

# DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DISSIPADA PELO ROTOR EM CÉLULAS MECÂNICAS DE FLOTAÇÃO: ABORDAGEM EM ESCALA DE LABORATÓRIO.

Odair Alves de Lima<sup>1</sup>, Francisco A. M. Salotti<sup>2</sup>, Laurindo de Salles Leal Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av Professor Mello Moraes, 2373 - Cidade Universitária, 05508-900 São Paulo-SP, Brasil.  
E-mail: odair.lima@poli.usp.br, lauleal@usp.br

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia - Cidade Universitária,  
Av. Professor Luciano Gualberto, 1289 - Cidade Universitária, 05508-010 São Paulo-SP, Brasil.  
E-mail: fsalotti@ice.usp.br

## RESUMO

A potência dissipada pela ação do rotor para manter a polpa em movimento no interior de células mecânicas de flotação constitui parâmetro de extrema importância para o cálculo de parâmetros hidrodinâmicos, como energia média dissipada ( $\epsilon$ ), comprimento de Kolmogorov ( $L_D$ ), velocidade média turbulenta de partículas e bolhas ( $v_t$ ) no interior da célula, assim como o número de potência ( $N_p$ ) que pode ser interpretado como sendo o coeficiente de arrasto do impelidor. Com o rotor da célula em movimento, se medirmos a potência consumida pelo motor, teremos um número que não nos informa a potência líquida realmente dissipada pelo sistema mecânico rotor/estator, ignorando as perdas de transmissão da energia elétrica em torque através de fricção e escorregamento. Para determinação do rendimento da transmissão de energia elétrica em torque, acoplou-se um gerador de corrente contínua ao eixo do impelidor, simulando a operação do sistema mecânico com vários níveis de resistência ao movimento do impelidor dentro da célula de flotação. Tal nível de resistência foi medido através da amperagem solicitada ao motor para manter o rotor movendo-se em rotações (N) previamente estabelecidas (1000 rpm < N < 1500 rpm). Os resultados indicaram rendimentos variando entre 20-40%, em função da amperagem solicitada ao motor. Tal nível de solicitação foi simulado na prática com polpas de minério de ferro e areia, calculando-se a potência útil dissipada pelo sistema mecânico para cada tipo de minério. Esses valores foram utilizados para determinar o número de potência do impelidor operando em cada situação prática. Apesar dos resultados terem sido utilizados para caracterização hidrodinâmica de uma célula de flotação de laboratório de marca Denver, a metodologia utilizada neste trabalho poderia também ser aplicada em células industriais.

PALAVRAS-CHAVE: flotação; hidrodinâmica; potência; células mecânicas; conversão de energia

## 1. INTRODUÇÃO

A flotação é um processo de separação, onde a turbulência exerce papel fundamental no desempenho da operação, influenciando o estado de suspensão das partículas, proporcionado em grande parte pela macroturbulência; a dispersão das bolhas de ar na polpa, as colisões das partículas sólidas com as bolhas de ar e a preservação do agregado partícula-bolha são, por sua vez, governadas pela microturbulência. Dessa forma, uma vez que as variáveis físico-químicas (tensão superficial e ângulo de contato) estejam bem estabelecidas no processo, uma análise criteriosa dos parâmetros hidrodinâmicos atuantes no sistema é de suma importância para diagnosticar o desempenho da operação, fornecendo informações que possibilitam a otimização do processo.

A turbulência é essencialmente dissipativa, uma vez que as tensões viscosas de cisalhamento realizam trabalho de deformação, que aumenta a energia interna do fluido às custas da energia cinética da turbulência, de modo que é necessário o fornecimento contínuo de energia ao sistema, caso contrário, a turbulência rapidamente cessa. Essa energia é conseguida pelo movimento das pás do impelidor da célula de flotação, mantendo a polpa em suspensão, evitando o aterramento da célula.

Vários autores têm investigado a dissipação de energia em células de flotação (Fallenius, 1987; Schulze, 1984; Schubert e Bischofberger, 1978, Deglon *et al.*, 1999 entre outros) buscando sempre estabelecer relações entre a potência fornecida ao sistema e o desempenho (recuperação e teor) da operação, através da análise da energia média dissipada  $\epsilon$  e do número de potência  $N_p$ . Baseado nas hipóteses de isotropia local e similaridades da microturbulência de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941a,b,c) é possível uma simplificação das equações que se propõem a descrever escoamentos turbulentos. Dentre as várias variáveis inerentes à turbulência, tais como tensões viscosas ou aceleração e diâmetros dos grandes e pequenos turbilhões, a taxa de dissipação média de energia  $\epsilon$  é extremamente importante,

sendo considerada determinante, ao lado da viscosidade, para caracterizar a microturbulência, e é definida como energia por unidade de tempo por unidade de massa, ou seja, de acordo com a equação (1)

$$e = \frac{P_{\text{int}}}{m} \quad (1)$$

onde  $P_{\text{int}}$  é a potência fornecida ao sistema rotor/estator;  $m$  é a massa de polpa no tanque de flotação e;  $e$  é a energia média dissipada. Leal Filho *et al.* (2003) realizaram experimentos de dissipação de energia na flotação de esferas de vidro, mostrando que há um valor ótimo de dissipação média de energia, que proporciona a máxima recuperação, enquanto que para valores acima e abaixo deste ponto ótimo, a recuperação é sempre menor.

Por meio da determinação da potência em células mecânicas de flotação, é possível estimar o número de potência  $N_p$ , que pode ser interpretado como um coeficiente de arrasto, ou seja, a resistência do fluxo ao movimento das pás do impelidor no seu meio. O  $N_p$  é expresso pela equação (2), onde  $P_{\text{int}}$  é a potência líquida fornecida ao eixo de rotação;  $N$  é a rotação do impelidor;  $D$  é o diâmetro do impelidor;  $\rho$  é a densidade da polpa e;  $N_p$  é o número de potência da célula do impelidor.

$$N_p = \frac{P_{\text{int}}}{N^3 D^5 \rho} \quad (2)$$

Devido às perdas de transmissão de energia elétrica em torque, a potência absorvida pelo motor não é igual àquela fornecida ao sistema rotor/estator, havendo a necessidade de conhecer as perdas energéticas na transmissão da energia, ou seja, para se avaliar o efeito da potência em células mecânicas de flotação, é fundamental que o rendimento do motor seja uma variável conhecida. Para motores industriais, adota-se o valor 0,9 para o rendimento quando não se conhece seu valor real (Pirelli, 2001). No entanto, para motores monofásicos, como é o caso do motor da célula de flotação Denver de laboratório, não se pode aplicar esse mesmo valor, de modo que se torna imprescindível a estimativa do rendimento do motor em cada rotação e carga de trabalho, para se prosseguir em estudos sobre dissipação de energia em células mecânicas de flotação. Deste modo, este trabalho visa à estimativa do rendimento líquido do motor de uma célula Denver de laboratório, que apresenta as seguintes características: motor de indução monofásico, marca Magnetek; com potência de ¼ Hp; tensão 115/230 V; velocidade 1425/1725 rpm; frequência 50/60 Hz, bem como a avaliação da dissipação de energia em diferentes sistemas de flotação.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Estimativa do rendimento líquido do motor da célula de flotação

Com o objetivo de identificar a potência efetivamente transmitida à polpa pelo sistema rotor/estator de uma célula de flotação, foi desenvolvido um método indireto de medição desta potência. Neste procedimento de calibração da célula, foram levantadas curvas de rendimento e potência absorvida para diferentes rotações. Para isto, foi necessário desenvolver um procedimento experimental que permitisse medir a potência útil desenvolvida no eixo de agitação e a potência absorvida pelo motor. Para simulação da carga da célula foi utilizado um gerador de energia em corrente contínua, como máquina calibrada para determinação da potência útil desenvolvida no eixo de agitação. Este gerador, com o eixo na posição vertical e acoplado ao eixo de agitação, alimentou, por sua vez, uma carga resistiva ajustável.

A potência efetiva transmitida ao sistema de flotação na forma de torque do eixo de agitação foi determinada indiretamente, através da medição da potência gerada para a carga e somando-se as perdas de acoplamento e internas do gerador. O rendimento foi calculado pela razão entre a potência no eixo de agitação e a potência absorvida da rede elétrica pelo motor da célula.

Buscando abranger uma faixa ampla de velocidades do impelidor, a rotação foi variada de 1000 rpm a 1500 rpm e, em cada velocidade, a carga foi variada desde vazio (eixo não acoplado ao gerador) até quando a potência absorvida pelo motor da célula atingisse o valor nominal (~300 W). Para a realização dos experimentos, foram utilizados os seguintes equipamentos/instrumentos:

- tacômetro estroboscópico para medição da velocidade do eixo de agitação e comparar com o indicador da célula;
- wattímetro digital para medição da potência, tensão e corrente absorvida pelo motor da célula;
- voltímetro analógico CC para medição da tensão fornecida à carga resistiva;
- amperímetro analógico CC para medição da corrente fornecida à carga resistiva;
- gerador 1500W, 4700 rpm, 90 Vcc.

A montagem experimental está ilustrada na figura 1

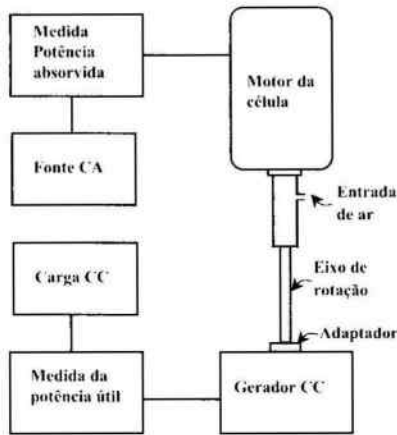


Figura 1 Montagem experimental utilizada para estimativa da potência útil

Na realização dos ensaios para estimativa do rendimento da célula de flotação, as seguintes etapas foram seguidas:

- inicialmente, a velocidade predeterminada do eixo de agitação foi ajustada com a célula operando em vazio;
- com o eixo de rotação desacoplado do gerador de correntes, ou seja, operando em vazio, foi medida a potência absorvida da rede elétrica ( $P_{vazio}$ ) pelo motor;
- em seguida, acoplado o gerador ao eixo de agitação, foi medida novamente a potência absorvida da rede elétrica ( $P_{av}$ ) pelo motor, sem carga de trabalho conectada ao gerador;
- as duas etapas anteriores permitiram determinar as perdas devido ao acoplamento e internas do gerador ( $p_i$ ), fazendo a diferença entre as potências absorvidas pelo motor com o eixo de agitação acoplado ao gerador e com o eixo livre, como mostra a equação (3)

$$p_i = P_{av} - P_{vazio} \quad (3)$$

- a obtenção de um ponto de carga foi feita ajustando-se a carga resistiva do gerador e determinando-se a potência fornecida à carga ( $P_k$ ). Neste caso, foi medida a corrente CC ( $I_c$ ) e a tensão CC ( $V_c$ ). A potência foi então calculada aplicando a equação (4). Foi medida, também, a potência elétrica absorvida da rede ( $P_{abs}$ ) pelo motor e a velocidade rotacional do eixo

$$P_k = V_c \cdot I_c \quad (4)$$

O procedimento anterior foi repetido para várias cargas até que a potência absorvida pelo motor da célula alcançasse seu valor nominal (~300 W). A potência desenvolvida pelo eixo de agitação da célula ( $P_e$ ) no ponto de carga é a soma da potência fornecida à carga pelo gerador ( $P_k$ ) mais a perda devido ao acoplamento e às perdas internas do gerador ( $p_i$ ), como mostra a equação (5).

$$P_e = P_k + p_i \quad (5)$$

O rendimento líquido do motor foi calculado pela razão entre a potência gerada no eixo de rotação  $P_e$  e a potência absorvida pelo motor da célula  $P_{abs}$ , dado pela equação (6).

$$\eta = \frac{P}{P_{ab}} \quad (6)$$

## 2.2 Determinação da energia média dissipada

No presente trabalho, a avaliação da energia média dissipada foi discutida sob a ótica do número de potência, um importante parâmetro hidrodinâmico, muito utilizado para fins de "scale up" de células de flotação (Deglon *et al.*, 1999). Após determinação do rendimento  $\eta$  do motor da célula Denver, foram realizados experimentos com os minérios de ferro (CSN - mina Casa de Pedra) e areia (Mineração Jundu, Descalvado), a fim de determinar o número de potência para cada sistema em determinadas rotações. Utilizando 500 g de cada minério, e mantendo constante o volume de polpa da célula (1300 mL) em cada experimento, a rotação do impelidor foi variada de  $16,7 \text{ s}^{-1}$  (1000 rpm) a  $21,7 \text{ s}^{-1}$  (1300 rpm), medindo-se a potência absorvida pelo motor, por meio de um wattímetro digital Yokogawa, modelo 2433. Por meio da correlação ajustada para o rendimento do motor, foi possível estimar a potência líquida fornecida ao sistema e o número de potência, que foi calculado utilizando a equação (2).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Estimativa do rendimento mecânico do motor da célula

Por meio do procedimento descrito na seção 2.1, foi estimado o rendimento do motor para variadas rotações do impelidor e cargas de trabalho simuladas pelo gerador de corrente contínua. Para cada rotação do eixo, foi determinado o rendimento do motor, a rotação real do eixo à medida que se aumentava a carga de trabalho e a potência gerada pela carga simulada, como ilustram as tabelas I e II para as rotações de 1500 rpm e 1200 rpm.

Tabela I Resultados da estimação do rendimento para rotação ajustada em 1500 rpm

Motor da célula de flotação			Gerador calibrado		Eixo de agitação		
Tensão, V	Corrente, A	Potência absorvida, W	Tensão, V	Corrente, A	Potência útil, W	Rotação, rpm	Rendimento, %
127	2,50	137	Desacoplado			1514	
127	2,65	168	26,5	0,00	31	1502	18,4
126	2,87	210	24,8	1,30	63	1489	30,1
126	2,99	231	24,0	1,95	78	1483	33,7
126	3,21	265	23,4	2,92	99	1469	37,5
127	3,41	296	21,9	3,80	114	1460	38,5

Tabela II Resultados da estimação do rendimento para rotação ajustada em 1200 rpm

Motor da célula de flotação			Gerador calibrado		Eixo de agitação		
Tensão, V	Corrente, A	Potência absorvida, W	Tensão, V	Corrente, A	Potência útil, W	Rotação, rpm	Rendimento, %
126	2,46	126	Desacoplado			1198	
126	2,51	141	21,0	0,00	15	1202	10,6
127	2,62	165	19,6	1,00	35	1191	21,0
127	2,81	201	18,0	2,40	58	1182	29,0
126	3,00	234	16,5	3,68	76	1171	32,4
126	3,23	270	15,2	4,90	89	1161	33,1
126	3,41	297	14,2	5,85	83	1152	27,9

A figura 2 ilustra o comportamento do rendimento do motor, em função da potência absorvida pelo motor elétrico, para determinadas rotações. Nesta figura pode ser observado que os valores de rendimento são consideravelmente baixos, com valores máximos em torno de 40%.

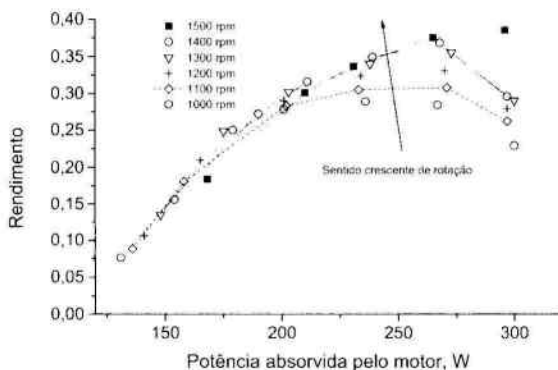


Figura 2 Rendimento do motor em função da potência absorvida pelo motor (os valores de rotações são referentes às rotações ajustadas pelo medidor da célula)

A fim de prever o rendimento do motor numa determinada rotação e carga de trabalho (representada pela potência absorvida pelo motor), o ajuste dos pontos foi estabelecido aplicando um modelo matemático, cujos parâmetros foram ajustados por regressão não-linear, utilizando o código computacional Statistica 5.0. A tabela III mostra o valor dos parâmetros estimados para a correlação, cuja expressão é dada na equação (7).

$$\eta(P, N) = a + b \cdot P + c \cdot N + d \cdot N \cdot P + k \cdot N^2 + h \cdot P^2 \quad (7)$$

Tabela III Parâmetros do modelo R=0,995

Parâmetros	a	b	c	d	k	h
Valor	-0,65	$6,18 \cdot 10^{-3}$	$9,96 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$-8,16 \cdot 10^{-4}$	$-1,7 \cdot 10^{-6}$

Os valores de rendimentos obtidos pelo ajuste dos pontos foram confrontados com os dados experimentais. A figura 3 ilustra os valores de rendimentos experimentais e os estimados pela correlação. A figura 3 ilustra também a curva pontilhada, representando a reta  $y=x$ , onde pode ser observado que os pontos experimentais e os previstos estão bem dispostos em torno da reta onde os rendimentos reais e previstos são iguais.

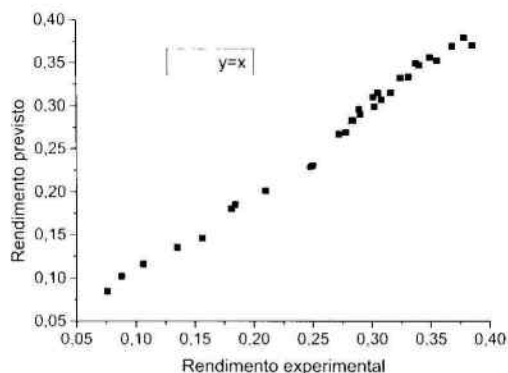


Figura 3 Rendimentos previstos versus rendimentos experimentais.

### 3.2 Número de potência do impelidor da célula de flotação

A figura 4 ilustra os resultados do número de potência ( $N_p$ ) da célula de flotação Denver para os minérios de ferro e areia, onde é possível observar que à medida que se aumenta a rotação do impelidor, o número de potência diminui. Pode ainda ser observado na figura 4 que o número de potência, que representa a resistência do fluido ao movimento das pás do impelidor, é maior quando a polpa é formada por minério de ferro do que quando se usa areia como minério. Isto indica que é necessário uma dissipação maior de energia para processar polpas de minério de ferro do que de areia. De fato, de acordo com as características físicas do material processado, estas influenciarão nas características da polpa (densidade e viscosidade) numa célula de flotação, e quanto mais densa e viscosa for a polpa, mais energia deve ser dissipada nesse sistema para se manter o estado de suspensão das partículas sólidas, e conseqüentemente, promover a operação de flotação.

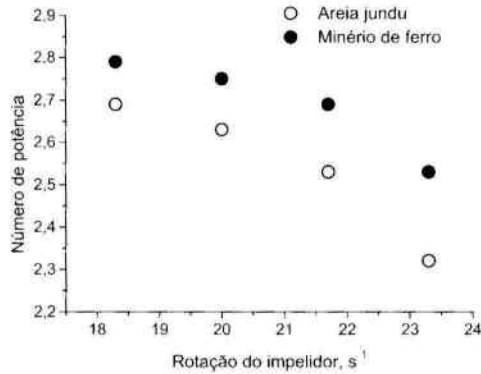


Figura 4 Dissipação de energia em sistemas de flotação

## 4. CONCLUSÃO

A metodologia utilizada para estimativa da potência fornecida ao eixo de rotação mostrou-se adequada para se estimar o rendimento do motor da célula de flotação Denver, em escala de laboratório. Para prever o comportamento do rendimento do motor, uma correlação empírica foi ajustada por regressão não linear, utilizando o código computacional Statistica para determinar os parâmetros do modelo. A correlação ajustada para relacionar o rendimento com as variáveis rotação e potência absorvida pelo motor (carga de trabalho), permitiu uma boa previsão do rendimento, sendo que os valores previstos apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais, com um desvio positivo máximo de 16,0% para baixos rendimentos ( $\eta < 0,1$ ), e desvio negativo máximo de 8,2%. Os valores de rendimento obtidos neste trabalho estão na faixa de 20-40%, mostrando que o motor da célula de flotação Denver em estudo apresenta uma grande perda de energia.

A comparação dos números de potência calculados para os minérios de ferro e areia, mostrou que há diferentes níveis de solicitação de energia, para diferentes sistemas, a fim de que seja mantido o mesmo estado de suspensão e dispersão das partículas.

Por meio do conhecimento do rendimento total do motor em uma célula de flotação, é possível uma ampla investigação dos efeitos das variáveis físicas do sistema (densidade, viscosidade, granulometria, etc) na recuperação do processo, e qual o ponto ótimo de dissipação de energia para obtenção da máxima recuperação, possibilitando uma análise de custos operacionais mais precisa e fornecendo informações relevantes para o controle do processo e também "scale up" do equipamento.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Deglon, D. A., Egya-Mensah, D. e Franzidis, J. P. Review of Hydrodynamics and Gas Dispersion in Flotation Cells on South African Platinum Concentrators. *Minerals Engineering*, vol. 13 (3), pp 235-244, 2000.

Fallenius, K. Turbulence in Flotation Cells. *International Journal of Mineral Processing*, 21, pp 1-23, 1987.

Kolmogorov, A. N. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Number, 1941a. In\_Frisch, U. Turbulence – The Legacy of A. N. Kolmogorov, Cambridge University Press, 2001.

Kolmogorov, A. N. On Degradation (decay) of Isotropic Turbulence in an Incompressible Viscous Liquid, 1941b. In\_Frisch, U. Turbulence – The Legacy of A. N. Kolmogorov, Cambridge University Press, 2001.

Kolmogorov, A. N. Dissipation of Energy in Locally Isotropic Turbulence, 1941c. In\_Frisch, U. Turbulence – The Legacy of A. N. Kolmogorov, Cambridge University Press, 2001.

Leal Filho, L. S., Rodrigues, W. J. e Ralston, J. Importance of Hydrodynamics in Coarse Particle Flotation. Proceedings of the International Conference Flotation and Flocculation – from Fundamentals to Application. University of Australia, Mawson Lakes, pp 203-212, 2003

Pireli Manual Pirelli de Instalações Elétricas, 2ª ed., São Paulo (SP), 2001

Schubert, H. e Bischofberger, C. On the Turbulence of Flotation Machines. International Journal of Mineral Processing, 5 pp 131-142, 1978.

Schulze, H. J. Physico-Chemical Elementary Processes in Flotation – An Analysis from the Point of View of Colloid Science including Process Engineering Considerations. Elsevier, 1984.

Yianatos, J., Bergh, L., Condori, P. e Aguilera, J. Hydrodynamic and Metallurgical Characterization of Industrial Flotation Banks for Control Purposes. Minerals Engineering, vol (14) 9, pp 1033-1046, 2001.