coeficiente de regressão desse modelo igual a 0,9995. Utilizando ainda o mesmo aplicativo, foram avaliados os efeitos dos parâmetros no modelo. A partir desse estudo, concluiu-se que os parâmetros que acompanham a variável x_3 e as interações x_1x_3 e x_2x_3 não interferiam significativamente no resultado da Equação 4.1. Dessa maneira, o modelo pode ser reescrito pela Equação 4.2 com um coeficiente de regressão 0,9962.

$$M = 31,071 + 1,801x_1 - 9,319x_2 - 0,038x_3 - 1,167x_1x_2 + 0,228x_1x_3 + 0,502x_2x_3 \quad (4.1)$$

$$M = 31,071 + 1,801x_1 - 9,319x_2 - 1,167x_1x_2 \quad (4.2)$$

As Equações 4.1 e 4.2 podem ser reescritas substituindo a variável codificada pela variável real, conforme apresentado pela Tabela 3.3. Desse modo, substituindo as Equações 3.4, 3.5 e 3.6 nas Equações 4.1 e 4.2, obtem-se as Equações 4.3 e 4.4, que, assim como as

equações anteriores, relacionam o teor de umidade com as variáveis estudadas. As novas equações possuem os mesmos coeficientes de regressão das anteriores e representam, de maneira mais clara, a relação entre o teor de umidade e as variáveis estudadas.

$$M = 36,236 + 2,829\Gamma - 3,121C_V - 0,284F - 0,583\Gamma C_V + 0,038\Gamma F + 0,042C_V F \quad (4.3)$$

$$M = 36,236 + 2,829\Gamma - 3,121C_V - 0,583\Gamma C_V \quad (4.4)$$

A partir da Equação 4.4, construiu-se a superfície de resposta do sistema. Esse gráfico é apresentado pela Figura 4.3 e correlaciona o teor de umidade dos sólidos retidos com a força Γ e a concentração de sólidos alimentados.

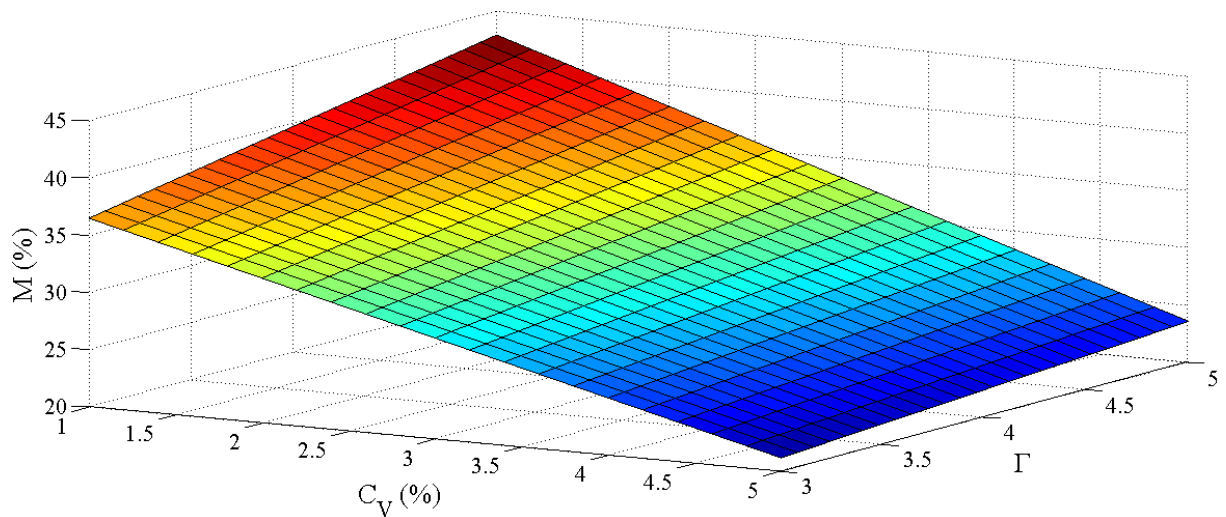


Figura 4.3 – Superfície de resposta para o teor de umidade em estado estacionário

Analisando o modelo encontrado em conjunto com a Figura 4.3, destaca-se que a concentração de sólidos alimentados interfere significativamente no teor de umidade dos sólidos retidos. Independente das demais variáveis, quanto maior a concentração, menor é o teor de umidade. Esse resultado é semelhante ao encontrado por GUERREIRO (2015).

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam fotografias da tela da peneira operando com diferentes valores de concentração de sólidos alimentados. Observando essas fotografias, nota-se que a concentração de sólidos interfere na área ocupada pela tela e no tamanho de aglomerados de sólidos formados. Comparando ambas as figuras, nota-se que, para uma concentração menor (Figura 4.4), há menos sólidos distribuídos sobre a tela da peneira. Por outro lado, para uma concentração maior (Figura 4.5), há mais sólidos ao longo da peneira vibratória.

Durante a realização dos experimentos, observou-se que os sólidos menores (formados em uma operação com concentração de 1,0%) eram movimentados com maior velocidade do que os sólidos maiores (formados com uma alimentação de 5,0%). Essa velocidade estava relacionada principalmente com a massa que o aglomerado adquiria e com sua resistência em relação ao atrito com a tela. Desse modo, o aumento da concentração de sólidos na alimentação proporcionava um aumento na velocidade de transporte da peneira e, por consequência, uma diminuição no tempo de residência dos sólidos. Dessa maneira, com a alimentação mais concentrada, o material sobre a tela era separado por um tempo menor o que proporcionava um sólido retido mais úmido.



Figura 4.4 – Sólidos sobre a tela ($\Gamma = 3,00$; $C_V = 1,0 \%$ e $F = 13 \text{ kg/min}$)

Avaliando novamente o modelo obtido e a Figura 4.3, nota-se que a força-g possui uma influência menor no teor de umidade dos sólidos retidos quando em comparação com a influência da concentração de sólidos alimentados. Para uma concentração de sólidos menor, o aumento da força-g causa um aumento no teor de umidade. Esse resultado condiz com o apresentado por GUERREIRO (2015). Entretanto, para uma concentração maior de sólidos, a força-g possui pouco efeito na umidade dos sólidos retidos. Essa segunda avaliação é semelhante a obtida por DORRY (2010).

Como apresentado e discutido por DORRY (2010) e GUERREIRO (2015), o aumento da força-g causa um aumento na velocidade de transporte do material sobre a tela. Dessa maneira, semelhantemente a análise anterior, a peneira operando com uma velocidade maior

retêm sólidos mais úmidos. Entretanto, se há mais material sobre a tela, a vibração da peneira não é capaz de aumentar significativamente a velocidade de transporte e o aumento da força-g não interfere no teor de umidade dos sólidos retidos. Combinando essas duas análises com os resultados obtidos nesse trabalho, é possível afirmar que, para concentrações menores assim como estudado por GUERREIRO (2015), o aumento da força-g retêm sólidos mais úmidos. Entretanto, para concentrações maiores de sólidos, o aumento da força-g não é capaz de alterar significativamente a velocidade de transporte do material e, por consequência, sua umidade dos sólidos retidos.



Figura 4.5 – Sólidos sobre a tela ($\Gamma = 3,00$; $C_v = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

Comparando as Equações 4.3 com a 4.4 e considerando os seus respectivos coeficientes de regressão, é possível notar que a vazão de alimentação não interfere significativamente no teor de umidade dos sólidos retidos. A Equação 4.4 não possui dependência com a vazão de alimentação, sendo mais simples que a Equação 4.3. Contudo, o valor do coeficiente de regressão da Equação 4.4 é muito próximo ao valor do coeficiente da Equação 4.3. Essa avaliação também pode ser feita comparando os dados da Tabela 4.4. Semelhantemente a esse resultado, ROGERS; BRAME (1985) também avaliaram pouca influência da vazão na razão entre material sólido retido e alimentado. Supõe-se que o aumento na vazão também aumentaria a quantidade de sólido sobre a tela, entretanto o esse efeito se mostrou muito menor que o proporcionado pelo aumento da concentração.

Diferente do observado pelo aumento da concentração de sólidos na alimentação, o aumento da vazão não aumentou significativamente a quantidade de material sobre a tela, para

os valores estudados. Entretanto, como apresentado pelo Apêndice A, estudos preliminares indicaram que existe uma vazão máxima que ultrapassa a capacidade da peneira. Na Figura A.1, pode-se perceber que, para uma força-g de 1,0, a vazão de alimentação máxima é menor que 13 kg/min no protótipo utilizado. Os estudos de ROGERS; BRAME (1985) também indicaram a presença de uma vazão máxima função da concentração de sólidos e abertura da tela.

A partir das análises realizadas anteriormente baseadas no modelo obtido e nos resultados experimentais, pode-se propor o melhor ponto de operação da peneira vibratória em relação às variáveis estudadas. O menor teor de umidade foi encontrado para força-g 3,0; concentração de sólidos 5,0 % e vazão de alimentação 13 kg/min. A operação do equipamento nesses níveis das variáveis estudadas proporcionam um sólido com um menor teor de líquido e por consequência uma maior recuperação do fluido no material passante. Por outro lado, o maior teor de umidade foi encontrado para força-g de 5,0; concentração de sólidos de 1,0 % e vazão de alimentação de 25 kg/min. Não é recomendada a operação da peneira vibratória nessas condições, pois o teor de umidade dos sólidos retidos é aproximadamente o dobro daquele obtido no ponto ótimo de operação.

4.3 AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS APÓS A PERTURBAÇÃO

Utilizando o algoritmo *Simplex* como descrito no Apêndice B, para cada corrida, ajustou-se os parâmetros da função de transferência que representavam a transição dinâmica após a perturbação na variável estudada. Os parâmetros ajustados em cada corrida são apresentados no Apêndice D em forma de tabelas, de modo que cada tabela representa um experimento da Tabela 3.6. Bem como, cada linha das tabelas do Apêndice D representa o ajuste dos parâmetros para uma corrida diferente com o respectivo coeficiente de regressão. O detalhamento dos resultados encontrados é apresentado a seguir.

4.3.1 Resposta dinâmica em relação à força-g

Na Tabela 4.5, são apresentados os valores médios e desvio padrão da umidade antes (\bar{M}_{Inicial}), após (\bar{M}_{final}), o degrau na variável estudada e a variação do valor de umidade ($\Delta\bar{M}$). Esses resultados foram calculados a partir dos dados do Apêndice C. A partir desses resultados é possível observar a maior variação da umidade dos sólidos retidos após um degrau de força-g com concentração de sólidos de 1,0 %.

Tabela 4.5 – Variação do teor de umidade após degrau na força-g

x_2	x_3	$\bar{M}_{\text{Inicial}} (\%)$	Desvio padrão	$\bar{M}_{\text{final}} (\%)$	Desvio padrão	$\Delta\bar{M} (\%)$
-1	-1	32,27	1,17	38,28	2,08	6,01
-1	+1	33,11	1,29	43,07	4,44	9,96
+1	-1	20,23	0,62	22,04	0,52	1,82
+1	+1	20,85	0,23	22,61	0,35	1,77

Semelhantemente, na Tabela 4.6, são apresentados os parâmetros médios obtidos após a perturbação da força-g em diferentes níveis de concentração de sólidos alimentados e vazão de alimentação. Esses resultados foram calculados a partir das médias dos parâmetros expostos nas Tabelas D.1, D.2, D.3 e D.4. Os valores da constante de tempo e do tempo morto são apresentados em segundos. Bem como o ganho do modelo é adimensional.

Tabela 4.6 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da força-g (modelo FOPDT)

x_2	x_3	K_1^M	τ_1^M	θ_1^M
-1	-1	4,57	96,24	85,27
-1	+1	7,69	101,95	49,90
+1	-1	0,91	4,16	51,97
+1	+1	0,88	4,32	49,12

A partir dos dados da Tabela 4.6, estimou-se os vetores de coeficientes da Equação 3.11. Novamente, para essa estimativa, foi utilizado o *software Statistica*. Esses resultados são expostos pela Equação 4.5 e relacionam o valor dos parâmetros da função de transferência (Equação 3.8) com os níveis de concentração e vazão de alimentação. O efeito das variáveis x_2 e x_3 também foi avaliado pelo *Statistica* e se observou uma dependência da constante de tempo somente da concentração de sólidos. O coeficiente de regressão da Equação 4.5 possui valor unitário, pois foram utilizados o maior número de coeficientes possíveis para descrever o comportamento dos parâmetros da equações dinâmica.

$$\begin{pmatrix} K_1^M \\ \tau_1^M \\ \theta_1^M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,52 \\ 51,67 \\ 59,06 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2,62 \\ -47,43 \\ -8,52 \end{pmatrix} x_2 + \begin{pmatrix} 0,77 \\ 1,47 \\ -9,56 \end{pmatrix} x_3 + \begin{pmatrix} -0,79 \\ -1,39 \\ 8,13 \end{pmatrix} x_2 x_3 \quad (4.5)$$

Em todos os casos estudados, o ganho do sistema é positivo, ou seja, o aumento da força-g aumenta o teor de umidade dos sólidos retidos (efeito não desejado), como avaliado anteriormente. Analisando as Tabelas 4.5 e 4.6, nota-se que a influência da força-g é maior para concentrações menores, dessa maneira o ganho é maior no menor nível da concentração. Entretanto, também é possível avaliar uma forte influência da variável x_2 na rapidez da resposta da peneira. As constantes de tempo estimadas para o sistema decrescem significativamente com o aumento do teor de sólidos. Dessa maneira, a resposta do sistema a uma perturbação de força-g é mais lenta para concentrações menores.

A Figura 4.6 apresenta os resultados médios da resposta do teor de umidade após um degrau na força-g nas condições $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min. Da mesma maneira, a Figura 4.7 expõe a resposta do experimento operando com $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min. A comparação entre as Figuras 4.6 e 4.7 ilustra a diferença nas constantes de tempo apresentadas na Tabela 4.5. Observando essa tabela também é possível destacar uma dependência do ganho K_1^M em função da concentração e da vazão de alimentação. Para uma concentração menor de sólidos, K_1^M aumenta com o incremento na vazão, o que não acontece para a concentração maior. As Figuras 4.8 e 4.9 comparam os dados experimentais médios com os modelos ajustados. É possível notar, nesse caso, um melhor ajuste no modelo que representa o comportamento dinâmico da força-g a uma concentração menor.

Utilizando a Equação 3.17 com os valores apresentados pela Tabela 4.5, calculou-se o intervalo transiente para cada condição de operação. Esses resultados são apresentados pela Tabela 4.7. A partir desses resultados, compreende-se melhor a dependência da agilidade do sistema em relação à concentração de sólidos. Nota-se um intervalo transiente maior para concentrações menores de sólidos. A maior agilidade na resposta do sistema operando com uma concentração maior está relacionada com o efeito dessa perturbação. Dessa maneira, a intensidade da perturbação operando com uma concentração de $1,0\%$ é maior, sendo assim, o sistema demora um tempo maior para atingir o novo estado estacionário. Com uma concentração de $5,0\%$, a resposta da perturbação é bem menor e o sistema é mais ágil.

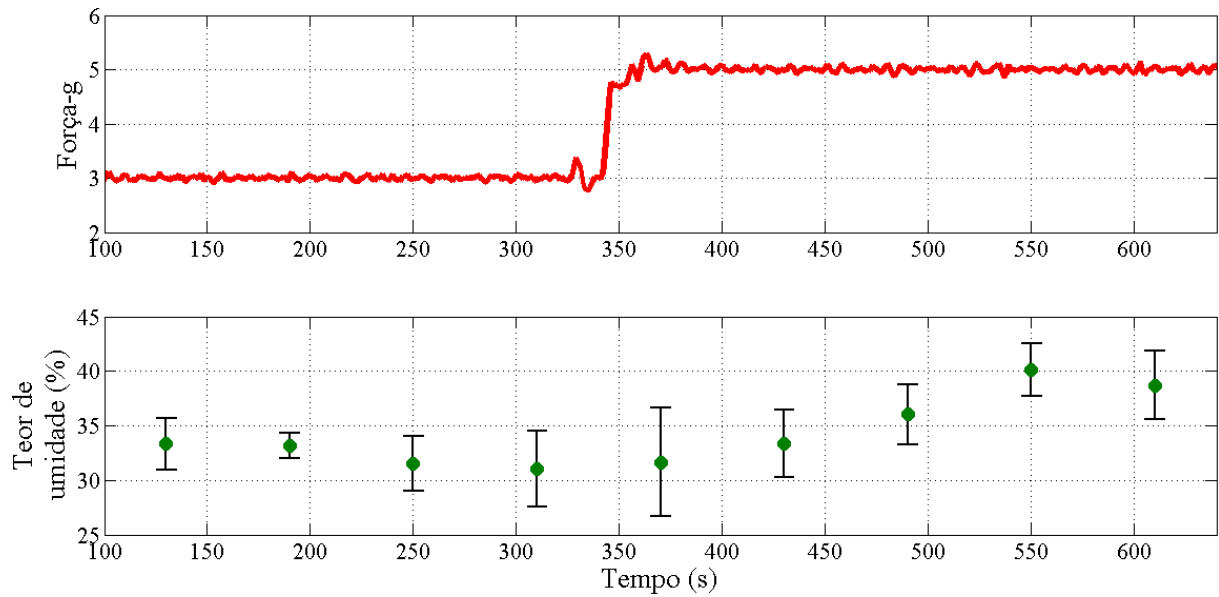


Figura 4.6 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude 2,0 força-g ($C_V = 1,0\%$ e $F = 13\text{ kg/min}$)

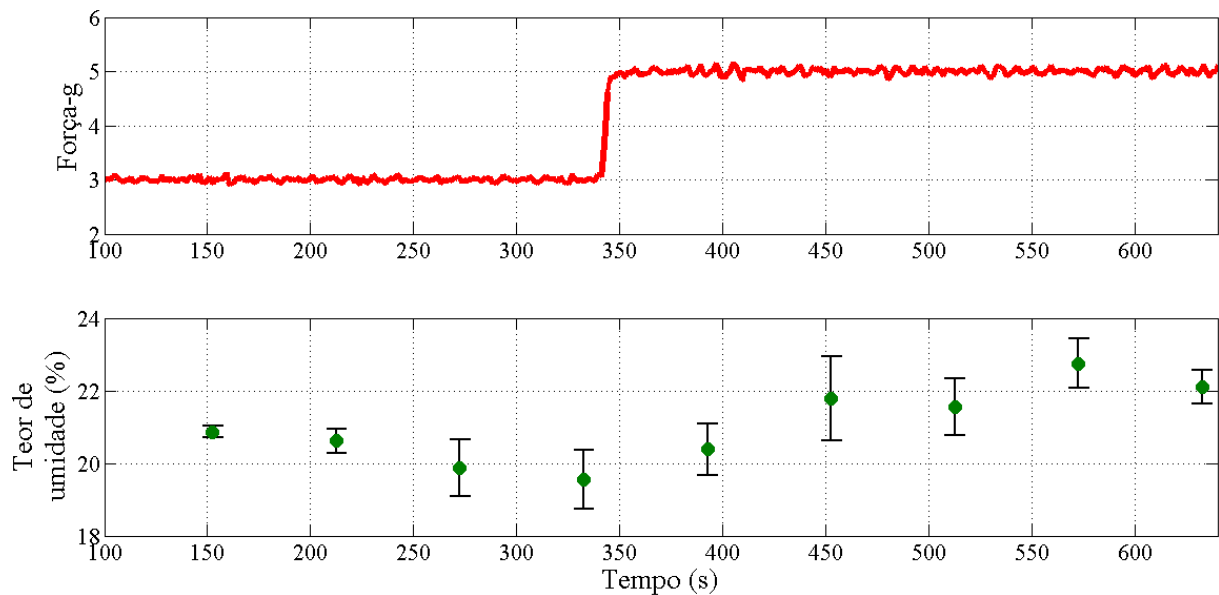


Figura 4.7 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude 2,0 força-g ($C_V = 5,0\%$ e $F = 13\text{ kg/min}$)

Tabela 4.7 – Intervalos transientes após perturbação na força-g

x_2	x_3	t_{t1} (s)
-1	-1	373,61
-1	+1	355,34
+1	-1	64,43
+1	+1	62,05

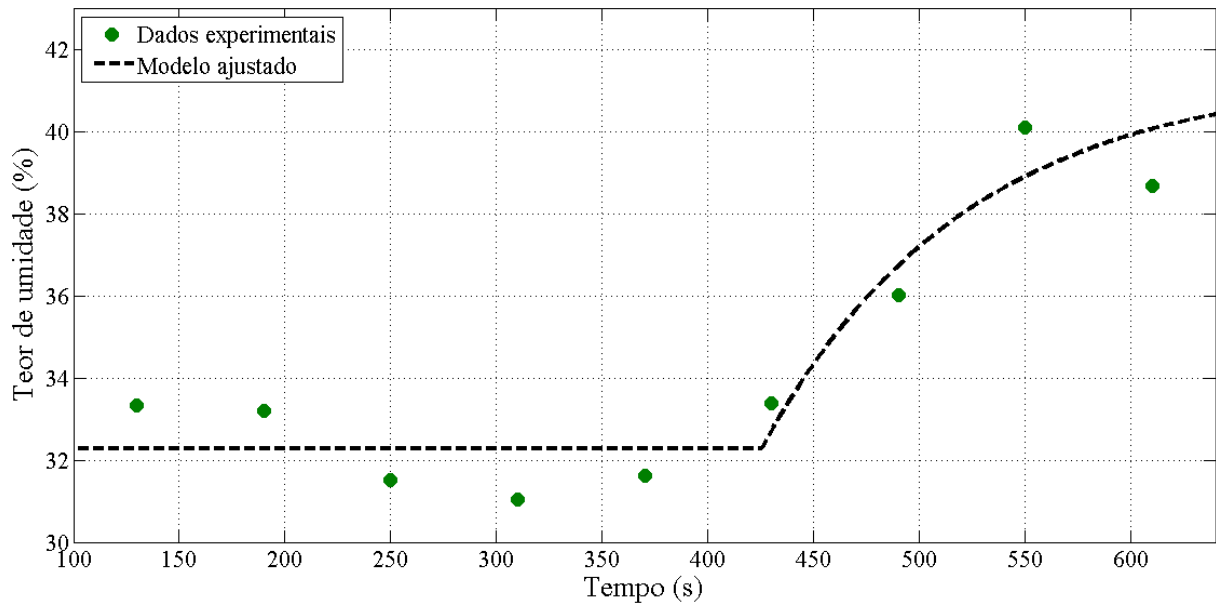


Figura 4.8 – Modelo ajustado (Degrau de amplitude 2,0 na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

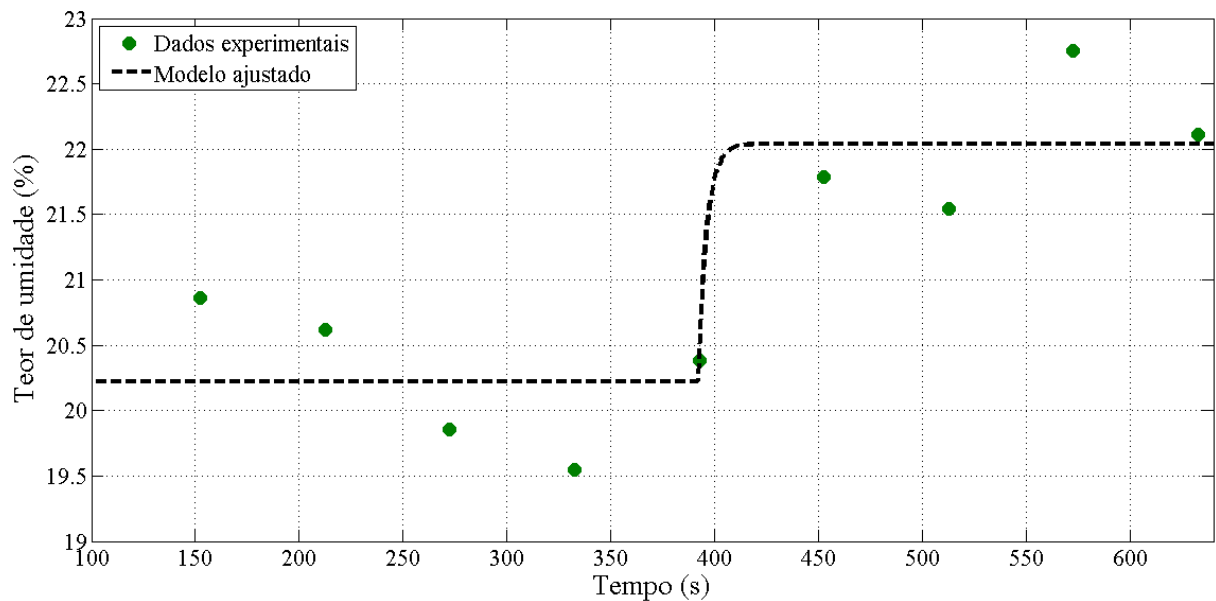


Figura 4.9 – Modelo ajustado (Degrau de amplitude 2,0 na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

Os parâmetros da Equação 3.18 foram obtidos pelo aplicativo *Statistica*® utilizando os dados da Tabela 4.7. A Equação 4.6 apresenta esses coeficientes e possui coeficiente de regressão unitário. Também pela análise do *Statistica*, avaliou-se que os parâmetros que acompanham a variável x_3 não interferem significativamente no cálculo. Dessa maneira, o modelo pode ser reescrito pela Equação 4.7 com um coeficiente de regressão 0,9981.

$$t_{t1} = 213,86 - 150,62x_2 - 5,16x_3 + 3,97x_2x_3 \quad (4.6)$$

$$t_{t1} = 213,86 - 150,62x_2 \quad (4.7)$$

4.3.2 Resposta dinâmica em relação à concentração de sólidos

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios da umidade antes, após o degrau na concentração dos sólidos alimentados e a variação desse teor. Esses resultados também foram calculados a partir dos dados do Apêndice C. O teor de umidade médio antes do degrau na concentração era de 24,38% e após a perturbação esse valor diminui para 19,96%.

Tabela 4.8 – Variação do teor de umidade após degrau na concentração

x_1	x_3	$\bar{M}_{\text{Inicial}} (\%)$	Desvio padrão	$\bar{M}_{\text{final}} (\%)$	Desvio padrão	$\Delta\bar{M} (\%)$
-1	-1	23,34	0,42	19,87	0,34	-3,47
-1	+1	25,63	2,60	20,09	0,32	-5,54
+1	-1	24,54	1,15	20,01	0,23	-4,52
+1	+1	23,99	0,55	19,85	0,74	-4,14

A partir dos dados das Tabelas D.5, D.6, D.7 e D.8, calculou-se os valores médios dos parâmetros da relação dinâmica entre o teor de umidade e a concentração de sólidos. Esses valores foram descritos em função dos níveis de força-g e vazão de alimentação e são apresentados pela Tabela 4.9. As dimensões do ganho, constante de tempo e tempo morto são as mesmas das representadas na Tabela 4.6. A Figura 4.10 apresenta a resposta média do teor de umidade dos sólidos retidos após uma perturbação na concentração com a peneira operando com uma força-g de 5,0 e uma vazão de 13 kg/min. Em adição, na Figura 4.11 são comparados esses dados médios com o modelo ajustado pelos coeficientes apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da concentração de sólidos

x_1	x_3	K_2^M	τ_2^M	θ_2^M
-1	-1	-1,73	2,92	54,95
-1	+1	-2,15	13,25	72,53
+1	-1	-2,30	3,78	87,33
+1	+1	-2,07	2,70	56,27

A partir desses resultados, constatou-se que o ganho do sistema não sofre influência significativa dos níveis de força-g e vazão de alimentação estudados. Entretanto, analisando os dados da Tabela 4.9, a velocidade de resposta do sistema sobre influência dos níveis de força-g e vazão. É possível avaliar que para nível baixo de força-g e nível alto de vazão, o parâmetro τ_2^M é maior que nas demais condições, indicando que a resposta do sistema é mais lenta para esses níveis de x_1 e x_3 . É possível constatar também que o sistema é menos ágil para as condições na qual ambas as variáveis se encontram em nível baixo e ambas em nível alto, por possuírem τ_2^M e θ_2^M menores. Esse comportamento mostra uma forte interação entre as variáveis x_1 e x_3 na resposta dinâmica da umidade após um degrau na concentração de sólidos.

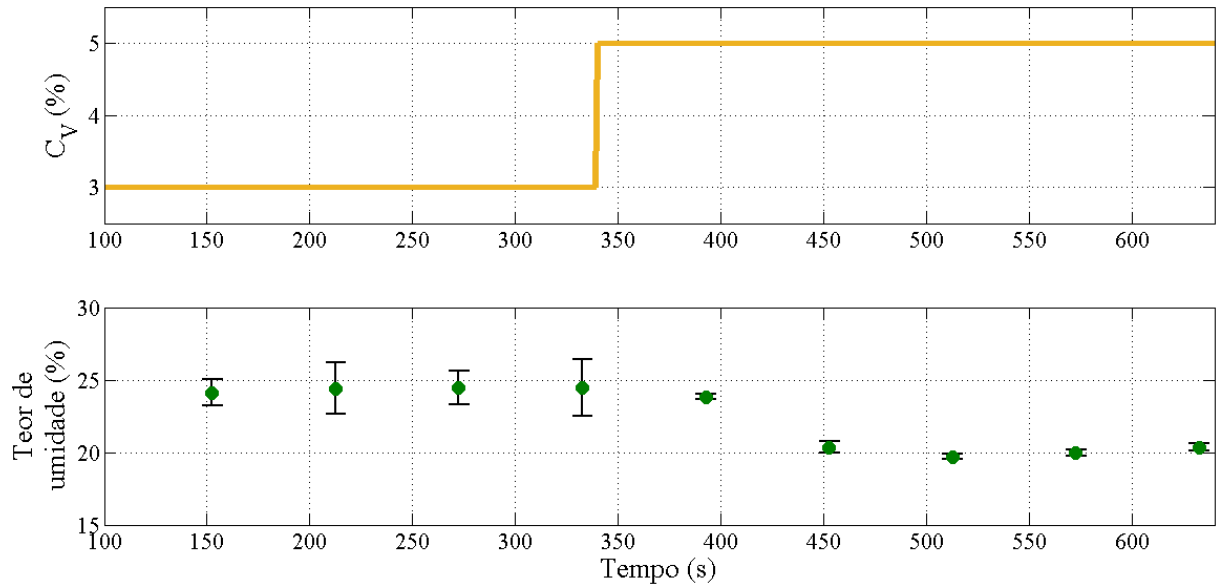


Figura 4.10 – Resposta da umidade em relação a um degrau de amplitude -2,0 % na concentração de sólidos ($I = 5,0$ % e $F = 13$ kg/min)

Utilizando os resultados apresentados pela Tabela 4.9, os coeficientes da Equação 3.12 foram estimados pelo aplicativo *Statistica*®. Esses valores são apresentados pela Equação 4.8 e relacionam os coeficientes da função de transferência (Equação 3.9) com os níveis de força-g e vazão de alimentação.

$$\begin{pmatrix} K_2^M \\ \tau_2^M \\ \theta_2^M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2,06 \\ 5,66 \\ 67,77 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0,122 \\ -2,42 \\ 4,03 \end{pmatrix} x_1 + \begin{pmatrix} -0,05 \\ 2,31 \\ -3,37 \end{pmatrix} x_3 + \begin{pmatrix} 0,161 \\ -2,85 \\ -12,16 \end{pmatrix} x_1 x_3 \quad (4.8)$$

Analisando a Equação 4.8, nota-se que os coeficientes com valores maiores (com exceção das médias) são os referentes às interações entre x_1 e x_3 , o que indica uma forte dependência dessa interação. É possível avaliar também que os coeficientes referentes à relação entre o ganho (primeira linha da Equação 4.8) e as variáveis estudadas são baixos, indicando pouca dependência entre o ganho, x_1 e x_3 . Entretanto, utilizando a análise do *software*, todas as variáveis possuíam efeito significativo no comportamento de K_2^M , τ_2^M e θ_2^M . Esses resultados foram avaliados utilizando um intervalo de confiança de 95%.

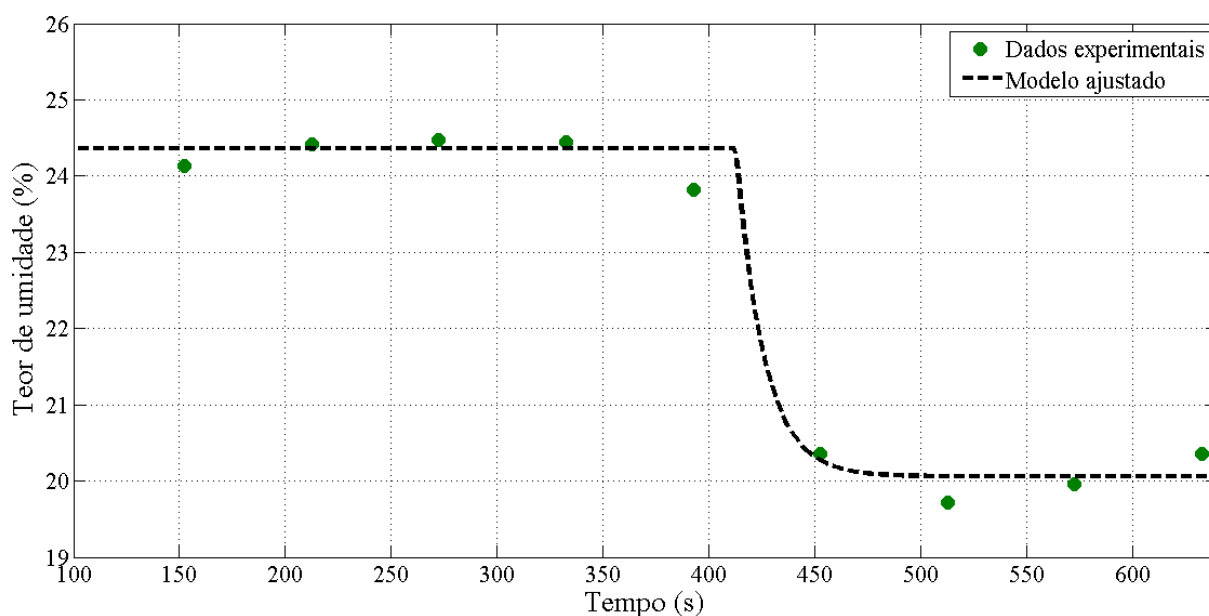


Figura 4.11 – Modelo ajustado ($\Gamma = 5,0$ %, degrau de amplitude $-2,0$ % em C_V e $F = 13$ kg/min)

A partir dos dados da Tabela 4.7, calculou-se também os intervalos transientes após uma perturbação da concentração de sólidos alimentados. Esses dados são apresentados na Tabela 4.10, na qual é possível avaliar a relação entre esses dados e as variáveis independentes força-g e vazão de alimentação da peneira.

Tabela 4.10 – Intervalos transientes após perturbação na concentração

x_1	x_3	t_{t2} (s)
-1	-1	63,70
-1	+1	112,23
+1	-1	98,66
+1	+1	64,35

Em seguida, estimou-se os parâmetros da Equação 3.19 semelhantemente ao realizado para uma perturbação na força-g. Esses coeficientes são apresentados pela Equação 4.9, a qual relaciona o intervalo transiente com as variáveis x_1 e x_3 . Novamente, avaliou-se o efeito das variáveis independentes sobre o modelo, e foi determinado que somente as variáveis x_1 e x_3 independentes não possuem influência. A Equação 4.10 apresenta uma nova relação e possui um coeficiente de regressão de 0,9490.

$$t_{t2} = 84,73 - 3,23x_1 + 3,55x_3 - 20,71x_1x_3 \quad (4.9)$$

$$t_{t2} = 84,73 - 20,71x_1x_3 \quad (4.10)$$

Analisando novamente a Tabela 4.10, nota-se que para o nível baixo de força-g, o aumento na vazão, o tempo de resposta é maior. Desse modo, avalia-se que o incremento na vazão adiciona uma quantidade maior de material sobre a tela, proporcionando uma diminuição da velocidade de transporte do material sobre a tela e tornando a resposta do sistema mais lenta. De maneira oposta, para o nível alto de força-g, o aumento na vazão diminui o tempo de resposta. Nesse caso, devido a maior energia fornecida pelo sistema, o efeito anterior não ocorre.

4.3.3 Resposta dinâmica em relação à vazão de alimentação

A Tabela 4.11 apresenta os valores médios dos teores de umidade antes e após o degrau na vazão de alimentação e a variação da umidade com a perturbação. Esses resultados foram calculados a partir dos dados do Apêndice C. É possível notar que a vazão de alimentação somente alterou significativamente o teor de umidade nas condições de força-g 1,0 e concentração 1,0 %.

Tabela 4.11 – Variação do teor de umidade após degrau na vazão de alimentação

x_1	x_2	$\bar{M}_{\text{Inicial}} (\%)$	Desvio padrão	$\bar{M}_{\text{final}} (\%)$	Desvio padrão	$\Delta\bar{M} (\%)$
-1	-1	50,57	3,37	42,68	5,38	-7,89
-1	+1	22,62	1,09	22,22	0,44	-0,30
+1	-1	42,52	3,45	41,87	1,92	-0,65
+1	+1	21,44	0,15	22,91	0,32	1,46

A Tabela 4.12 apresenta os parâmetros médios da relação dinâmica entre o teor de umidade dos sólidos e a vazão de alimentação. Esses valores foram obtidos da média simples dos resultados apresentados pelas Tabelas D.9, D.10, D.11 e D.12. Destaca-se, nesse caso, a grande variabilidade dos resultados em relação aos demais estudos. A corrida 2 apresentada pela Tabela D.12 possui um ganho muito maior, enquanto a corrida 1 expõe τ_3^M e θ_3^M bem menores que as outras. Da mesma maneira, as Tabelas D.10 e D.11 exibem ganhos com sinais diferentes. Adicionalmente, os coeficientes de regressão apresentados o Apêndice D para esses experimentos, em geral, são menores que os demais.

Tabela 4.12 – Parâmetros médios referentes a análise dinâmica da concentração de sólidos

x_1	x_2	K_3^M	τ_3^M	θ_3^M
-1	-1	-1,03	2,32	68,41
-1	+1	-0,04	7,48	63,00
+1	-1	-0,04	1,46	53,26
+1	+1	0,15	9,14	113,31

A partir da variabilidade dos resultados encontrados e dos dados apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12, é possível destacar a baixa influência que uma perturbação da vazão de alimentação causa no teor de sólidos retidos para os valores estudados. Entretanto, para força-g 1,0 e concentração 1,0% essa influência se eleva. Na Figura 4.12, são apresentados os teores de umidade médios com seus respectivos erros ao longo do tempo inicialmente para $\Gamma = 3,0$ e $C_V = 5,0$ %. Nesse gráfico, nota-se pouca mudança nos valores medidos de umidade após a perturbação, que ocorre aos 340 segundos. Um comportamento semelhante é observado após a perturbação da vazão em outras condições. Como citado anteriormente, esperava-se um comportamento semelhante ao da concentração de sólidos, visto que o aumento de vazão também aumenta a quantidade de sólido sobre a tela. Todavia, a perturbação na vazão não alterou significativamente a quantidade de material sobre a tela para os valores estudados.

Os coeficientes da Equação 3.13 foram encontrados do mesmo modo que os demais. Esses valores são apresentados pela Equação 4.11, que relaciona os parâmetros da Equação 3.10 com a força-g e a concentração de sólidos alimentados. Como esperado, o ganho do modelo é muito pequeno, indicando pouca mudança após a perturbação na vazão de alimentação.

$$\begin{pmatrix} K_3^M \\ \tau_3^M \\ \theta_3^M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,24 \\ 5,10 \\ 74,49 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,30 \\ 0,20 \\ 8,79 \end{pmatrix} x_1 + \begin{pmatrix} 0,30 \\ 3,21 \\ 13,66 \end{pmatrix} x_2 + \begin{pmatrix} -0,20 \\ 0,63 \\ 16,36 \end{pmatrix} x_1 x_2 \quad (4.11)$$

Utilizando os dados da Tabela 4.9 e a Equação 3.17, estimou-se os tempos do estado transiente após uma perturbação na vazão de alimentação. Esses dados são apresentados na Tabela 4.13. Por fim, calculou-se os valores dos coeficientes da Equação 3.20. Esses valores são apresentados pela Equação 4.12 que relaciona o tempo do transiente após uma alteração na vazão com a força-g e a concentração de sólidos na alimentação. A partir dessas análises, observa-se que o maior tempo ocorre para os níveis altos de força-g e concentração.

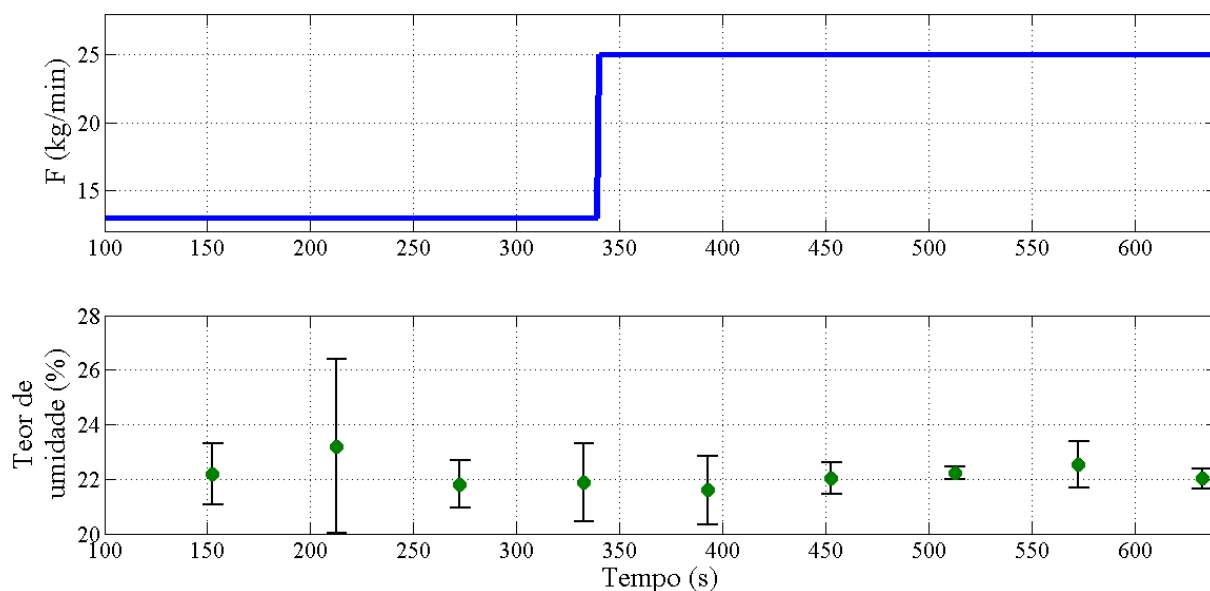


Figura 4.12 – Respostas do teor de umidade em relação a um degrau de amplitude 12 kg/min na vazão de alimentação

Tabela 4.13 – Intervalos transientes após perturbação na vazão de alimentação

x_1	x_2	t_{t3} (s)
-1	-1	75,37
-1	+1	85,40
+1	-1	57,63
+1	+1	140,70

$$t_{t3} = 89,77 + 9,39x_1 + 23,28x_2 + 18,26x_1x_2 \quad (4.12)$$

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização desse projeto, pôde-se avaliar o comportamento dinâmico e em estado estacionário do protótipo de uma peneira vibratória com uma alimentação que simula um fluido de perfuração real. A partir de um planejamento fatorial de experimentos e identificação de sistemas dinâmicos, obtiveram-se relações entre o teor de umidade dos sólidos retidos e a força-g, concentração de sólidos e vazão de alimentação. Durante a realização dos experimentos, o protótipo se mostrou eficiente para o estudo proposto e houve reprodutibilidade dos resultados obtidos. Dessa maneira, pode-se concluir que o protótipo é válido na representação do peneiramento vibratório e útil para se reduzir o número de experimentos necessários em escala industrial.

Os resultados obtidos indicaram forte influência da concentração dos sólidos da alimentação no teor de umidade dos sólidos retidos. O aumento da concentração proporcionou uma diminuição da umidade e esse fato foi relacionado com a quantidade de material acumulado sobre a tela, que também aumentava com a concentração. De maneira oposta, o aumento da força-g proporcionou um acréscimo do teor de umidade dos sólidos retidos e a vazão de alimentação (no intervalo estudado) não interferiu no desempenho da separação. As condições de operação que apresentaram um menor teor de umidade e, por consequência, uma maior recuperação do fluido foram $\Gamma = 3,0$; $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min. Dessa maneira, para se reduzir a quantidade de fluido descartada junto ao sólido (secagem do sólido), recomenda-se a diminuição da força-g e o aumento da concentração de sólidos na alimentação para as faixas dessas variáveis estudadas.

Os resultados dinâmicos do sistema também indicaram uma transição mais lenta após a perturbação na força-g. Entretanto, o aumento da concentração de sólidos diminuiu significativamente o tempo de transição do sistema após uma mudança na força-g. A transição do sistema após uma perturbação na concentração se apresentou mais lenta para as condições $\Gamma = 3,0$ e $F = 25$ kg/min. Nas demais condições, a resposta do sistema foi mais rápida. Por fim, a perturbação na vazão de alimentação apresentou pouca interferência no teor de umidade dos sólidos, sendo difícil calcular um tempo de transição. Entretanto, destaca-se a existência de uma vazão máxima de operação da peneira caracterizada pelo acúmulo excessivo de material sobre a tela. Uma operação com $\Gamma < 3,0$, a vazão máxima é menor que 13 kg/min.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Substituição das válvulas de alimentação e recirculação da unidade experimental. As válvulas gaveta utilizadas apresentaram deposição de material particulado impedindo a vedação total das tubulações. A válvula borboleta de alimentação apresentou muita sensibilidade, dificultando a operação. Válvulas guilhotinas ou mangotes podem ser utilizadas na substituição desses instrumentos.
- Readequação da calha de alimentação da peneira. Houve deposição de material sólido na calha durante a operação. Esse fato proporcionava uma distribuição não uniforme da alimentação da peneira sobre a tela. Nos experimentos realizados era necessária a limpeza da calha frequentemente. Recomenda-se o aumento da profundidade da calha de alimentação.
- Conectar indicador de vazão ao computador de operação da peneira e projetar de um sistema de controle de vazão. O controle de vazão pode ser realizado manipulando a abertura da válvula de alimentação e/ou a rotação da bomba de recirculação/alimentação (no segundo caso, é necessário a aquisição de um inversor de frequência e substituição da bomba).
- Implementar 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.
- Iniciar operação da peneira industrial (*scaleup*). Uma peneira em escala industrial já foi adquirida e se encontra em fase final de instalação. O tanque auxiliar, tubulações, válvulas e bomba já se encontram instalados. As próximas etapas para o início de operação são: adquirir telas próprias desse equipamento multicamadas (comumente utilizadas na indústria), energização dos motovibradores e instalação do sistema de controle.
- Avaliação da eficácia dos modelos identificados nesse projeto para a operação em escala industrial utilizando essa nova peneira. Se necessário, readequação dos modelos visando predição da operação industrial.
- Utilização dos modelos identificados nesse projeto para a viabilização da automação da peneira vibratória utilizada.
- Sugere-se avaliar como a forma de vibração (tipo do movimento vibratório) interfere no desague da peneira vibratória e em sua separação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luis Antônio. INTRODUÇÃO À IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS – AADE. SHALE SHAKERS and DRILLING FLUID SYSTEMS: Techniques and Technology for Improving Solids Control Management. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. Drilling Fluids Processing: Handbook. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2005.

Barros NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas: Editora da UNICAMP, 2001.

BICALHO, Isabele Cristina. Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna. 2015. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

BOBO, Roy 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>

BRANDT, King™ Cobra Separator, 2000. 1 figura, Peneira vibratória Brandt King Cobra, desenvolvida por Brandt.

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>

CUTT, A. R. Screen Characterization Through Image Analysis. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 66, 1991, Dallas. Society of Petroleum Engineers, 1991.

<https://doi.org/10.2118/22570-MS>

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

ENDRESS, Alex. 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. 2015.

Fowler, R. T.; Lim, S. C. The influence of various factors upon the effectiveness of separation of a finely divided solid by a vibrating screen. Chemical Engineering Science, v. 10, p. 163-170, 1959.

[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(59\)80044-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(59)80044-0)

FRANCO, Neid Bertoldi. Cálculo numérico. São Paulo: Pearson, 2012.

FREGOLENTE, Leonardo Vasconcelos. Aplicação de planejamento de experimentos em diferentes etapas do refino de petróleo. 2009. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia

Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

Galery, R.; Valadão, G. E. S.; Montenegro, L. C. M. Separação por tamanho. In: VALADÃO, G. E. S. e ARAÚJO, A. C. A. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007. p. 61-84.

GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK. 8 ed. Nova York: McGraw Hill, 2008.

GUERREIRO, Fernando Superbi. 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, Fernando Superbi; GEDRAITE, Rubens; ATAÍDE, Carlos Henrique. 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>

GUIFENG, Wang; XIN, Tong. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. Mining Science and Technology, v. 21, p. 451-455, 2011.

HANGOS, Katalin; CAMERON, Ian. ProcessModelling 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.

IMI SENSORS. Model 646B00: 4-20 mA Output Accelerometer Installation and Operating Manual. 2016. Disponível em: <http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/IMI/>

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Certificado de material referência: Areia normal para ensaios de cimento – Especificação. 2016. Disponível em: <<http://www.ipt.br/solucoes/255.htm>>. Acesso em 08 jun. 2016.

King, R. P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

LAL, Manohar; HOBEROCK, L. L. Solids-Conveyance Dynamics and Shaker Performance. SPE Drilling Engineering, p. 385-394, dez. 1988.

LARSON, Thomas R. Apirp 13c d100 values, split curves, and separation efficiency. In: AADENATIONAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. Houston, Texas: [s.n.], 2007. American Association of Drilling Engineers Fluids, Houston: [s.n.], 2007. Disponível em: <<http://www.aade.org/app/download/7050506604/AADE-07-NTCE-53.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

MARSHALL, William H.; BRANDT, Louis K. Solids Control in a Drilling Fluid. In: SYMPOSIUM ON FORMATION DAMAGE CONTROL OF THE SOCIETY OF PETROLEUM OF AIME, 3., 1978, Lafayette. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. Texas: 1978. p. 109-112.

McCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOT, Peter. Unit Operation of Chemical Engineering. 5 ed. Singapura: McGraw-Hill, 1993.

MEINEL, Achin. Zur Rolle und Optimierung der Siebboden- und Siebgutbewegung auf Wurf siebmaschinen. Aufbereitungs Technik, v. 46, p. 42-62, 2004.

MILHOMEM, Felipe de Orquiza. Modelagem de Desaguamento em Peneira. 2013. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

NJOBUEWU, Derrick O.; WOBO, Chimeka A. Effect of drilled solids on drilling rate and performance. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 55, p. 271-276, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.08.012>

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle modern. 5 ed. São Paulo: Pearson, 2012.

PEREIRA, Fábio de Assis Ressel. Escoamento laminar de líquidos não-newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental. 2006. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

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

PERENCO. Projeto de Monitoramento Ambiental – PMA: Projeto de Monitoramento de Fluidos e Cascalhos de Perfuração. Campanha de Perfuração Exploratória BM-ES-37, 38. Bacia do Espírito Santo. 2012. Disponível em:

PETROBRAS. Exploração e Produção de Petróleo e Gás. [2016?]. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>>. Acesso em 30 mai. 2016.

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

RAJA, Vidya; CHASE, George G.; JONES, Bradley N.; GEEHAN, Tom. Continuum Model of a Shale Shaker. In: AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS FLUIDS TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2010, Houston. American Association of Drilling Engineers, Houston: [s.n.], 2010.

RAJA, Vidya; CHASE, George G.; JONES, Bradley N.; GEEHAN, Tom. Computational Modeling and Experiments on Shale Shaker Performance In: AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS FLUIDS TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2012, Houston. American Association of Drilling Engineers, Houston: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.aade.org/app/download/7242008487/AADE-12-FTCE-58+-+Raja.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

ROBINSON, Leon. Economic Consequence of Poor Solids Control. In: AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS FLUIDS TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2006, Houston. American Association of Drilling Engineers, Houston: [s.n.], 2006. Disponível em:

ROBINSON, Leon; STOCKS, Shannon. Shale Shaker Screen Designation. In: AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS FLUIDS TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2012, Houston. American Association of Drilling Engineers, Houston: [s.n.], 2012. Disponível em:

Robinson, L. H.; Heilhecker, J. K. Solids Control in Weighted Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Technology*, v. 27, p. 1141-1143, 1975.

<https://doi.org/10.2118/4644-PA>

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)

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

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

THOMAS, José Eduardo. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TRUMIC, Milan; MAGDALINOVIC, Nedeljko. New model of screening kinetics. Minerals Engineering. v.24, p. 42-49, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.013>

VIBROKRAFT. Peneira vibratória linear. Disponível em: <<http://www.vibrokraft.com.br/>

ZHAO, Lala; ZHAO, Yuemin; BAO, Chunyong; HOU, Qinfu; YU, Aibing. Laboratory-scale validation of a DEM model of screening processes with circular vibration. Powder Technology, v. 303, p. 269-277, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.034>

ZHU, Wei Bing; WU, Wa Ni; HAO, Xu; WANG, He Shun. A Novel Solution to Sieving Model for a Drilling Fluid Shale Shaker. Indonesian Journal of Electrical Engineering, v. 10, p. 1357-1363, out. 2012

APÊNDICE A: ESTUDOS PRELIMINARES

As Figuras A.1 e A.2 apresentam o comportamento da suspensão sobre a tela da peneira operando com uma força-g de 1,0 e 2,0 (menores que as avaliadas na obtenção dos modelos). Nota-se, principalmente para força-g de 1,0, que a tela está alagada com o fluido. Desse modo, o *overflow* da peneira conteria um teor elevado de fluido e a separação não aconteceria de maneira eficiente. Com o aumento da força-g, é possível perceber que a quantidade de fluido sobre a tela diminui de maneira considerável. Desse modo, para uma força-g de 3,0 (menor força-g utilizada nos experimentos), não há acúmulo de material líquido sobre a tela que dificulte o peneiramento, como se observa na Figura A.3.



Figura A.1 – Material sobre a tela da peneira ($G = 1,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

A Figura A.4 apresenta a relação entre a rotação mínima dos motovibradores e a força-g. Esse gráfico foi construído operando a peneira sem alimentação. Para obtenção desses dados, operou-se o equipamento por 50 segundos a diferentes rotações (500, 1000, 1500, 2000 e 2500) e os dados de força-g foram coletados durante esse intervalo. A Figura A.4 apresenta a força-g média do intervalo avaliado em relação à rotação dos motovibradores.



Figura A.2 – Material sobre a tela da peneira ($\Gamma = 2,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)



Figura A.3 – Material sobre a tela da peneira ($\Gamma = 3,0$, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

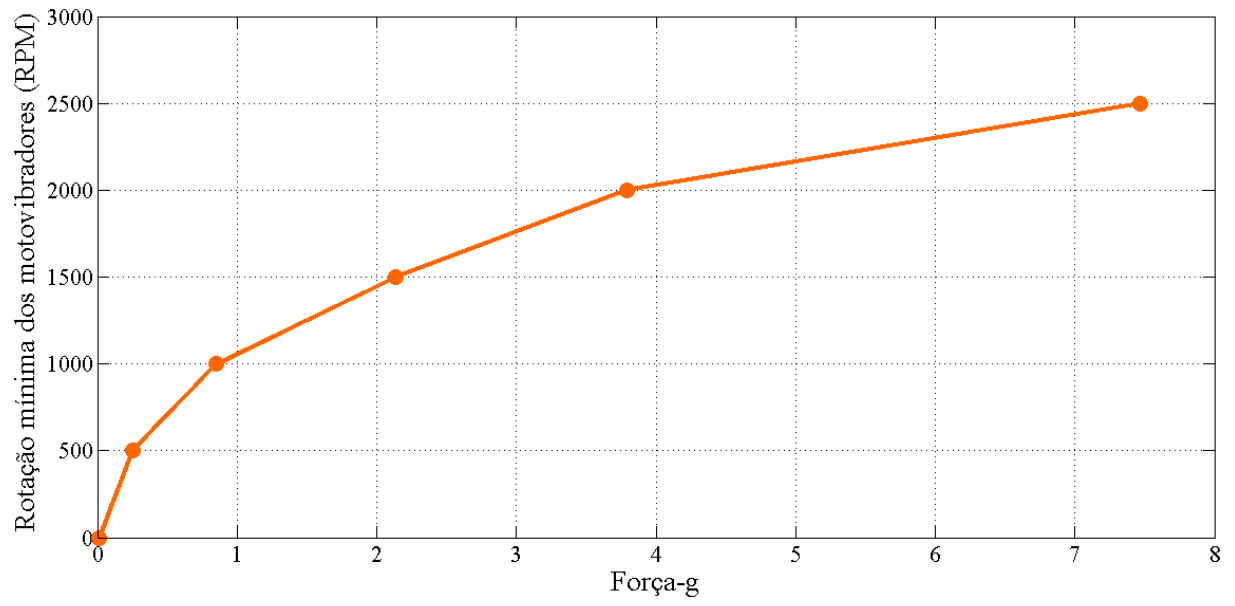


Figura A.4 – Relação entre a força-g e a rotação mínima dos motovibradores

APÊNDICE B: AJUSTE DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA UTILIZANDO O SOFTWARE EXCEL

Buscando descrever o modelo empírico em funções de transferências, ajustou-se os dados experimentais de uma perturbação degrau às respostas das funções de transferência de primeira ordem com tempo morto, semelhantemente às apresentadas na Tabela 2.4. Esse ajuste foi realizado utilizando o *software* Excel, buscando minimizar a soma quadrática dos resíduos (Equação 2.41).

A planilha desenvolvida é composta por quatro colunas: a primeira corresponde ao tempo da coleta de dados; a segunda apresenta a resposta experimental para cada tempo; a terceira coluna corresponde aos valores ajustados e está configurada conforme os parâmetros e o tempo; por fim, a quarta coluna corresponde ao resíduo quadrático do ajuste. Os parâmetros utilizados também foram especificados em células a parte das colunas anteriores. Na planilha desenvolvida, inseriu-se o valor inicial (X_0), final (X) e amplitude do degrau (M_{step}) e os parâmetros: ganho (K), constante de tempo (τ) e tempo morto (θ) da função de transferência. Inicialmente, as células dos parâmetros foram preenchidas com estimativas iniciais. A Figura A.1 apresenta essa planilha para um exemplo genérico com dados gerados por SEBORG et al. (2003).

Os números apresentados na primeira e segunda colunas correspondem aos dados experimentais. Entretanto, a terceira coluna é ajustada conforme a Figura A.2 e, para essa programação, é utilizada o seguinte código:

```
=SE(A2<$G$8; $B$2; $B$2+$G$6*$G$5*(1-EXP(-(A2-$G$8)/$G$7)))
```

O código anterior é referente a cédula C2. Para que todas as células dessa coluna apresentem o mesmo comportamento, é necessário clicar no canto inferior direito da célula e arrastar o cursor até o fim da coluna.

A quarta coluna é configurada conforme a segunda e terceira coluna, utilizando o seguinte comando:

```
=(B2-C2)^2
```

Semelhantemente a coluna anterior, esse comando é referente a cédula D2 e deve ser arrastado para todas as linhas da quarta coluna.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tempo	Y	Y'	Erro Quad				
2	0	20,00	20	0,00E+00				
3	1	20,65	20,522	1,65E-02		X₀	82	
4	2	21,79	21,908	1,39E-02		X	85	
5	3	22,83	22,947	1,36E-02		M_{step}	3	
6	4	23,68	23,724	1,98E-03		K	2,0155	
7	5	24,32	24,307	1,64E-04		τ	3,461	
8	6	24,79	24,744	2,14E-03		θ	0,6878	
9	7	25,13	25,071	3,52E-03				
10	8	25,38	25,316	4,15E-03				
11	9	25,55	25,499	2,60E-03		SQR	0,0681	
12	10	25,68	25,636	1,90E-03				
13	11	25,77	25,739	9,38E-04				
14	12	25,84	25,816	5,53E-04				
15	13	25,88	25,874	3,32E-05				
16	14	25,92	25,917	6,26E-06				
17	15	25,94	25,95	9,81E-05				
18	16	25,96	25,974	2,01E-04				
19	17	25,97	25,992	5,00E-04				
20	18	25,98	26,006	6,75E-04				
21	19	25,98	26,016	1,31E-03				
22	20	25,99	26,024	1,14E-03				
23	50	26	26,047	2,18E-03				
24								

Figura B.1 – Planilha utilizada no ajuste da função de transferência

Na realização do ajuste do modelo, é importante minimizar a soma de todos valores dispostos na quarta coluna, essa soma é apresentada na cédula G11 e é obtida a partir do seguinte comando:

=SOMA(D2:D23)

O ajuste foi realizado utilizando a função *Solver* do Excel, que se encontra na aba **Dados**. Ao clicar nessa função, uma janela é aberta e alguns campos devem ser preenchidos e selecionados. No campo **Definir Objetivo**, seleciona-se a célula referente à soma de quadrados

residual (SQR). Em seguida, seleciona-se a opção para minimizar esse valor. No campo **Alterando Células Variáveis**, seleciona-se as células referentes aos parâmetros (Figura A.3). Por fim, deve-se clicar na opção **Resolver** ao fim da janela aberta.

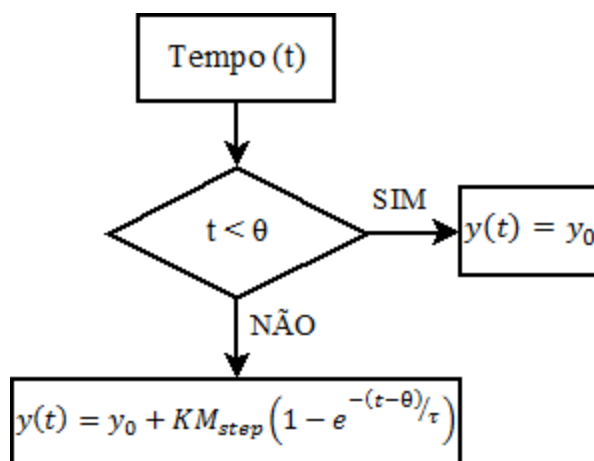


Figura B.2 – Fluxograma do comportamento da terceira coluna da planilha de ajuste

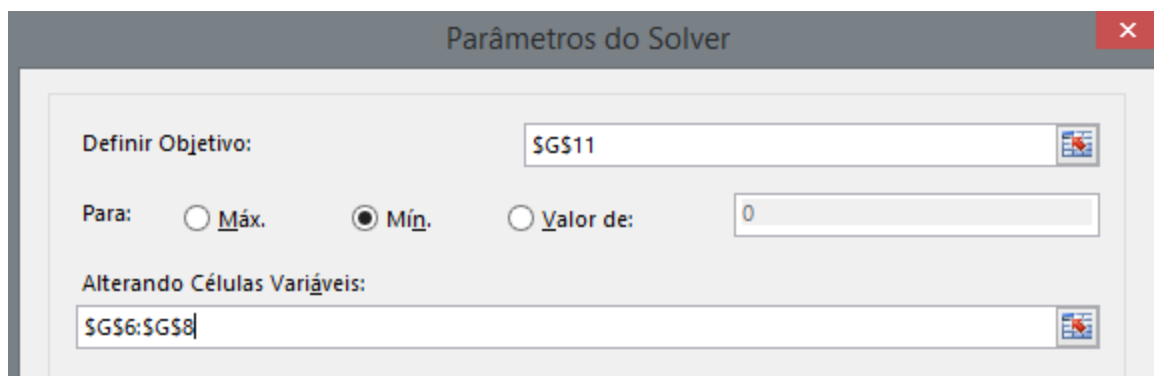


Figura B.3 – Janela do comando *Solver*

Desse modo, o *software* buscará os melhores valores dos parâmetros selecionados para minimizar o valor da soma quadrática de resíduos. Uma nova janela se abrirá para confirmar o final da otimização e os valores dos parâmetros aparecerão nas células referentes aos mesmos.

APÊNDICE C: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

C.1 PERTURBAÇÃO NA FORÇA-G

Tabela C.1 – Experimento 1 (Degrau na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
100 – 160	31,51	32,50	36,00
160 – 220	34,48	32,27	32,85
220 – 280	34,00	28,99	31,56
280 – 340	34,63	27,71	30,77
340 – 400	37,27	27,92	29,70
400 – 460	31,35	31,84	36,94
460 – 520	33,46	35,67	38,93
520 – 580	38,13	39,48	42,74
580 – 640	35,07	40,35	40,68

Tabela C.2 – Experimento 2 (Degrau na força-g, $C_V = 1,0\%$ e $F = 25$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
130 – 160	30,65	33,61	35,62
190 – 220	32,30	33,63	38,67
250 – 280	28,81	32,59	35,04
310 – 340	30,14	31,17	35,08
370 – 400	35,04	31,97	32,60
430 – 460	35,98	40,68	43,40
390 – 520	41,51	33,07	44,82
550 – 580	45,53	44,37	39,49
610 – 640	...	48,24	50,42

Tabela C.3 – Experimento 3 (Degrau na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 13$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	21,05	20,75	20,79
205 – 220	21,01	20,42	20,45
265 – 280	20,72	19,21	19,64
325 – 340	20,42	19,40	18,84
385 – 400	21,18	20,20	19,78
445 – 460	22,99	20,68	21,70
505 – 520	21,98	22,00	20,63
565 – 580	23,32	22,00	22,91
625 – 640	22,56	21,63	22,13

Tabela C.4 – Experimento 4 (Degrau na força-g, $C_V = 5,0\%$ e $F = 25$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	20,83	20,61	20,32
205 – 220	20,71	20,84	21,21
265 – 280	20,51	20,47	21,27
325 – 340	21,18	21,32	20,88
385 – 400	21,63	21,62	22,08
445 – 460	22,46	23,03	22,88
505 – 520	22,57	22,52	21,75
565 – 580	21,45	22,78	22,83
625 – 640	22,54	23,64	22,89

C.2 PERTURBAÇÃO NA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

Tabela C.5 – Experimento 5 (Degrau na concentração, $\Gamma = 3,00$ e $F = 13$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	24,59	23,10	23,93
205 – 220	23,62	22,60	23,43
265 – 280	23,09	22,46	23,02
325 – 340	23,47	23,59	23,15
385 – 400	24,20	24,14	23,32
445 – 460	19,39	19,40	19,28
505 – 520	20,51	19,87	19,78
565 – 580	19,96	19,85	20,20
625 – 640	20,59	19,89	19,74

Tabela C.6 – Experimento 6 (Degrau na concentração, $\Gamma = 3,00$ e $F = 25$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	25,05	24,03	23,30
205 – 220	26,45	23,51	23,28
265 – 280	25,82	23,69	23,90
325 – 340	25,80	39,69	23,07
385 – 400	23,74	23,68	24,03
445 – 460	20,38	19,97	20,72
505 – 520	19,90	19,61	19,62
565 – 580	19,67	20,08	20,11
625 – 640	20,35	20,12	20,58

Tabela C.7 – Experimento 7 (Degrau na concentração, $\Gamma = 5,00$ e $F = 13$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	25,00	27,66	24,31
205 – 220	25,78	25,11	24,55
265 – 280	24,99	24,33	23,62
325 – 340	23,55	21,86	23,68
385 – 400	25,95	25,03	24,16
445 – 460	20,98	19,94	19,71
505 – 520	20,26	19,83	19,72
565 – 580	19,80	19,66	19,73
625 – 640	21,17	19,40	19,97

Tabela C.8 – Experimento 8 (Degrau na concentração, $\Gamma = 5,00$ e $F = 25$ kg/min)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	25,97	23,76	23,05
205 – 220	23,06	23,70	22,77
265 – 280	23,79	24,37	24,44
325 – 340	23,39	24,46	25,15
385 – 400	23,51	23,25	23,05
445 – 460	19,42	19,57	18,75
505 – 520	19,23	19,17	19,57
565 – 580	19,97	20,18	19,83
625 – 640	21,64	20,04	20,83

C.3 PERTURBAÇÃO NA VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO

Tabela C.9 – Experimento 9 (Degrau na vazão, $\Gamma = 3,00$ e $C_V = 1,0\%$)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
100 – 160	55,25	75,52	37,61
160 – 220	55,50	59,04	37,38
220 – 280	48,88	61,28	40,88
280 – 340	43,63	56,88	42,79
340 – 400	44,88	55,41	43,66
400 – 460	46,50	61,71	38,57
460 – 520	48,53	32,67	31,34
520 – 580	44,42	40,22	36,49
580 – 640	44,64	37,47	33,72

Tabela C.10 – Experimento 10 (Degrau na vazão, $\Gamma = 3,00$ e $C_V = 5,0\%$)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	21,72	23,45	21,38
205 – 220	21,48	26,87	21,23
265 – 280	29,09	22,42	21,20
325 – 340	22,34	23,01	20,28
385 – 400	22,39	22,26	20,16
445 – 460	22,66	21,96	21,51
505 – 520	22,45	21,98	22,25
565 – 580	21,55	22,91	23,10
625 – 640	24,17	22,28	21,75

Tabela C.11 – Experimento 11 (Degrau na vazão, $\Gamma = 5,00$ e $C_V = 1,0\%$)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
100 – 160	35,20	37,22	42,17
160 – 220	40,00	40,90	43,36
220 – 280	42,23	45,18	46,11
280 – 340	45,68	46,40	45,82
340 – 400	45,91	51,19	51,09
400 – 460	34,54	41,18	57,02
460 – 520	35,21	40,25	43,27
520 – 580	31,75	43,07	49,90
580 – 640	37,86	40,58	47,78

Tabela C.12 – Experimento 12 (Degrau na vazão, $\Gamma = 5,00$ e $C_V = 5,0\%$)

Intervalo de tempo (s)	Teor de umidade dos sólidos retidos (%)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
145 – 160	21,89	21,94	20,76
205 – 220	21,53	21,25	21,26
265 – 280	21,97	20,77	21,01
325 – 340	21,61	21,11	21,74
385 – 400	21,88	21,77	21,19
445 – 460	21,52	21,91	25,56
505 – 520	22,28	22,77	22,47
565 – 580	23,39	23,24	23,22
625 – 640	23,35	22,48	22,70

APÊNDICE D: AJUSTE DOS MODELOS DINÂMICOS

Tabela D.1 – Parâmetros ajustados para o experimento 1

Corrida	K_M^1	τ_M^1	θ_M^1	Coefficiente de regressão
1	1,74	34,00	150,00	0,6166
2	6,61	130,24	75,81	0,9394
3	5,36	124,47	30,00	0,8553

Tabela D.2 – Parâmetros ajustados para o experimento 2

Corrida	K_M^1	τ_M^1	θ_M^1	Coefficiente de regressão
1	0,95	4,08	51,60	0,6505
2	0,82	4,12	51,78	0,8641
3	0,96	4,28	52,54	0,7944

Tabela D.3 – Parâmetros ajustados para o experimento 3

Corrida	K_M^1	τ_M^1	θ_M^1	Coefficiente de regressão
1	12,85	187,57	59,71	0,7121
2	5,60	72,00	45,00	0,8649
3	4,63	46,27	45,00	0,5951

Tabela D.4 – Parâmetros ajustados para o experimento 4

Corrida	K_M^1	τ_M^1	θ_M^1	Coefficiente de regressão
1	1,09	5,16	50,12	0,6903
2	0,72	4,20	48,98	0,8122
3	0,83	3,59	48,25	0,7937

Tabela D.5 – Parâmetros ajustados para o experimento 5

Corrida	K_M^2	τ_M^2	θ_M^2	Coefficiente de regressão
1	-1,79	3,18	59,83	0,9164
2	-1,59	3,29	52,51	0,8961
3	-1,82	2,29	52,52	0,9600

Tabela D.6 – Parâmetros ajustados para o experimento 6

Corrida	K_M^2	τ_M^2	θ_M^2	Coefficiente de regressão
1	-2,91	26,25	41,18	0,9778
2	-1,90	9,09	71,27	0,9854
3	-1,64	4,33	105,13	0,9279

Tabela D.7 – Parâmetros ajustados para o experimento 7

Corrida	K_M^2	τ_M^2	θ_M^2	Coefficiente de regressão
1	-2,21	4,65	102,99	0,9092
2	-2,55	4,33	100,45	0,9920
3	-2,13	2,37	58,55	0,9958

Tabela D.8 – Parâmetros ajustados para o experimento 8

Corrida	K_M^2	τ_M^2	θ_M^2	Coefficiente de regressão
1	-1,99	2,28	58,53	0,7027
2	-2,16	2,28	58,53	0,8754
3	-2,05	3,53	51,74	0,7987

Tabela D.9 – Parâmetros ajustados para o experimento 9

Corrida	K_M^3	τ_M^3	θ_M^3	Coefficiente de regressão
1	-0,42	0,45	21,65	0,6215
2	-2,20	2,44	94,43	0,8515
3	-0,48	4,08	89,15	0,6732

Tabela D.10 – Parâmetros ajustados para o experimento 10

Corrida	K_M^3	τ_M^3	θ_M^3	Coefficiente de regressão
1	-0,08	0,55	39,91	0,6402
2	-0,14	0,28	45,98	0,6761
3	0,11	21,60	103,10	0,7301

Tabela D.11 – Parâmetros ajustados para o experimento 11

Corrida	K_M^3	τ_M^3	θ_M^3	Coefficiente de regressão
1	-0,49	1,14	59,94	0,6131
2	-0,09	1,86	99,83	0,9244
3	0,45	1,37	0,00	0,5166

Tabela D.12 – Parâmetros ajustados para o experimento 12

Corrida	K_M^3	τ_M^3	θ_M^3	Coefficiente de regressão
1	0,14	5,81	170,20	0,9752
2	0,13	19,56	102,37	0,6343
3	0,19	2,09	67,37	0,4109