



## **PROPOSTA DE UMA MALHA DE CONTROLE DE UMIDADE DO SÓLIDO RETIDO EM PENEIRA VIBRATÓRIA INDUSTRIAL**

WAGNER V. PEREIRA JR.<sup>1</sup>, VINICIUS L. SOUSA<sup>1</sup>, RAFAEL Y. M. BARBOSA<sup>1</sup>, RICARDO A. MALAGONI<sup>1</sup>, CLAUDIO GARCIA<sup>2</sup>, RUBENS GEDRAITE<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Laboratório de Automação e Controle  
\*e-mail: rgedraite@ufu.br

**RESUMO** – Neste trabalho foi avaliado o processo de peneiramento vibratório empregando uma peneira vibratória em escala industrial, considerando como o teor de umidade se comporta frente ao efeito de variáveis independentes em condições estacionárias e também o efeito do Fator-G em regimes transientes. Foi utilizada uma suspensão de areia, água e goma xantana (com propriedades semelhantes às de um fluido de perfuração real, que apresenta tixotropia). Foi feito um planejamento composto central com duas réplicas no ponto central, totalizando 16 experimentos, tendo sido identificado um modelo que representa o comportamento do teor de umidade em estado estacionário frente às variáveis independentes: Fator-G, inclinação de tela e vazão de alimentação. O teor de umidade se mostrou diretamente proporcional às variáveis Fator-G e vazão de alimentação, e inversamente proporcional à variável inclinação. O modelo estático identificado, juntamente com um modelo dinâmico do Fator-G foi utilizado para simular o efeito da variável Fator-G, em estado estacionário, no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™, adotando uma inclinação correspondente à posição 2 (5°) e vazão de 76,5 kg/h. A estratégia de controle proposta neste trabalho foi simulada com sucesso e permitiu estudar o ajuste dos parâmetros dos controladores para um melhor desempenho do processo de deságue.

### **INTRODUÇÃO**

Na perfuração de poços de petróleo, o descarte dos sólidos resultantes do processo é um assunto que recebe atenção especial, devido ao impacto ambiental associado. Este sólido arrasta consigo fluido de perfuração residual, o qual é extremamente tóxico para o ecossistema marítimo.

O descarte do material sólido só é permitido após a comprovação de que o teor de fluido de perfuração residual impregnado nele seja inferior a 7%. A eliminação do líquido residual é realizada nas próprias sondas de perfuração, na unidade de tratamento do fluido de perfuração, também denominada de unidade

de extração de sólidos. Ela é formada por diversos equipamentos, a saber: *i*)- peneiras vibratórias. *ii*)- *mud cleaners*; *iii*)- baterias de hidrociclone e *iv*)- centrífugas decantadoras.

As peneiras vibratórias são o primeiro equipamento da unidade de extração de sólidos a receber o fluido de perfuração, que retorna do poço sendo perfurado. É nelas que ocorre o primeiro deságue do material sólido granular a ser removido (ASME, 2005; AADE, 1999).

O conhecimento do comportamento dos parâmetros operacionais que afetam diretamente o funcionamento da peneira vibratória vem sendo sistematicamente estudado, buscando quantificar a influência destes parâmetros sobre a operação de deságue (Guerreiro, 2015; Freitas, 2017; Barbosa, 2018;

Menezes, 2018; Barbosa, 2021. Pereira Júnior, 2021).

Poucos trabalhos disponíveis na literatura abordam a questão do controle automático aplicado à operação de deságue executada na peneira vibratória (Scott, 2006; Dorry, 2010). Provavelmente, a principal dificuldade reside na determinação precisa, em tempo real, do teor de umidade residual presente no material sólido retido. De fato, a medição da umidade na saída da peneira vibratória industrial apresenta muita variabilidade, devido principalmente à localização precisa do ponto de medição.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi propor um modelo baseado em superfícies de resposta obtidas a partir de equações de regressão multivariada, para estimar o teor de umidade residual do sólido retido, com base no conhecimento dos parâmetros operacionais que mais influem em seu valor.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados na unidade experimental esquematizada na Figura 1, localizada no Laboratório Prof. Carlos Henrique Ataíde da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, onde foi projetada e construída uma estrutura de aço carbono com 3 m de altura e piso com área de 15 m<sup>2</sup> para a realização dos experimentos.

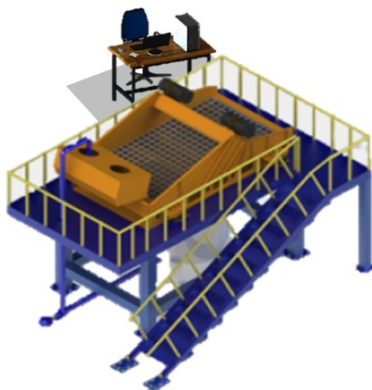


Figura 1: Unidade experimental utilizada.

Na parte superior da bancada encontra-se montada a peneira vibratória Mongoose pro Shaker, fabricada pela empresa Schlumberger, a qual é apresentada na Figura 2, com área de peneiramento de 2,73 m<sup>2</sup>, equipada com dois

motores vibratórios de 2,5 cv cada e com capacidade para rodar a 1.800 rpm. Tal equipamento pode operar em duas condições de vibração, sendo uma de menor intensidade (*Normal*) – capaz de aplicar um valor de fator-G igual a 6,5 – e outra, de maior intensidade (*Capacity*) – capaz de aplicar um valor de fator-G igual a 7,5 – de acordo com o informado pelo fabricante. Montado logo abaixo da peneira, encontra-se um tanque de mistura, com capacidade de 3.000 L, o qual está acoplado a uma bomba de lama, modelo 4/3C - AH, fabricada pela empresa Weir e equipada com motor WEG de 15 cv. A tubulação para o transporte da suspensão é de aço carbono e possui diâmetro nominal de 3 in.



Figura 2: Peneira vibratória (malha 200 mesh).

Para a realização dos experimentos, foi preparada uma suspensão reologia similar à utilizada por Barbosa (2018), composta de areia comum – de tamanho médio – tipicamente empregada em construção civil, água e goma xantana, de modo a formar uma solução aquosa com concentração de goma xantana igual a 0,1% em massa. A concentração volumétrica de sólidos da suspensão foi de 2%. Para isso, foram utilizados 44 kg de areia seca (densidade aproximada de 1.450 kg/m<sup>3</sup>), 1,5 m<sup>3</sup> de água e 1,5 kg de goma xantana. A goma xantana foi empregada para emular a viscosidade de um fluido de perfuração. O preparo da parte líquida da suspensão foi feito 24 h antes da realização dos experimentos, tempo necessário para a hidratação completa da goma xantana.

### Sistema de Controle do Fator-G

O sistema de controle automático da peneira vibratória está baseado em um medidor piezoelétrico de vibração – da marca PCB Piezotronics, modelo 646B00 – apresentado na Figura 3, responsável por enviar um sinal de 4 a 20 mAcc, correspondente à vibração aplicada

às telas de separação da peneira vibratória, para uma placa de aquisição de dados modelo NI USB-6008, fornecida pela empresa National Instruments™, mostrada na Figura 4. Antes de chegar à placa, o sinal transmitido é convertido para tensão na faixa de 1 a 5 Vcc. A placa de aquisição de dados possui taxa de amostragem de milissegundos e trabalha acoplada a um computador, que realiza a função de interface homem-máquina, usando o aplicativo LabView™. Como a taxa de amostragem é muito elevada – da ordem de milissegundos – foi feito o cálculo do valor médio correspondente aos dados coletados, apresentando o resultado na taxa de amostragem de 1 ponto/segundo. No aplicativo LabView™ o sinal recebido do sensor piezoelétrico é convertido na variável adimensional intitulada fator-G, considerando uma faixa de medição ajustada entre 0 e 5 g.



Figura 3: Sensor piezoelétrico utilizado.



Figura 4: Placa NI USB-6008.

A configuração do controlador do Fator-G mais simples possível de ser utilizada em uma peneira vibratória é vista na Figura 5. Ele foi configurado e parametrizado no aplicativo LabView™, sendo possível selecionar tanto um valor predeterminado de rotação para o acionamento dos motores vibratórios como selecionar um valor desejado de *set point* do fator-G. Ao selecionar um valor predeterminado de rotação para o acionamento dos motores vibratórios, o aplicativo gera um

sinal equivalente à faixa de 0 a 5 g, que é enviado pela placa de aquisição de dados ao inversor de frequência modelo CFW700, fornecido pela empresa WEG, que ajusta a rotação dos motores vibratórios, conforme definido pelo usuário.

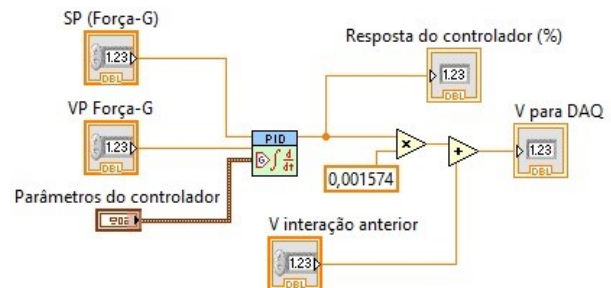


Figura 5: Controlador no LabView™.

Apesar de o controlador configurado poder atuar com o emprego dos modos de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID), foi empregado apenas o modo de controle *P* (proporcional) dado que as mudanças de carga durante os experimentos foram pouco frequentes e, portanto, o modo de controle *I* (integral) não é requerido (Dorry, 2010; Garcia, 2017). O ganho  $K_C$  do controlador *P* foi ajustado, por tentativa e erro, em  $K_C = 124,23 \text{ rpm}^{-1}$ .

### Testes de Medição de Umidade Residual

Para medição da umidade do material sólido retido na peneira, foram realizados diversos experimentos, que consistiram em retirar amostras do material e acondicioná-las em béqueres, que tinham a massa previamente conhecida. Ao término dos experimentos realizados em um dia de testes, os béqueres contendo as amostras de sólidos úmidos eram novamente pesados e, na sequência, colocados em estufa – para secagem – mantida a  $105^\circ\text{C}$  por 24 h. Ao final do período de secagem, os béqueres eram novamente pesados, sendo o teor de umidade residual determinado pela diferença entre as massas anteriormente determinadas e expresso na forma de fração mássica em base úmida.

### Identificação do Modelo do Processo

Com o objetivo de identificar o comportamento do teor de umidade residual presente no sólido retido, foi realizado um planejamento composto central (PCC) com

duas réplicas no centro. Esse delineamento experimental foi escolhido devido ao fato de ser suficientemente preciso para a finalidade e, também, por fornecer as informações necessárias e suficientes para quantificar a não linearidade das variáveis em relação ao processo e a realização do ajuste de superfícies de resposta (Myers *et al.*, 2016; Guerreiro; Gedraite & Ataíde, 2016).

As variáveis independentes utilizadas foram:

- Fator-G imposto à peneira ( $X_1$ ): adimensional, definido como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional da terra, sendo dependente da frequência e amplitude de vibração da peneira.
- Inclinação da tela da peneira ( $X_2$ ): é o nível de inclinação formado entre a tela da peneira e o plano horizontal. O sistema para alteração dos níveis de inclinação pode ser observado Figura 6.
- Frequência da bomba ( $X_3$ ): Como a bancada experimental não possuía um medidor de vazão, a variável controlada foi a frequência da bomba mostrada no inversor de frequência modelo WEG - CFW700, apresentado na Figura 7.

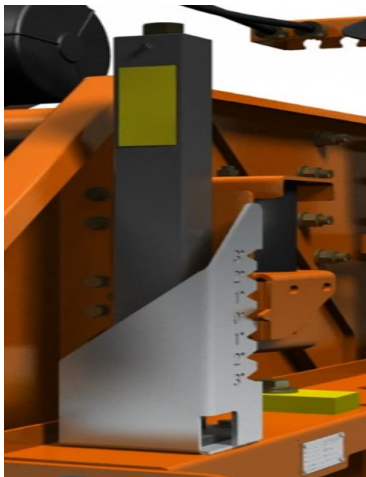


Figura 6: Sistema para alteração da inclinação.



Figura 7: Inversor para ajuste da vazão.

A codificação utilizada pelo PCC, na realização dos experimentos, para as variáveis independentes é apresentada na Tabela 1.

Para obter o valor da vazão mássica, foi determinada experimentalmente a curva da bomba, relacionando o sinal indicado no inversor de frequência acoplado à bomba com as respectivas vazões mássicas, medidas em triplicata, com o auxílio de uma balança eletrônica de precisão 5 kg x 1 g, da marca Marte Científica. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2 e na Figura 8.

Tabela 1: Variáveis e níveis do PCC.

Nível	Fator-G $X_1$	Inclinação $X_2$	Frequência $X_3$
-1,2872	1	1,4	8,7
-1	1,3	1,5	9
0	2,3	2,0	10
+1	3,3	2,5	11
+1,2872	3,6	2,7	11,3

Tabela 2: Frequência versus vazão mássica.

Nível do PCC	Frequência (Hz)	Vazão mássica (kg/min)
-1,2872	8,7	54,0
-1	9	55,9
0	10	76,5
+1	11	229,1
+1,2872	11,3	300,0



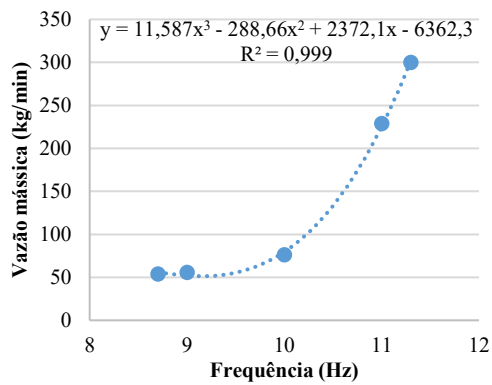


Figura 8: Curva vazão-frequência da bomba.

Ao todo foram realizados 16 experimentos, sendo que para cada experimento foram coletadas 3 amostras do material retido na tela. O planejamento completo dos experimentos é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz do PCC utilizado

Experimento	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	-1,2872	0	0
12	1,2872	0	0
13	0	-1,2872	0
14	0	1,2872	0
15	0	0	-1,2872
16	0	0	1,2872

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Identificação do Modelo de Umidade Residual

Os valores médios do teor de umidade residual ( $M$ ) determinados experimentalmente, em resposta à influência dos parâmetros operacionais referentes à peneira vibratória industrial, são apresentados na Tabela 4. Importante destacar que inicialmente a areia foi submetida à secagem e isenta de umidade.

Tabela 4: Umidade ( $M$ ) experimental.

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

A análise estatística dos resultados experimentais foi feita empregando o aplicativo STATISTICA 7™, visando avaliar quais variáveis são significativas ao processo. O intervalo de confiança adotado no tratamento estatístico foi de 85%, devido à incerteza apresentada pelos valores de umidade residual.

Os efeitos lineares, quadráticos e de interações entre duas variáveis inicialmente foram avaliados pelo Gráfico de Pareto, conforme exibido na Figura 9a, posteriormente, os efeitos menos significativos foram eliminados um a um, até que se obteve o gráfico ilustrado na Figura 9b.

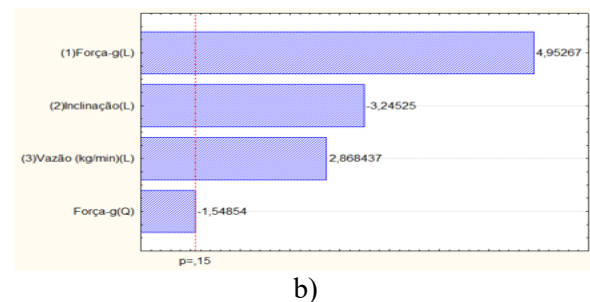
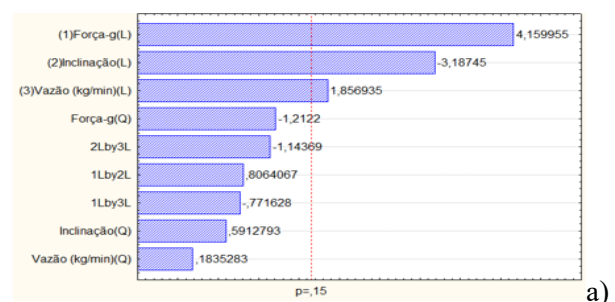


Figura 9: Gráficos de Pareto para determinação dos efeitos significativos

Com isso, os parâmetros do modelo foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Figura 10, extraída aplicativo STATISTICA 7™.

Regr. Coefficients; Var.: Umidade Residual; R-sqr=,80551; Adj. 73479 (Experimentos dia 09-11) 3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0001077 DV: Umidade Residual						
Factor	Regressn Coeff	Std Err	t(11)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,194213	0,024748	7,84777	0,000008	0,139744	0,248682
(1)Força-g(L)	0,046424	0,020375	2,27845	0,043655	0,001578	0,091269
Força-g(Q)	-0,006780	0,004379	-1,54854	0,149766	-0,016418	0,002857
(2)Inclinação(L)	-0,019496	0,006007	-3,24525	0,007801	-0,032718	-0,006273
(3)Vazão (kg/min)(L)	0,000089	0,000031	2,86844	0,015284	0,000021	0,000157

Figura 10: Determinação dos parâmetros do modelo pelo aplicativo STATISTICA 7™.

O modelo ajustado de segunda ordem é apresentado na Equação (1), com o coeficiente  $R^2 = 0,80551$ .

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

As superfícies de resposta correspondentes ao modelo obtido são exibidas nas Figuras 11, 12 e 13.

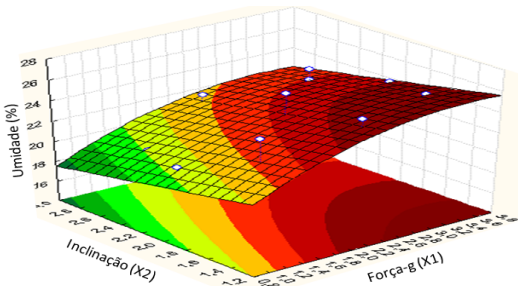


Figura 11: Umidade em função do Fator-G ( $X_1$ ) e da inclinação ( $X_2$ ).

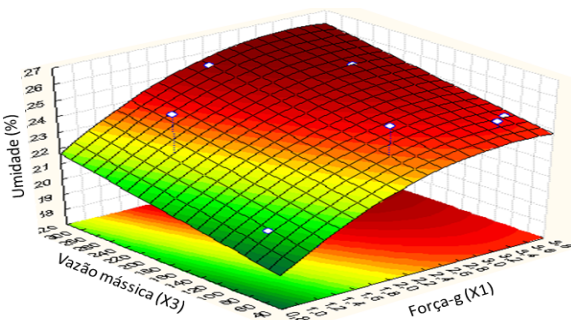


Figura 12: Umidade em função do Fator-G ( $X_1$ ) e da vazão mássica ( $X_3$ ).

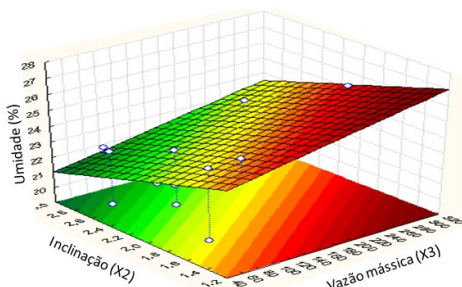


Figura 13: Umidade em função da inclinação ( $X_2$ ) e da vazão mássica ( $X_3$ ).

Analisando o modelo encontrado em conjunto com as superfícies de resposta obtidas, nota-se que o Fator-G ( $X_1$ ) possui um efeito linear predominante e diretamente proporcional sobre o teor de umidade dos sólidos retidos. Além disso, apresentar um efeito quadrático inversamente proporcional a esta variável, existe um ponto ótimo de operação, que se encontra em  $X_1 = 3,4236$ . Já as variáveis inclinação ( $X_2$ ) e vazão mássica ( $X_3$ ), possuem efeitos lineares predominantes, sendo que quanto maior a inclinação, menor o teor de umidade nos sólidos retidos e quanto maior a vazão mássica, maior o teor de umidade nos sólidos retidos. Deve ser ressaltado o fato de que a influência do parâmetro vazão não foi considerado relevante, em virtude de os valores empregados nos experimentos terem sido mantidos abaixo daqueles considerados como máximos permitidos para garantir que a capacidade operacional da peneira estudada não fosse ultrapassada.

Durante os experimentos, observou-se que ao operar a peneira vibratória com valores maiores de Fator-G, os sólidos eram transportados com maior velocidade. Este fato poderia explicar a proporcionalidade entre Fator-G e teor de umidade residual. Além disso, em velocidades menores, ou seja, com menores valores de Fator-G, foi observada a formação de conglomerados, conforme se pode observar na Figura 14, os quais apresentaram a tendência de se desfazerem ao aumentar a aceleração dos motores vibratórios.



Figura 14: Aspecto dos sólidos retidos ao operar com baixos valores de Fator-G.

A partir das análises realizadas anteriormente com base no modelo obtido a partir dos resultados experimentais, foi possível

propor o melhor ponto de operação da peneira vibratória em relação às variáveis estudadas.

O menor teor de umidade residual foi observado no experimento 03, cujo valor foi de 19,97% para os valores de Fator-G de 1,3, inclinação de 2,5° e vazão de alimentação de 55,9 kg/min. O funcionamento do equipamento nestes níveis das variáveis estudadas proporciona um sólido com menor teor de líquido e, conseqüentemente, uma maior recuperação de fluido.

Por outro lado, o maior valor de umidade residual foi observado no experimento 16, cujo valor foi de 25,64%, para Fator-G de 2,3, inclinação de 2,0° e vazão de alimentação de 300,0 kg/min. Não é recomendado operar a peneira vibratória nessas condições, pois o teor de umidade dos sólidos retidos é quase 30% maior do que o obtido no ponto ótimo de operação.

Também foi observada a existência de uma vazão máxima de operação da peneira, caracterizada pela acumulação excessiva de material em tela e pelo avanço da posição da interface entre a suspensão e o sólido desaguado, conhecida na prática como “região de piscina” a ponto de ocorrer o transbordamento da suspensão na calha de coleta do sólido desaguado.

Ao realizar o planejamento experimental, foi feita uma análise prévia desta condição, visto que uma operação com inclinação menor que 1° e Fator-G maior que 3,5, a vazão máxima de operação deve ser mantida em valor menor do que 300 kg/min.

### Identificação do Modelo do Fator-G

O comportamento do Fator-G medido na peneira vibratória industrial foi modelado considerando a relação entre a frequência de operação dos motores vibratórios com o Fator-G aplicado ao material sólido granular sobre a tela de separação da peneira. Para a identificação do modelo, foi realizada a análise da resposta dinâmica do Fator-G imposto na peneira ao se aplicar um degrau na frequência dos referidos motores. Foi estudado o trecho inicial do transiente de variação do Fator-G, correspondente à aceleração imposta ao movimento oscilatório aplicado sobre a tela, conforme a metodologia adotada por Vargas *et al.* (2015). Foi identificada a função de

transferência aproximada do processo em questão, que relaciona o valor do Fator-G com o valor da frequência de vibração dos motores vibratórios, como mostrado na Equação (2).

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

O modelo identificado foi validado por comparação com os resultados experimentais, sendo o comportamento temporal apresentado na Figura 15.

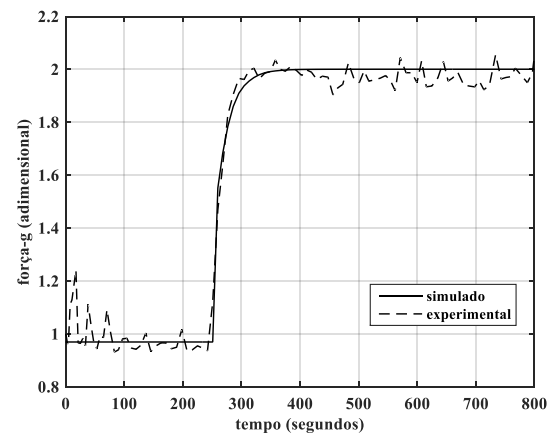


Figura 15: Comportamento do Fator-G.

### Proposta de Modelo Aproximado do Teor de Umidade

O modelo dinâmico proposto para representar o comportamento do teor de umidade em função das condições de operação da peneira vibratória industrial, foi o resultado da associação do modelo estático identificado do teor de umidade residual apresentado na Equação (1) com o modelo dinâmico identificado do comportamento do fator-G apresentado na Equação (2).

Esta maneira de representar o modelo que estima o teor de umidade residual do material sólido retido pode ser considerada adequada para emprego em escala industrial, pois o Fator-G é o parâmetro mais relevante no fenômeno, sendo também o mais facilmente modificado na prática. Portanto, é o parâmetro que mais afeta o teor de umidade do sólido retido. O diagrama de blocos correspondente é apresentado na Figura 16.

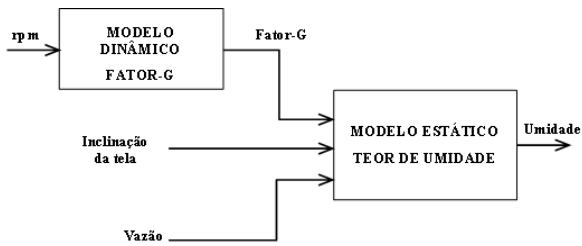


Figura 16: Diagrama de blocos do modelo aproximado do teor de umidade residual.

### Estratégia de Controle Baseada no Teor de Umidade

A estratégia de controle proposta é baseada no modelo dinâmico do Fator-G associado com o modelo aproximado (estático) do teor de umidade residual. O tempo de resposta do modelo assim obtido foi coerente com o tempo de resposta que seria fornecido por um sensor capacitivo, tipicamente usado para medir umidade de solos. Um sensor de umidade de solos apresenta tempo de resposta da ordem de 3 s (Pereira Júnior, 2021). Deste modo, é válido considerar que a resposta do sensor de umidade utilizado é praticamente instantânea.

O diagrama da estratégia de controle apresentado na Figura 17 mostra a malha de controle do Fator-G acoplada à malha de controle do teor de umidade residual do material sólido retido.

A estratégia de controle definida no diagrama de simulação foi testada para os valores do Fator-G e do teor de umidade residual obtidos nos experimentos realizados na peneira vibratória. Para a validação utilizou-se vazão igual a 76,5 kg/h e ângulo de inclinação das telas de separação fixado em 5° (posição 2), devido ao fato que para estes valores foi obtido o menor erro entre o valor experimental e o valor estimado com o modelo da umidade.

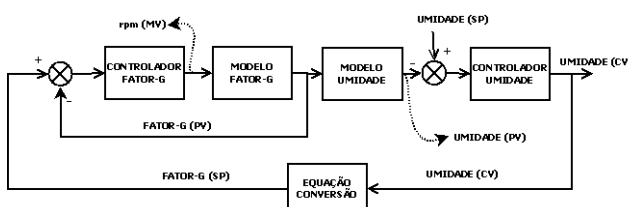


Figura 17: Diagrama da estratégia de controle.

O **primeiro caso simulado** considerou a aplicação de variações do tipo degrau no *set point* do teor de umidade, variando inicialmente

de 20% para 24% no instante  $t = 250$  s e de 24% para 22% no instante  $t = 500$  s. Foi considerado o início da simulação partindo da condição inicial de umidade medida durante os testes realizados com a peneira, que consideraram o valor do Fator-G igual a 0,9496. Realizando a simulação com o modelo da estratégia de controle proposta neste trabalho, obteve-se um comportamento coerente com o verificado experimentalmente para os valores finais, correspondentes aos estados estacionários das condições consideradas. Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os resultados obtidos no primeiro teste.

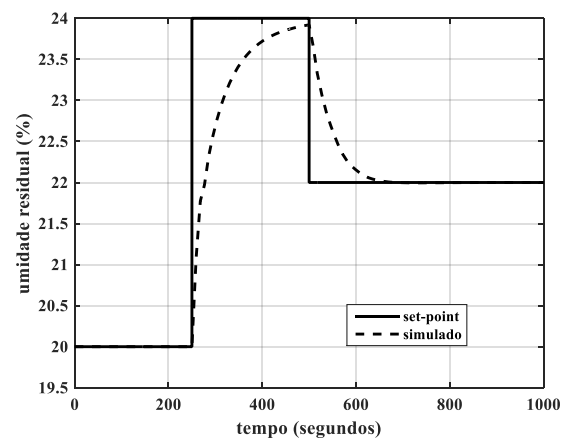


Figura 18: Resposta do teor de umidade residual a degraus no valor do *set point* do controlador de umidade.

Os controladores usados são do tipo proporcional e integral, baseados no algoritmo de controle ideal proposto no ambiente Simulink™ do aplicativo Matlab™, sendo que o controlador do teor de umidade residual foi configurado com limitação no valor do seu sinal de saída, variando entre 0,9496 (menor valor de Fator-G possível de se manter a peneira em condição estável) e 4,0 (valor próximo ao limite máximo testado nos experimentos). É importante destacar que o controlador do teor de umidade residual é que define remotamente o valor do *set point* do controlador do Fator-G.

Era esperado o aumento do valor da Fator-G em resposta ao degrau de aumento do valor do *set point* do controlador do teor de umidade residual, pois o Fator-G é responsável por promover o aumento do valor da velocidade com a qual o material sólido retido é transportado sobre a tela, acarretando assim menor deságue (Barbosa *et al*, 2019).



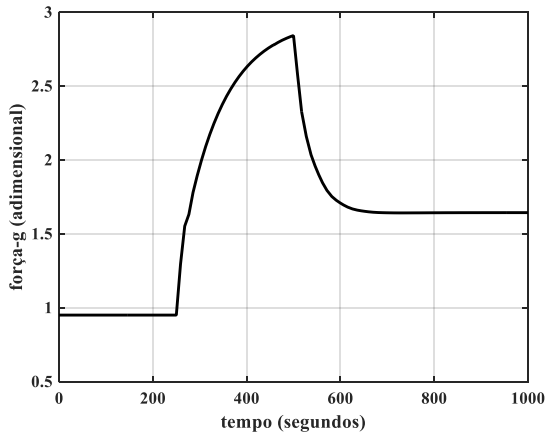


Figura 19: Resposta do Fator-G aos degraus no valor do *set point* do controlador de umidade.

O **segundo caso simulado** contemplou a aplicação de uma variação do tipo degrau no valor do Fator-G, com amplitude igual a +0,1 em seu valor, no instante  $t = 0$  s. A perturbação postulada emula uma variação na condição de alimentação da peneira, a qual provocaria a alteração estudada nesta simulação. Foi considerado o início da simulação partindo da condição inicial da peneira com o valor do Fator-G igual a 0,9496 e valor inicial de umidade igual a 20%. Realizando a simulação com o modelo da estratégia de controle proposto neste trabalho, obteve-se como resposta à perturbação aplicada o valor de umidade final de 20,32%, com o valor do Fator-G variando de 0,9496 até 1,047. Na Figura 20 é apresentado o resultado obtido no segundo teste.

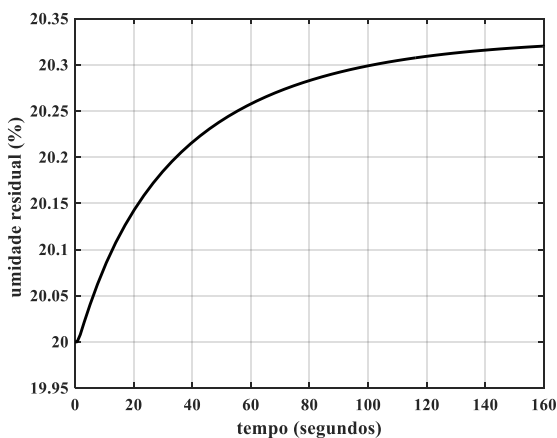


Figura 20: Teor de umidade residual em resposta a degrau de amplitude 0,1 no Fator-G.

### Ajuste dos Parâmetros de Sintonia dos Controladores

O ajuste dos parâmetros de sintonia dos controladores foi feito de maneira heurística,

observando como a resposta do modelo em estudo se comporta. Foi tomado como base o valor do ganho  $K_C$  utilizado no controlador empregado por Guerreiro (2015). A resposta do controlador usado por esse autor gerava maior oscilação no valor da variável controlada, desde o início da resposta ao degrau imposto no valor do *set point* do controlador. Considerando que o controlador do Fator-G é aquele que afeta de modo mais significativo o desempenho do estimador de umidade proposto neste trabalho, decidiu-se melhorar a sintonia daquele controlador, utilizando o método da Síntese Direta apresentado em Seborg *et al.* (2019). Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 21. É importante ressaltar que a resposta da variável controlada apresentou comportamento suave e contínuo em torno do ponto estudado.

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

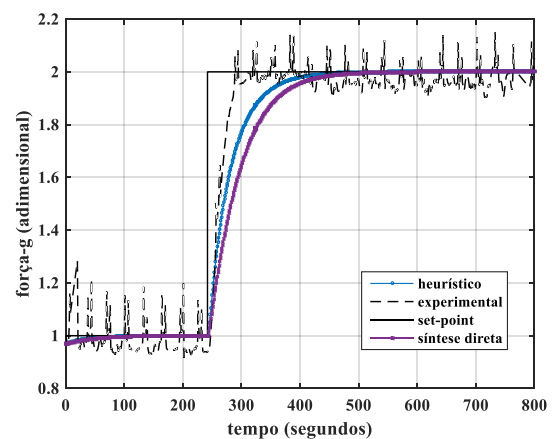


Figura 21: Resposta do controlador do Fator-G a degrau aplicado no *set point*.

Para o controlador de umidade, o ajuste dos parâmetros de sintonia foi realizado somente de maneira heurística, considerando que o mesmo ainda está em fase de estudos e deverá ser implementado na estratégia de controle da peneira vibratória em escala industrial em futuro próximo.

O valor dos parâmetros de sintonia dos controladores, dos respectivos sobressinais e dos tempos de acomodação correspondentes ao degrau aplicado no valor do *set point* do controlador do Fator-G são vistos na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de Controle.

Controlador Pl	$K_C$ ( $rpm^{-1}$ )	$\tau_I$ (min)	Sobres sinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Fator-G	209,63	0,04	9,93	167
Umidade	0,59	0,02	0,16	92

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados, foi possível avaliar o comportamento dinâmico e simular o comportamento em estado estacionário do teor de umidade residual dos sólidos retidos em uma peneira vibratória em escala industrial.

Com base no planejamento composto central (PCC) obteve-se relações entre o teor de umidade dos sólidos retidos e o Fator-G, a inclinação da tela de peneiramento e a vazão de alimentação.

O modelo estático identificado juntamente com o modelo dinâmico do Fator-G, ambos obtidos experimentalmente, foram usados para simular o efeito do Fator-G em estado estacionário no ambiente Simulink™ do Matlab™, adotando uma inclinação de 5° (posição 2) e vazão de 76,5 kg/h. Com isso, foi definida uma estratégia de controle do Fator-G baseada no valor desejado (*set point*) de umidade residual do sólido retido e realizar, com sucesso, a correspondente simulação computacional, que se mostrou adequada e coerente para o estudo proposto, mostrando coerência entre os resultados simulados e aqueles obtidos experimentalmente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo CNPq e pela FAPEMIG por meio das bolsas de complementação educacional e à Petrobras, por meio do Termo de Cooperação 0050.0118740.21.9.

## NOMENCLATURA

$Fator - G$	=	Relação adim. aceler.
$K_C$	=	Ganho do controlador
$M$	=	Teor de umidade (%)
$rpm$	=	Rotação (rpm)
$s$	=	Var. auxiliar ( $s = j \cdot \omega$ )
$\tau_I$	=	Tempo integral (min/rep)
$x$	=	Frequência (Hz)
$X_1$	=	Var. codific. Fator-G
$X_2$	=	Var. codific. Inclinação
$X_3$	=	Var. codific. Frequência
$y$	=	Vazão mássica (kg/min)

## REFERÊNCIAS

- AADE. Shale Shakers and Drilling Fluid Systems. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.
- ASME (2005), AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Drilling Fluid Processing Handbook, Gulf Professional Publishing, Burlington.
- BARBOSA R. Y. M. (2021), Determinação de Parâmetros Ótimos no Processo de Deságue em Peneiras Vibratórias. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 71p. (dissertação de mestrado).
- BARBOSA, V. P. (2018), Avaliação de Fatores Operacionais em Processo de Peneiramento Vibratório aplicado à Separação Sólido-Líquido com o Auxílio de Técnicas de Análise de Imagem. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 99p. (dissertação de mestrado).
- BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; FRIAÇA, F. G. PEREIRA JUNIOR, W.V.; GEDRAITE, R; ATAIDE, C. H. (2019). Concepção de unidade experimental e avaliação do teor de

- umidade residual para peneira vibratória industrial. Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Belém -PA.
- DORRY, K. E. (2010), Effect of Constant-G Control on Shale Shaker Performance, Proceedings of American Association of Drilling Engineers Fluids Conference and Exhibition, Houston - Texas.
- FREITAS, M. S. (2017), Avaliação do Comportamento Dinâmico do Peneiramento Vibratório Utilizando Modelos Identificados. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 99p. (dissertação de mestrado).
- GARCIA, C. (2017), Controle de Processos Industriais – Vol. 1, 1ª ed., Blucher, São Paulo.
- GUERREIRO, F. S.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H. (2016), Residual Moisture Content and Separation Efficiency Optimization in Pilot-Scale Vibrating Screen, Powder Technology, Vol. 287, p.301-307.
- GUERREIRO, F. S. (2015), 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. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 99p. (dissertação de mestrado).
- MENEZES, A. L. (2018), Contribuição ao Estudo de Peneiramento Vibratório Operando sob Pressão Reduzida. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 107p. (dissertação de mestrado).
- MYERS, R. H; MONTGOMERY, D. C; ANDERSON-COOK, C. (2016), Response Surface Methodology, John Willey & Sons, New Jersey.
- PEREIRA JUNIOR, W. V. (2021) Implementação de Malha de Controle de Força-G acoplada à Malha de Controle de Umidade em Peneira Vibratória. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 72p. (dissertação de mestrado).
- SCOTT, E. L. (2006), Automatic Shaker Control. Proceedings of IADC/SPE Drilling Conference, Miami - Florida.
- SEBORG, D. E; EDGAR, T. F; MELLICHAMP, D. A; DOYLE, F. J., (2019), Process Dynamics and Control, 4. ed., John Wiley & Sons, New Jersey.
- VARGAS, I. K. G.; BARBOSA, V. P.; SILVA, M. E. D.; SILVA, R. M. GEDRAITE, R. (2015), Estudo Experimental acerca da Influência da Vibração sobre o Teor de Umidade Residual em Material Sólido Granular utilizando Protótipo de Peneira Vibratória. Anais da XX Jornada em Engenharia Química, Uberlândia - MG.