



POTÊNCIA E TORQUE CONSUMIDOS PELO MOTORREDUTOR DE AGITAÇÃO DE UM PADDLE DRYER FRENTE VARIAÇÕES DE CARGA NO EIXO COM COLETA DE DADOS VIA INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

VINÍCIUS P. BARBOSA^{1*}, HEITOR O. N. ALTINO¹, CLÁUDIO R. DUARTE¹, MARINA S. PEREIRA¹, CARLOS HENRIQUE ATAÍDE¹.

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química.

*e-mail: vinicius.pimenta87@gmail.com

RESUMO - Este trabalho apresenta um estudo sobre o efeito da quantidade de material no leito de um *paddle dryer* sobre o consumo da potência e do torque pelo motorreductor acoplado ao eixo de agitação sobre a influência de diferentes velocidades de rotação do motor. A coleta dos parâmetros para o cálculo da potência e do torque foi feita via inversor de frequência que alimentava o motorreductor acoplado ao eixo do *paddle dryer* em modo batelada e sem a aplicação de secagem. Os resultados mostraram o aumento da potência e do torque consumidos à medida que a massa de areia no leito aumentava e permitiram a interrelação entre o torque e a potência em relação a quantidade de massa de areia no leito e a velocidade de rotação do motor.

INTRODUÇÃO

Motores elétricos são amplamente utilizados na indústria, nos mais variados processos, sendo o bom dimensionamento do motor um fator importante para o projeto de equipamentos e aumento de sua vida útil.

Muitas áreas da indústria envolvem a agitação mecânica do leito com aplicação de secagem de materiais particulados, sendo que estes processos possuem particularidades em relação à sua dinâmica que variam de acordo com a temperatura, níveis e natureza das substâncias sendo separadas. (Vasilenko et al, 2013).

A coesão entre as partículas oferece resistência à agitação mecânica, além de ser um fator relacionado a incrustações em equipamentos que processam este tipo de material (Tadeusz, 2003). Isso pode criar zonas mortas e interferir no deslocamento do leito, alterando fatores como coeficientes de troca de calor e massa, o que compromete a eficiência do processo (Vasilenko et al, 2013; Caparino et al, 2016; national research council, 1995).

A tendência de alguns materiais particulados em se aglomerar e aderir às superfícies de contato é chamado de *stickiness*, sendo que esse fenômeno tem grande influência na eficiência de secagem (Tadeusz, 2003).

O *stickiness* está relacionado à temperatura e a umidade do material particulado. Sua existência no processo de secagem pode ser associada a uma mudança brusca no aumento do gasto energético necessário para a agitação, o que define o *stick-point*, ou uma mudança gradual de resistência do leito, o que define o *stick-region*, conforme exemplifica a Figura 1 (Tadeusz, 2003).

Já a Figura 2 mostra a variação no torque necessário para a agitação e sua relação com o teor de umidade no processamento de lodo residual proveniente do tratamento de esgoto em uma unidade experimental de bancada do trabalho de Tadeusz (2003), sendo a velocidade de rotação do eixo e a temperatura constantes durante o teste.

Paddle dryers são secadores compactos capazes de lidar com leitos de materiais altamente coesivos. Uma característica desse

tipo de equipamento é a grande quantidade de material no leito, que se deve ao fato de ser um secador compacto ao passo que também oferece alto tempo de residência (Charlou et al, 2015). Assim deve ser fornecido um nível adequado de torque e potência pelo motorreductor, que irá depender das características construtivas do equipamento e do tipo de material no leito, assim como das mudanças na temperatura e em sua composição no decorrer da secagem, que alteram a resistência do leito frente o processo de agitação. A Figura 3 ilustra a resistência oferecida por uma carga no leito sobre agitação mecânica.

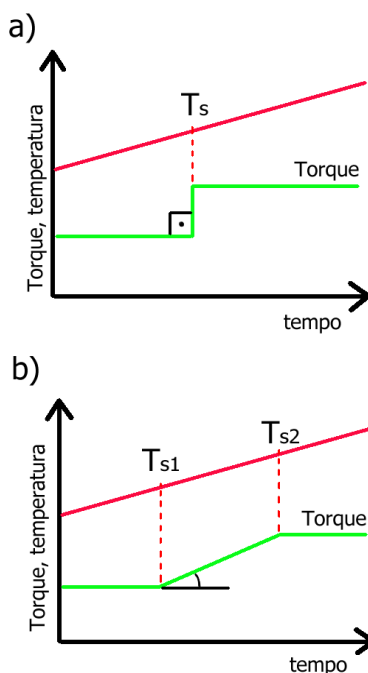


Figura 1: stickiness em sua a) forma pontual, stick-point, e no caso de b) uma região, stick-region (FONTE [modificado]: Tadeusz, 2003).

Para o conjunto motor e reductor (motorreductor), o torque disponível no eixo de saída é uma relação da potência no eixo e do número de rotações na saída do motorreductor, de acordo com a Equação 1. (WEG-Cestari, 2019).

$$T_{eixo} = 9550 \frac{P_{eixo}}{n_{rpm}} 10^3 \quad (1)$$

Onde T_{eixo} é o torque disponível no eixo de agitação em Nm, P_{eixo} a potência no eixo de agitação em Watts e n_{rpm} a rotação do eixo de

agitação conectado a saída do reductor em rotações por minuto (rpm).

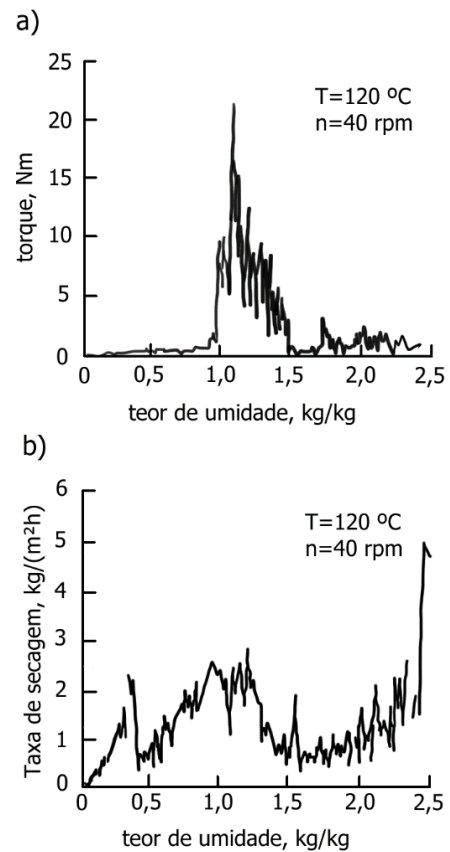


Figura 2: Secagem de lodo residual de esgoto com processo de agitação e sua relação entre o a) torque e teor de umidade e b) taxa de secagem e teor de umidade (FONTE [modificado]: Tadeusz, 2003).

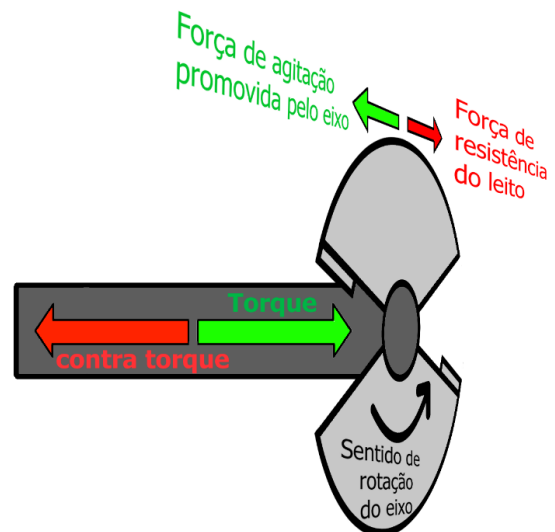


Figura 3: Torque fornecido pelo motor e resistência mecânica à agitação do leito.

O torque e a potência disponíveis no eixo de agitação são fornecidos pela associação entre

o motor elétrico e o redutor, sendo que a variável n_{rpm} é a razão entre a rotação fornecida pelo motor, N_{rpm} em rpm, e a redução total do redutor, I_r , como mostra a Equação 2 (WEG-Cestari, 2019).

$$n_{rpm} = \frac{N_{rpm}}{I_r} \quad (2)$$

Desta forma, o redutor atua como um multiplicador de torque, reduzindo o número de rotações do motor e aumentando o torque pela atuação do sistema de engrenagens internas, sendo assim, o torque disponível no eixo é calculado pela Equação 3.

$$T_{eixo} = T_{util\ motor} I_R \eta_R \quad (3)$$

Sendo $T_{util\ motor}$ o torque útil do motor, I_R a redução do redutor e η_R o rendimento de transmissão das engrenagens do redutor.

O cálculo da potência elétrica consumida pelo motor alimentada por uma rede trifásica é feito com a Equação 4 (WEG[a], 2020).

$$P_{Total} = U I (\cos\theta) \sqrt{3} \quad (4)$$

Sendo P_{Total} a potência total consumida pelo motor em *Watts*, U a tensão em volts entre as fases da rede elétrica trifásica que alimenta o motor, I a corrente consumida em amperes e $\cos\theta$ o fator de potência do motor elétrico.

Sendo η o rendimento do motor elétrico, a potência útil é calculada pela Equação 5.

$$P_u = \eta P_{Total} \quad (5)$$

A transmissão de energia entre os componentes citados é ilustrada na Figura 4.

Para um equipamento do tipo *paddle dryer* operando no modo contínuo, a resistência oferecida pelo leito em função do tempo é um dado útil para avaliar o distanciamento entre o ponto de operação em que o equipamento se encontra e o estado estacionário (Charlou *et al*, 2015).

Este trabalho apresenta o estudo sobre a influência da massa de areia no leito e da velocidade de rotação do eixo de agitação na

potência e no torque consumidos pelo motor em um *paddle dryer* operando em batelada, sem aplicação de secagem. O motivo da escolha de operação em batelada é que o leito de partículas é uniforme ao longo de todo o equipamento e sua massa pode ser utilizada como variável independente, já que é facilmente controlada com a adição ou retirada de areia, de forma a se alterar a carga exigida pelo motor para a agitação.

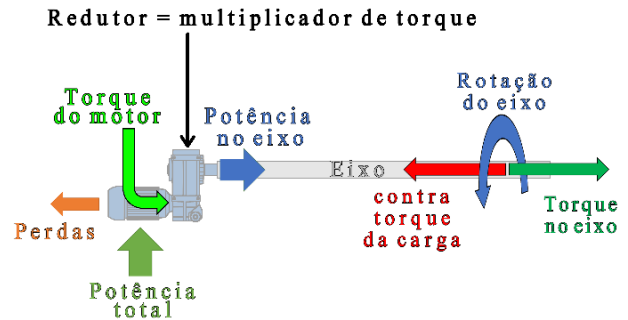


Figura 4: Transmissão de movimento e torque entre os componentes de um sistema de agitação por eixo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Unidade experimental

A vista lateral da unidade experimental *paddle dryer* é ilustrada na Figura 5, sendo que o leito possuía dois eixos de agitação mecânica operando em contra-rotação que são mostrados na foto da Figura 6.

O modelo do motorredutor é o Vertimax WCG20 da WEG com 4 cv(3kw) de potência, torque nominal de saída de 737 Nm, e redução de 45,02 vezes, com velocidade nominal de rotação do motor de 1750rpm com saída no eixo do redutor de 38,87 rpm.

Os parâmetros para o cálculo da potência e torque consumidos pelo motor foram coletados via comunicação serial entre o LabView 2017™ e o inversor de frequência WEG modelo CFW700 para 4cv de potência em 220v que alimentava o motor. A conversão do sinal de transmissão RS485 para USB ficou por conta de um conversor USB/RS485. Assim, foi feita a leitura dos parâmetros relacionados a potência de saída do inversor de frequência e o torque consumido pelo motor, que são os seguintes: tensão de alimentação do motor, corrente alimentada ao motor, fator de potência, número de rotações por minuto e porcentagem

de torque consumido. Com estes parâmetros foi possível calcular a potência total consumida pelo motor, através da Equação 4.

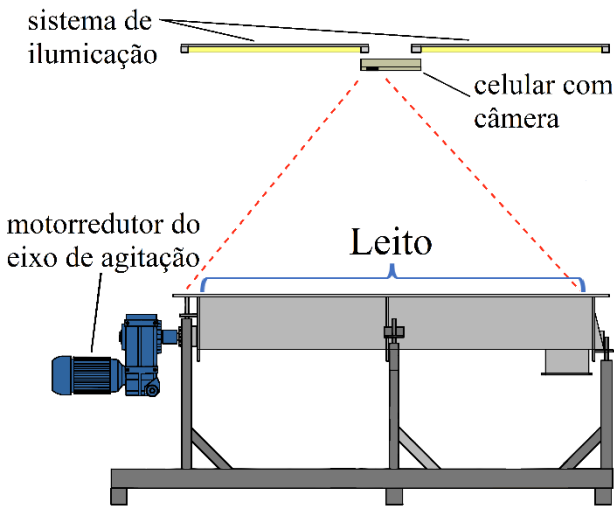


Figura 5: Vista lateral da unidade experimental do *paddle dryer*.

O inversor de frequência foi configurado utilizando os dados nominais de operação contidos na placa do motor para o modo de controle vetorial tipo VVW (Voltage Vector WEG), configuração que fornece maior precisão no controle de velocidade de rotação do motor (WEG 2020).



Figura 6: Eixos de agitação do *paddle dryer*

O torque consumido pelo motor foi calculado pelo inversor de frequência que leva em conta os parâmetros programados e estimados pelo inversor e retorna o valor em porcentagem de torque total consumido pelo motor, calculado em função da componente de corrente de alimentação fornecida pelo inversor de frequência que produz o torque, variando de 0, capacidade mínima, a 100%, da capacidade de operação nominal. O cálculo da porcentagem de torque consumido pelo motor é feito de acordo com a Equação 6 (WEG, 2020).

$$T(\%) = 100 \frac{I_T}{I_{T-nom}} Y \quad (6)$$

Sendo I_T a corrente de torque do motor em amperes, I_{T-nom} a corrente de torque nominal em amperes e Y um parâmetro adimensional que é função da velocidade real e da velocidade síncrona do motor.

É importante salientar que os valores úteis da potência e do torque na saída do eixo do motor para o redutor são menores que o valores consumidos fornecidos pelo inversor de frequência. Isto ocorre devido a relação não linear entre os valores consumidos e úteis da potência e do torque, já que a curva característica do motor e seu coeficiente de rendimento variam com a carga no eixo e a frequência de rotação e seu valor não pode ser calculado pelos recursos disponíveis neste trabalho. Sendo assim, os valores de potência e torque apresentados são todos referentes ao consumo total do motor, calculados por parâmetros fornecidos diretamente pelo inversor e serão apresentados na forma de potência, em Watts, e porcentagem de torque consumidos.

Areia utilizada

Foi utilizado areia como material particulado no leito do *paddle dryer*. A análise granulométrica foi realizada por peneiramento vibratório utilizando peneiras da série *Mesh Tyler AS 330 control* da *Retsch*. A granulometria da areia foi ajustada de acordo com o modelo Sigmóide conforme a Equação 7, sendo seus parâmetros mostrados na Tabela 1.

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D}\right)^p} \quad (7)$$

Tabela 1: Granulometria da areia utilizada nos ensaios

Modelo	R ²	Parâmetros
Sigmóide	0,998	$D_{50}=0,313\text{mm}$ $p=3,60$

Metodologia experimental

A ilustração da unidade em operação no modo batelada é mostrada na Figura 7.

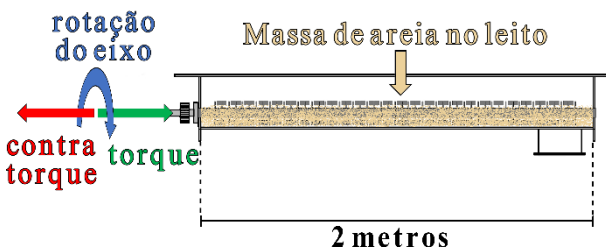


Figura 7: Figura esquemática da operação do Paddle Dryer.

As variáveis independentes estudadas foram: a velocidade de rotação do eixo de agitação (n_{rpm}) e a massa de areia no leito (m_{areia}). As variáveis resposta avaliadas foram a potência (P_{Total}), em Watts, e o torque (T), em porcentagem nominal, consumidos pelo motor. Foram realizados 35 ensaios combinando cada um dos 7 valores de velocidade de rotação do eixo com cada um dos 5 valores de massa de areia no leito como ilustrado na Figura 8 e listado na Tabela 2 para todos os experimentos. Não foram feitas réplicas e os resultados foram para o equipamento operando no estado estacionário.

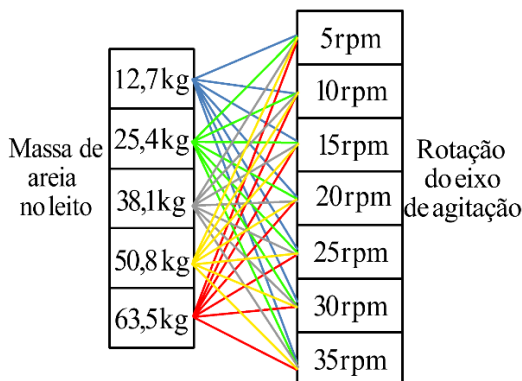


Figura 8: combinações das variáveis independentes nos experimentos realizados.

A seguinte sequência foi realizada para os ensaios de relação entre torque e potência em função da carga no eixo em modo batelada:

1. Pesagem da areia: a quantidade de areia para o ensaio era pesada e adicionada no equipamento.
2. Acionamento do sistema de agitação: o sistema de agitação era ligado para a homogeneização da areia ao longo do leito até que todo ele apresentasse uma altura uniforme.
3. Realização dos ensaios: o sistema de aquisição de dados era acionado e eram realizados os ensaios para sete valores de rotação do eixo, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 rpm, todos para a mesma massa de areia no leito.
4. Aquisição dos dados: os valores da potência e do torque consumidos pelo motor para as diferentes velocidades de rotação do eixo de agitação eram salvos em planilhas do Excel. Os dados eram salvos quando o sistema atingia o estado estacionário.
5. Finalização do ensaio: A planilha com os dados do ensaio era identificada e salva, após isso, mais material era preparado para ser adicionado para a realização do próximo experimento.

Tabela 2: Experimentos realizados

Exp	m_{areia} [kg]	n_{rpm} [rpm]	Exp	m_{areia} [kg]	n_{rpm} [rpm]
1	12,70	5	19	38,10	25
2	12,70	10	20	38,10	30
3	12,70	15	21	38,10	35
4	12,70	20	22	50,80	5
5	12,70	25	23	50,80	10
6	12,70	30	24	50,80	15
7	12,70	35	25	50,80	20
8	25,40	5	26	50,80	25
9	25,40	10	27	50,80	30
10	25,40	15	28	50,80	35
11	25,40	20	29	63,50	5
12	25,40	25	30	63,50	10
13	25,40	30	31	63,50	15
14	25,40	35	32	63,50	20
15	38,10	5	33	63,50	25
16	38,10	10	34	63,50	30
17	38,10	15	35	63,50	35
18	38,10	20			

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de dinâmica do leito em modo batelada são apresentados na Tabela 3.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar uma variação significativa entre a potência e o torque consumidos em relação a velocidade de rotação do motor e a massa de areia no leito. Os desvios padrões observados nos resultados foram baixos tanto para a potência quanto para o torque consumidos pelo motor.

Os resultados são mostrados na forma gráfica em função dos experimentos para a variável resposta potência na Figura 9(a) e para a variável torque na Figura 9(b), já a Figura 10 mostra uma foto do leito para as diferentes massas de areia no leito estudadas. Analisando os resultados para grupos de 7 experimentos com a mesma massa de areia no leito, é possível observar que à medida que a velocidade de rotação do eixo aumenta a potência consumida também aumenta, em uma relação aproximadamente linear para uma mesma massa de areia no leito, já o torque diminui com o aumento da velocidade de rotação, característica intrínseca de motores elétricos, como descrito pela Equação 1.

O conhecimento da interrelação entre torque e potência é importante pois evidencia características inerentes à resposta do motor frente a cargas no eixo, sendo esta resposta variável a depender do sistema e do tipo de carga (WEG[b]). A Figura 11 mostra a relação entre torque e potência para as diferentes condições operacionais adotadas durante os experimentos, sendo os dados utilizados para plotar o gráfico os mesmos apresentados na Tabela 3.

Analisando os resultados apresentados no gráfico da Figura 11, é possível observar que, para todas as condições experimentais, quanto maior a velocidade de rotação do eixo maior a potência consumida pelo motor e menor é o torque. Também é possível analisar que quanto maior a massa de areia dentro do equipamento, maior o consumo de potência e de torque necessários para manter a agitação do leito na rotação selecionada.

Tabela 3: Resultados experimentais

Exp	P_{Total} [W]	σ_P [-]	T [%]	σ_T (%) [-]
1	129,7	2,2	21,6	0,28
2	220,7	2,5	13,8	0,24
3	312,8	4,8	10,6	0,22
4	398,3	6,0	8,6	0,15
5	487,9	6,2	7,2	0,17
6	572,6	8,0	6,1	0,12
7	664,2	5,7	5,3	0,13
8	140,8	1,4	23,0	0,53
9	234,9	10,1	14,7	0,50
10	332,5	4,1	11,2	0,30
11	414,9	11,7	9,5	0,31
12	500,9	9,3	8,4	0,26
13	600,9	7,9	7,5	0,21
14	696,1	8,3	6,4	0,20
15	149,4	7,8	25,5	0,87
16	251,0	9,7	17,0	0,62
17	326,0	15,4	13,6	0,48
18	446,1	10,2	11,7	0,41
19	533,5	7,32	10,6	0,34
20	630,8	10,8	9,7	0,29
21	725,8	9,9	8,5	0,28
22	157,8	3,0	27,4	0,80
23	266,8	3,7	19,0	0,7
24	357,4	11,5	16,0	0,6
25	454,9	21,1	14,0	0,6
26	535,3	20,7	13,0	0,5
27	599,3	9,44	12,4	0,3
28	708,2	11,4	11,1	0,4
29	165,6	2,3	30,0	0,8
30	277,3	3,2	21,6	0,7
31	381,5	7,3	18,4	0,5
32	452,1	9,3	17,1	0,5
33	593,6	8,6	15,2	0,37
34	703,3	8,1	14,3	0,38
35	786,0	25,9	13,2	0,5

É importante relembrar que as variáveis resposta potência e torque consumidos coletadas pelo sistema de aquisição de dados e apresentadas como resultado neste trabalho são para o consumo total do motor. Para a potência e torque úteis disponíveis no eixo de saída do motorreductor, o valor total consumido deve ser multiplicado pelo rendimento, porém, este varia de acordo com a carga no eixo, a frequência de alimentação da corrente alternada para o motor e diversos outros parâmetros elétricos e eletrônicos relacionados ao funcionamento do inversor de frequência e por isso não pôde ser

calculado com os recursos disponíveis nesta unidade experimental (WEG[a], 2021). Dito isso, os dados apresentados na placa do motor em relação ao rendimento, fator de potência e os outros parâmetros são para a capacidade nominal de funcionamento do motor, na sua velocidade nominal de rotação e com a carga nominal de torque no eixo, sendo essenciais para a configuração do inversor.

Pelos resultados obtidos, foi possível verificar que o motor utilizado está superdimensionado para esta função, e no caso estudado, utilizando areia no leito, um motor de 1,5 cv(1,10kW) de potência seria o suficiente para esta demanda, já que o maior consumo energético observado foi de 786 Watts, pouco mais de 1 cv de potência.

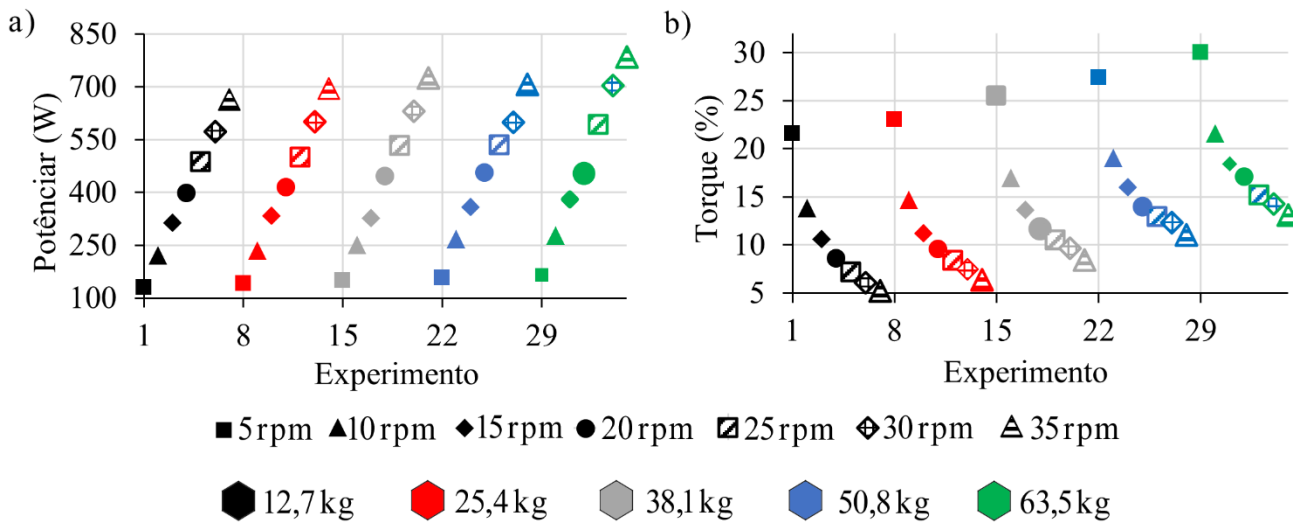


Figura 9: Resultados dos experimentos para as variáveis resposta a) potência e b) torque consumidos pelo motor de agitação.



Figura 10: Fotos do leito do *paddle dryer* para as 5 variações de massa de areia estudadas.

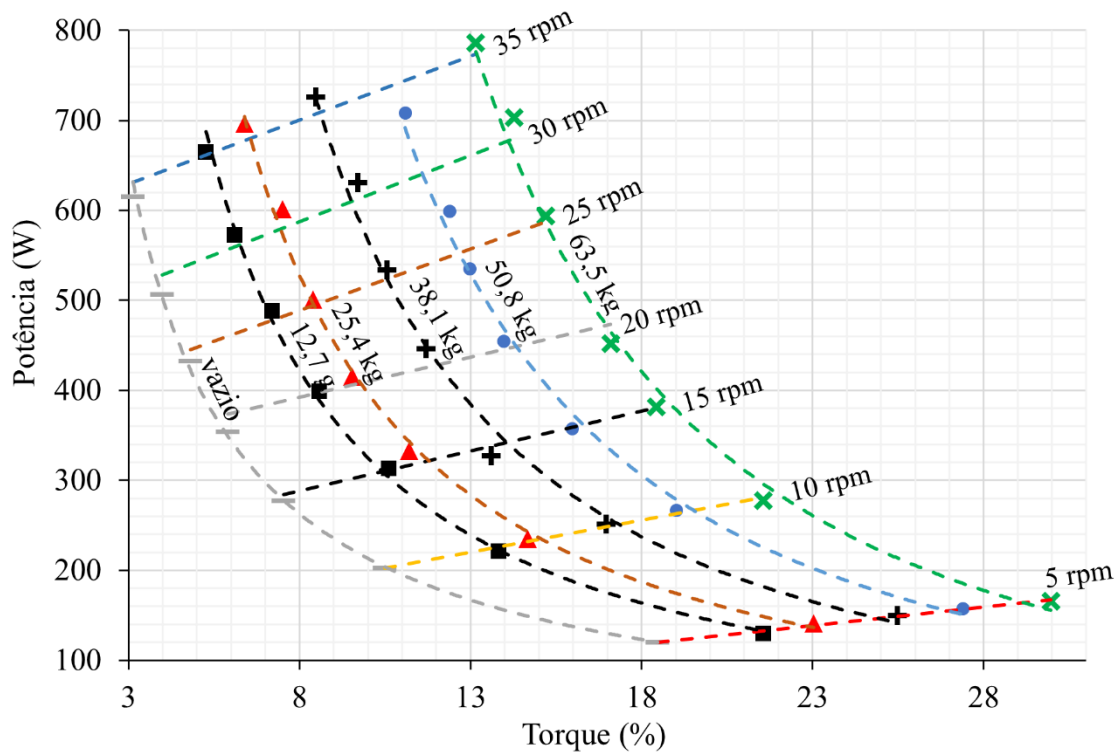


Figura 11: Relação entre torque e potência no motor para os ensaios em modo batelada para diferentes valores de rotação do motor e massa de areia no leito.

Esta é uma boa alternativa do ponto de vista operacional, já que medidas reais de potência e torque muitas vezes exigem sensores de maior custo de aquisição que o próprio conjunto composto pelo motorreductor e o inversor de frequência.

Outra observação importante é que caso a mesma metodologia seja aplicada durante um processo de secagem é esperado uma mudança nas medidas de torque e potência se a secagem for realizada em modo batelada, já que os níveis de umidade e interações entre as partículas no leito se alteram à medida que a composição do leito muda. Já para um equipamento em modo contínuo, é esperado que estas variações cessem e o consumo de torque e potência se estabilizem com o equipamento atingindo o estado permanente de operação, sendo a potência ou torque consumidos um parâmetro para avaliação se o equipamento atingiu o estado estacionário.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que é possível a obtenção de valores de potência e torque consumidos pelo motor e o levantamento da curva de inter-relação entre essas 2 variáveis utilizando inversores de frequência. Apesar de

não serem os valores de potência e torque úteis no eixo, seus valores obtidos são correlacionáveis com a velocidade de rotação e a carga imposta ao eixo de agitação e apresentaram uma resposta coerente com a massa de areia presente no leito, sendo essas medidas uma alternativa para a avaliação do estado em que o sistema se encontra numa operação em relação a carga no eixo, podendo ser utilizada também para o melhor dimensionamento de um motorreductor.

NOMENCLATURA

T_{eixo} [N.m] - Torque disponível no eixo de agitação.

P_{eixo} [Watts] - Potência no eixo de agitação.

n_{rpm} [rpm] - Rotação do eixo de agitação.

N_{rpm} [rpm] - Número de rotações por minuto do motor.

I_r [-] - Redução total do reductor.

$T_{util\ motor}$ [N.m] - Torque útil do motor.

η_R [-] Rendimento de transmissão do reductor.

P_{Total} [Watts] - Potência total consumida pelo motor.

U [volts] - Tensão em volts entre as fases de uma rede elétrica trifásica.

I [Amp] - Corrente em amperes.

$\cos\theta$ [-] - Fator de potência do motor elétrico.

η [-] - Rendimento do motor elétrico

D_{50} - [μm] Parâmetro do modelo Sigmóide.

p [-] - Parâmetro do modelo Sigmóide.

U_s [volts] - Tensão em volts na saída do inversor

I_s [Ampères] - Corrente em na saída do inversor

$\cos\theta_s$ [-] - Fator de potência na saída do inversor

I_T - [Ampères] Corrente de torque do motor.

I_{T-nom} [Ampères] Corrente de torque nominal do motor

Y [-] Parâmetro adimensional, função da velocidade real e da velocidade síncrona do motor.

m_{areia} [kg] - Massa de areia no leito.

P_{Total} [Watts] - Potência consumida pelo motor.

$T(\%)$ [-] - Torque consumido pelo motor

bulk density and cohesion, Powder Technology Powder Technol., Vol. 239, Pg. 366 – 373.

WEG, Manual de Programação Inversor de Frequência CFW700 V2.3.X, Documento 10000796176/06 Data de publicação 08/2020, www.weg.net.

WEG[a], Guia de Especificação de Motores Elétricos, Documento: 50032749, Data de publicação 01/2021, www.weg.net.

WEG[b], W22 Motor Elétrico Trifásico, Catálogo Técnico Brasileiro, Download em 01/2021, www.weg.net.

WEG-Cestari, WCG20 Motorreductores até 18000Nm, Documento WCG20, Data de publicação 09/2019, www.weg.net.

REFERÊNCIAS

Caparino, O.A., Nindo, C.I., Tang, J., Sablani, S.S. (2017), Rheological measurements for characterizing sticky point temperature of selected fruit powders: An experimental investigation, Journal of Food Engineering, Vol. 195, Pg. 61 – 72.

Charlou, C., Milhe, M., Sauceau, M., Arlabosse, P. (2015) A new methodology for measurement of sludge residence time distribution in a paddle dryer using X-ray fluorescence analysis, water research, Vol. 69, Pg. 1 – 8.

National Research Council. Unit Manufacturing Processes: Issues and Opportunities in Research (1995), Washington, DC: The National Academies Press.

Tadeusz, K. (2003), Sticky Region in Drying – Definition and Identification, Dry. Technol., Vol. 8, Pg. 1457 – 1469,

Vasilenko, A., Koynov, S., Glasser, B. J., Muzzio, F. J. (2013), Role of consolidation state in the measurement of