

# MODELO NEURAL PARA ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE MÍNIMO JORRO E QUEDA DE PRESSÃO EM LEITO DE JORRO COM E SEM TUBO DRAFT

D. F. C. PEREIRA<sup>1</sup>, A. SILVA<sup>1</sup> e F. B. FREIRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: bentes@ufscar.br

**RESUMO** – Ao contrário dos leitos de jorro convencionais, o leito com dispositivos internos é cada vez mais usado, mas dificilmente existem modelos teóricos ou empírico disponíveis para seu projeto. O objetivo principal deste estudo foi desenvolver e avaliar redes neurais para estimar velocidade de mínimo jorro e queda de pressão em um leito convencional e em leitos com diferentes tipos de tubos drafts. Os parâmetros investigados foram: tamanho e densidade das partículas, ângulo de fundo cônico, diâmetro do vaso cilíndrico e características e posição do tubo draft. Resultados mostraram que o uso de redes neurais artificiais permitem boa generalização para obtenção de queda de pressão e velocidade de mínimo jorro dentro da faixa de operação estudada.

## 1. INTRODUÇÃO

Leitos de jorro são métodos alternativos de contato em relação aos leitos fixos e fluidizados, especialmente para o manuseio de partículas grosseiras (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Uma das principais vantagens dos leitos de jorro sobre leitos fluidizados é o alto grau de mistura entre gás e sólidos devido a um movimento cíclico e uniforme de partículas, levando a altas taxas de transferência de calor e massa e também a um produto final mais homogêneo. Para minimizar limitações operacionais, várias configurações de leito de jorro têm sido propostas por diversos autores, sendo as principais o leito de jorro convencional, o leito cônico e o bidimensional. Além dessas configurações o leito de jorro também pode ser modificado com a introdução de um tubo cilíndrico na região central (tubo interno ou draft).

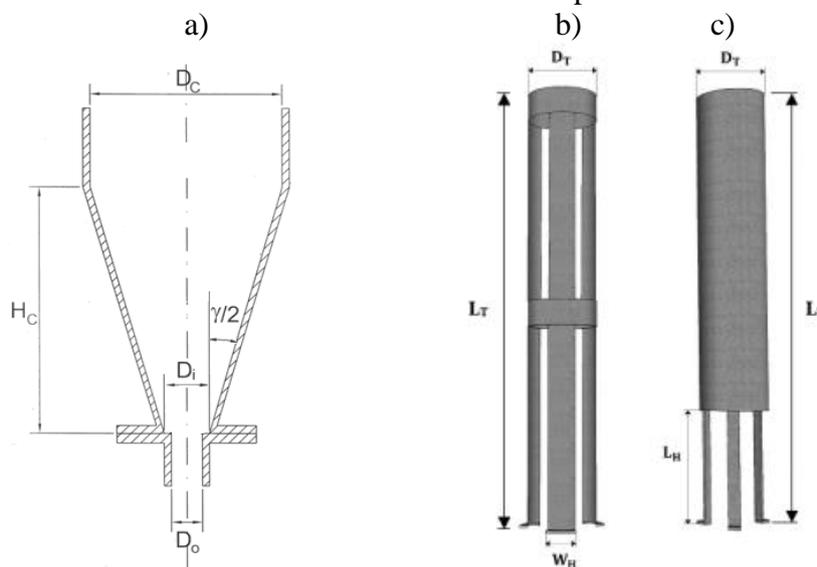
Segundo Marreto (2006), os parâmetros fluidodinâmicos de maior interesse no estudo do regime de jorro são a velocidade mínima de jorro, a altura de jorro estável e a queda de pressão do leito. Embora as estimativas de velocidade de mínimo jorro e de queda de pressão reflitam diretamente na qualidade do projeto desses equipamentos, surgem dificuldades significativas no uso de abordagens puramente teóricas ou empíricas. As redes neurais são uma alternativa interessante na medida em que podem representar processos altamente não-lineares, sendo úteis para uma ampla variedade de propósitos. Além disso, são bastante flexíveis e robustas aos ruídos de entrada e, uma vez desenvolvidas e seus coeficientes determinados, elas podem fornecer uma resposta rápida para uma nova entrada. Freire et al. (2014) discutem várias aplicações envolvendo técnicas de controle e monitoramento para secagem em leito de jorro, incluindo algoritmos adaptativos e redes neurais.

O objetivo deste trabalho foi apresentar etapas de desenvolvimento de redes neurais para estimar velocidade de mínimo jorro e queda de pressão em leitos de jorro cônico sem e com tubos draft. As redes neurais foram feitas em MatLab® (R2013a, Mathworks) com um banco de dados usando três configurações diferentes de leito de jorro: sem tubo draft, com um tubo sólido não poroso e com tubo aberto. Os modelos baseados em redes neurais tiveram como entradas o tamanho e a densidade das partículas, o ângulo do cone inferior, o diâmetro do vaso cilíndrico e as características do tubo draft.

## 2. LEITO DE JORRO

Neste trabalho foram usadas as configurações de leito de jorro com base cônica com diferentes ângulos de cone e de tubo draft mostradas na Figura 1.

Figura 1- a) Fatores geométricos do leito de jorro de base cônica e b) tubo draft aberto e c) tubo draft sólido fechado e não poroso



O leito de jorro convencional é composto, basicamente, por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica. A configuração convencional do leito de jorro apresenta limitações operacionais que podem ser contornadas com o uso de partes internas, como os tubos draft, que disciplina a passagem de ar e estabelece uma barreira física entre a região anular e a região de jorro. Com isso, pode-se ter um aumento significativo na carga de sólidos alimentada ao leito, além de proporcionar maior estabilidade e evitar a limitação da altura máxima do leito jorrável. Contudo, segundo Arsenijevic (2004) o uso do draft causa diminuições na taxa de circulação de sólidos.

## 3. REDES NEURAIS

As redes neurais artificiais (RNAs) são um método computacional de programação que imita o cérebro humano, isto é, são formadas por várias unidades de processamento, chamadas neurônios artificiais, que podem correlacionar bases de dados entre si. Das diferentes arquiteturas de RNAs existente, a RNA clássica tem estrutura ou arquitetura constituída por três camadas de neurônios, sendo a camada de entrada, camada intermediária e

camada de saída. Os neurônios dessas camadas são interligados por conexões, de forma que os neurônios na camada de saída forneçam os resultados (HIMMELBLAU, 2008). Os pesos de cada conexão entre neurônios em camadas adjacentes são determinados durante o processo de aprendizagem. Uma vez treinada, a rede pode fornecer uma resposta com cálculos simples, que é uma das vantagens em vez de modelos diferenciais totalmente teóricos. Uma RNA adequada deve apresentar boa generalização para novos dados e eficiência computacional. Quanto menor a estrutura da rede, menor será a quantidade de parâmetros e dados necessários e portanto, menor será o tempo de identificação envolvido (ESTIATI *et al.*, 2016).

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os valores das variáveis de entrada fixados nos experimentos são apresentados nas Tabelas 4.1 – 4.3. A base de dados é composta pelos números de experimentos realizados para obter-se os targets da rede neural, sendo eles 39, 340 ou 392 pontos para as configuração de leito de jorro sem tubo draft, com tudo draft aberto e com tudo draft fechado respectivamente. A base de dados utilizada no presente trabalho foi obtida a partir de experimentos com partículas inertes realizados no Departamento de Engenharia Química da Universidade do País Basco, em Bilbao, na Espanha.

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada para o leito de jorro sem tubo draft (base de dados 39 pontos)

Variáveis	Níveis			
$\gamma$ (°)	28	36	45	
$D_0$ (cm)	4	5		
$H_0$ (cm)	14	20	25	30
$d_p$ (cm)	0,2	0,4		

Tabela 4.2 - Variáveis de entrada para o leito de jorro com tubo draft aberto (base de dados 340 pontos)

Variáveis	Níveis				
$\gamma$ (°)	28	36	45		
$D_0$ (cm)	4	5	6		
$H_0$ (cm)	14	20	25	30	
$d_p$ (cm)	0,068	0,2	0,4		1
$W_H$ (cm)	1,0	1,8	2,5		
$D_T$ (cm)	4,0	4,3	5,0	5,4	

Tabela 4.3 - Variáveis de entrada para o leito de jorro com tubo draft fechado (base de dados 392 pontos)

Variáveis	Níveis				
$\gamma$ (°)	28	36	45		
$D_0$ (cm)	0,03	0,04	0,05		
$H_0$ (cm)	0,11	0,14	0,2	0,25	0,30
$d_p$ (cm)	0,2	0,4			
$L_T$ (cm)	0,17	0,22	0,27		
$L_H$ (cm)	0,035	0,07	0,15		
$D_T$ (cm)	0,042	0,028	0,053		

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dentre as redes neurais treinadas neste trabalho, a rede que forneceu os melhores resultados foi a rede composta por 5 neurônios na camada intermediária. A Tabela 5.1 sintetiza os experimentos usados para verificar o desempenho da rede, enquanto a 5.2 mostra o erro relativo entre os valores estimados pelas redes neurais artificiais treinadas para a previsão de  $\Delta P_m$  e  $\Delta P_s$  (kPa) e os valores medidos pertencentes ao banco de dados de verificação.

Tabela 5.1 - Dados de verificação para leito de jorro convencional

Experimento	$\gamma$ (°)	$D_0$ (cm)	$H_0$ (cm)	$d_p$ (cm)
1	28	5	14	0,40
2	36	4	25	0,20
3	45	5	25	0,20

Tabela 5.2 - Verificação dos resultados para leito de jorro convencional (5 neurônios)

Experimento	$u_{ms}$ (m/s)			$\Delta P_m$ (kPa)			$\Delta P_s$ (kPa)		
	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo
1	141,00	151,15	7%	5,00	4,90	1%	2,20	2,30	2%
2	243,00	238,98	2%	6,90	7,00	2%	3,20	3,30	3%
3	170,00	148,62	13%	4,70	5,50	16%	2,80	2,70	3%

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.2, verifica-se que o erro relativo entre o valor medido e estimado foi satisfatório, o que mostra que a rede tem boa capacidade de prever valores  $u_{ms}$ ,  $\Delta P_m$  e  $\Delta P_s$ , fora do banco de dados usados em seu treinamento. Correlações empíricas típicas apresentam erro médio em torno de 20% (OLAZAR, 1992). O ajuste das redes de  $u_{ms}$  e dos  $\Delta P_s$  aos dados de treinamento, dado pelo coeficiente de correlação foi, respectivamente,  $R^2 = 0,9943$  e  $R^2 = 0,9849$ . Discussão semelhante pode ser feita para os resultados da rede usada no caso do draft aberto e sólido (Tabelas 5.3 à 5.6).

Tabela 5.3 - Dados para verificação da rede neural para leito de jorro com tubo draft aberto

Experimento	$\gamma$ (°)	$D_0$ (cm)	$H_0$ (cm)	$d_p$ (cm)	$W_H$ (cm)	$D_T$ (cm)
1	36	3	25	0,200	2,50	4,00
2	36	4	25	0,200	1,80	5,00
3	28	4	30	0,068	1,00	4,30
4	28	4	30	0,068	1,80	5,40
5	36	4	25	0,068	2,50	5,40
6	45	3	25	0,068	2,50	4,30
7	45	4	25	0,068	1,00	5,40

Tabela 5.4 - Verificação da rede neural para leito de jorro com tubo draft aberto (5 neurônios)

Experimento	$u_{ms}$ (m/s)			$\Delta P_m$ (kPa)			$\Delta P_s$ (kPa)		
	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo
1	322,00	322,38	0%	11,00	10,20	7%	1,70	1,50	12%
2	232,00	229,73	1%	9,90	10,00	2%	2,35	2,40	1%
3	113,00	114,25	1%	9,20	8,30	9%	4,40	4,10	6%
4	190,00	178,25	6%	7,50	9,00	20%	3,71	3,70	1%
5	99,00	107,19	8%	8,80	8,30	6%	3,10	2,70	11%
6	244,00	221,88	9%	6,40	6,30	2%	2,50	2,30	6%
7	157,00	171,17	9%	7,50	7,30	2%	3,20	3,00	5%

Tabela 5.5 - Dados de verificação da rede neural para leito de jorro com tubo draft sólido

Experimento	$\gamma$ (°)	$D_0$ (cm)	$H_0$ (cm)	$dp$ (cm)	$W_H$ (cm)	$D_T$ (cm)
1	28	0,04	0,25	0,2	0,22	0,15
2	45	0,04	0,11	0,2	0,22	0,15
3	45	0,03	0,20	0,4	0,22	0,15
4	28	0,05	0,30	0,4	0,27	0,15
5	36	0,03	0,14	0,2	0,17	0,07
6	28	0,04	0,11	0,2	0,27	0,15
7	45	0,04	0,20	0,2	0,17	0,15
8	28	0,04	0,14	0,4	0,17	0,15

Tabela 5.6 - Verificação da rede neural para leito de jorro com tubo draft fechado

Experimento	$u_{ms}$ (m/s)			$\Delta P_m$ (kPa)			$\Delta P_s$ (kPa)		
	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo	Medido	Estimado	Erro Relativo
1	190,00	181,27	5%	7,60	9,10	20%	2,30	2,60	12%
2	170,00	163,39	4%	3,80	4,00	6%	1,20	1,50	24%
3	320,00	315,83	1%	10,90	11,00	1%	5,60	6,65	19%
4	270,00	318,28	18%	13,80	14,60	6%	2,20	2,60	18%
5	157,10	177,07	13%	6,30	5,90	6%	1,40	1,30	10%
6	150,30	112,75	25%	3,90	4,30	9%	1,70	1,55	7%
7	214,40	212,68	1%	8,30	6,90	16%	2,00	1,80	10%
8	229,80	240,66	5%	4,60	5,60	21%	1,30	1,20	9%

## 6. CONCLUSÕES

Esse trabalho mostrou o desempenho de RNAs para a estimativa de velocidade de mínimo jorro, queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável em leitos de jorro de diferentes configurações: convencional (sem tubo draft), com tubo draft aberto e com tubo draft fechado e não poroso. Os resultados mostraram que foi possível projetar e usar uma RNA como ferramenta matemática para correlacionar tamanho de partícula inerte, ângulo de base cônica, diâmetro da coluna cilíndrica e características do tubo draft com as saídas desejadas. Embora os experimentos não tenham sido estatisticamente planejados, o funcionamento geral na verificação foi adequado.

## 7. NOMENCLATURA

$D_0$	Diâmetro da tubulação de entrada de gás, cm
$D_c$	Diâmetro da coluna cilíndrica, cm
$D_i$	Diâmetro da base do leito de jorro, cm
$d_p$	Diâmetro da partícula inerte, cm
$D_T$	Diâmetro do tubo draft, cm
$H_0$	Altura de leito estático, cm
$H_c$	Altura da seção cônica, cm
$L_H$	Altura da zona de arraste do tubo draft fechado, cm
$L_T$	Altura do tubo draft, m
RNA	Rede Neural Artificial
$u_{ms}$	Velocidade de mínimo jorro, m.s <sup>-1</sup>
$W_H$	Largura da abertura do tubo draft aberto, cm
$\Delta P_m$	Queda de pressão máxima, kPa
$\Delta P_s$	Queda de pressão de jorro estável, kPa
$\gamma$	Ângulo da base cônica, rad

## 8. REFERÊNCIAS

- ARSENIJEVIC, Z.L.; Grbavcic, Z.B.; Garic-Grulovic, R.V. (2004). Drying of suspensions in the draft tube spouted bed. *Can. Chem. Eng.* 82, 450-462.
- ESTIATI, I.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. Fitting performance of artificial neural networks and empirical correlations to estimate higher heating values of biomass. *Fuel (Guildford)*, v. 180, p. 377-383, 2016.
- FREIRE, FÁBIO B.; VIEIRA, GUSTAVO N. A.; FREIRE, JOSÉ T.; MUJUMDAR, ARUN S. Trends on Modeling and Sensing Approaches for Drying Control. *Drying Technology*, v. 32, 2014.
- HIMMELBLAU, D. M. Accounts of Experiences in the Application of Artificial Neural Networks in Chemical Engineering. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (16), 2008.
- MARRETO, R. N. Estudo da técnica de leito de jorro convencional para a secagem de microcápsulas de caseína e pectina. 2006. 198 p. Tese (Doutorado em Medicamentos e Cosméticos) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, P. E. *Spouted bed*, Ed. Academic Press, New York, 1974.

OLAZAR, M. et al. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. v. 31, p. 1784-1792, 1992.