



X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

*“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”*

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

## **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PREVISÕES DOS PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS VIA CORRELAÇÕES E VIA REDE NEURAL**

**KANEKO<sup>\*1</sup>, R. P.; PERAZZINI<sup>2</sup>, M. T. B.; FREIRE<sup>3</sup>, F. B.; FREIRE<sup>3</sup>, J. T.**

<sup>1</sup>Aluno do DEQ/UFSCar <sup>2</sup>Doutoranda do DEQ/UFSCar <sup>3</sup>Professor da DEQ/UFSCar  
Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos  
Endereço – UFSCar, km 235, São Carlos, CEP. 13565-905, SP,  
email: freire@ufscar.br

**RESUMO** – Neste trabalho realizou-se um estudo das previsões dos valores de velocidade de mínimo jorro e de queda de pressão máxima, para diferentes tipos de material inerte e configurações de leito de jorro, utilizando primeiramente as correlações consagradas da literatura e, posteriormente, comparando estes dados aos obtidos experimentalmente e via redes neurais. O procedimento experimental foi feito empregando-se dois leitos de jorro com geometrias distintas, sendo um com base cônica fixa de 60°, e uma coluna cilíndrica com 80 cm de altura e 20 cm de diâmetro. O outro leito era composto por uma coluna cilíndrica de 120 cm de altura e 30 cm de diâmetro, diâmetro de entrada de 3 cm, duas geometrias de bocal de entrada de gás e ângulos da base cônica de 45, 60 e 75°. Como inertes utilizaram-se esferas de vidro e partículas de polietileno. Os resultados obtidos mostraram que os valores dos parâmetros fluidodinâmicos estimados via rede neural apresentaram maior concordância aos dados experimentais do que os obtidos via correlação.

**Palavras chave:** leito de jorro, parâmetros fluidodinâmicos, modelagem empírica.

### **INTRODUÇÃO**

Desde o seu desenvolvimento por Gishler e Mathur em 1954, o leito de jorro tem sido amplamente estudado devido ao excelente contato fluido-partícula que este tipo de equipamento oferece, favorecendo a transferência de massa e de calor em diversos processos como secagem, pirólise e combustão.

O detalhamento fluidodinâmico é de extrema importância nas operações em leito de jorro. Tanto para definir a capacidade do soprador, como a carga do material

processado, condições de estabilidade do leito e aumento de escala. Deste modo, diversas correlações foram desenvolvidas com o intuito de prever parâmetros fluidodinâmicos como a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão em jorro estável. No entanto, as correlações existentes na literatura não abrangem muitas condições de operação e diferem significativamente uma das outras na estimativa de um mesmo parâmetro.

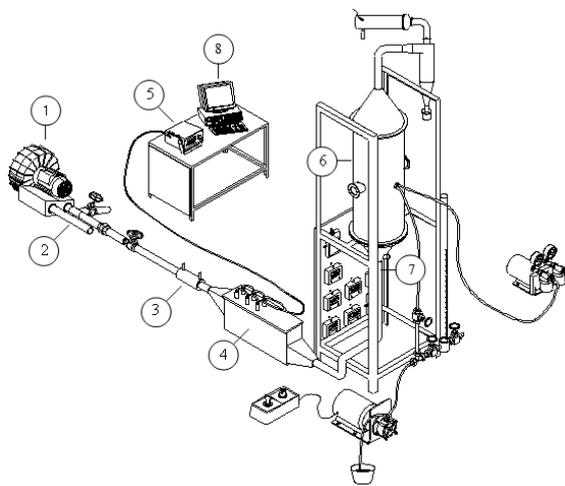
Dentro do contexto apresentado, o presente trabalho utilizou dados obtidos experimentalmente para o treinamento de duas redes neurais, uma para estimar a velocidade

de mínimo jorro e outra para a queda de pressão máxima. Além disso, foram testadas diversas correlações existentes na literatura para as diferentes condições operacionais usadas durante os ensaios experimentais. Os resultados obtidos foram comparados entre si.

## MATERIAIS E MÉTODOS

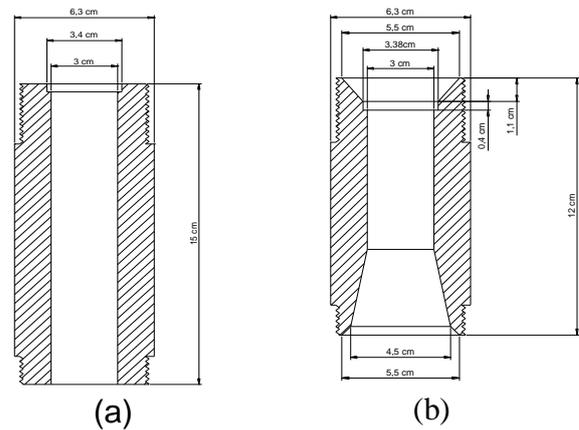
### Unidade Experimental

Neste trabalho foram utilizados dois leitos de jorro com características distintas, sendo que o primeiro leito tinha base cônica fixa de 60°, coluna cilíndrica com 80 cm de altura e 20 cm de diâmetro. O segundo leito era composto por uma coluna cilíndrica de 120 cm de altura, 30 cm de diâmetro, diâmetro de entrada de 3 cm, duas geometrias de bocal de entrada de gás e ângulos de base cônica de 45°, 60° e 75°. A unidade experimental incluía ainda um soprador (1); válvulas gaveta (2); medidor de vazão tipo Venturi (3); trocador de calor (4); controlador de temperatura (5); câmara de secagem (6); bocal de entrada de gás (7); sistema de aquisição de dados (8). A Figura 1 apresenta a configuração geral da unidade experimental utilizada.



**Figura 1 – Unidade Experimental. Bocal de Entrada de Ar**

Foram empregadas duas geometrias distintas de bocal de entrada de gás, conforme mostra a Figura 2.



**Figura 2 – Bocal de Entrada de Gás: (a) Bocal I e (b) Bocal II.**

As dimensões do bocal I (tubo reto) foram definidas com base no trabalho de Olazar *et al.* (1992), onde os autores constataram que a razão entre o diâmetro de entrada do bocal e o diâmetro de entrada da base cônica deve estar entre 0,5 e 0,83. O valor utilizado neste trabalho foi 0,6. O bocal II era do tipo Venturi, amplamente utilizado pelo Centro de Secagem de Pastas e Sementes (CS) do DEQ/UFSCar. Este possuía diâmetro de entrada igual ao diâmetro de entrada da base cônica inferior, dando assim continuidade à angulação da mesma. Já entre a conexão entre o bocal I e a base cônica inferior do leito existia um pequeno degrau, característica esta, dos bocais utilizados no trabalho de Olazar *et al.* (1992), San José *et al.* (2004).

### Partículas Inertes

Foram utilizadas como materiais inertes partículas de polietileno com aproximadamente 4,38mm de diâmetro e massa específica de  $930,5 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$ . Também foram empregadas esferas de vidro com diâmetro de 2,18 e 3,9mm e densidade de  $2512,6 \pm 0,1$  e  $2500 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. A escolha desses materiais foi baseada na disponibilidade destes no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar.

### Procedimento Experimental

A caracterização fluidodinâmica foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). Inicialmente colocou-se no leito uma quantidade de partículas inertes pré-determinadas. Em seguida esperou-se até que o sistema entrasse em regime permanente. Em

seguida, a vazão de ar foi ligeiramente reduzida até zero, sendo em seguida aumentada gradativamente. Ao se atingir a vazão máxima de operação, realizou-se o processo inverso onde a vazão de ar era reduzida gradativamente até zero.

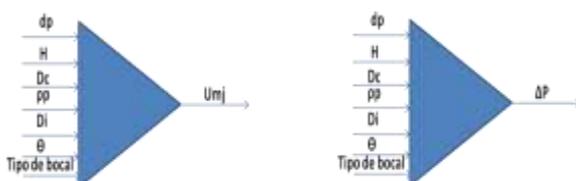
Este procedimento permitiu a determinação da queda de pressão e da velocidade de jorro mínimo para o leito em estudo. Foi utilizado um sistema de aquisição de dados com uma rotina em labVIEW que coletava 1024 valores a uma frequência de 500Hz. Eram fornecidos automaticamente a média e o desvio padrão dos dados coletados.

A temperatura do ar de entrada utilizada era correspondente a temperatura do ar ambiente que dependia das condições laboratoriais.

### Rede Neural

Foram utilizadas duas redes neurais artificiais (RNAs) para estimar os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro. Dentre as razões para o uso de redes neurais artificiais destacam-se, a simplicidade teórica da técnica, a facilidade em programá-las no MATLAB e os bons resultados relatados. As RNAs são essencialmente modelos computacionais, que simulam a função biológica dos neurônios do cérebro, podendo correlacionar bancos de dados entre si. A ideia de se utilizar redes neurais foi generalizar de forma sistemática a estimativa dos parâmetros fluidodinâmicos para diferentes configurações e possibilidades do equipamento a partir de um banco de dados. Desta forma, uma única RNA cumpriria o papel de diversas correlações juntas.

As RNAs foi desenvolvidas utilizando o software MATLAB 2007. Estas tinham 5 neurônios e para o treinamento destas utilizou-se sete variáveis de entrada e dois parâmetros de saída, conforme mostra a Figura 3.



**Figura 3 – Dados de Entrada e Saída das Redes Neurais.**

### Correlações da Literatura

As seguintes equações foram utilizadas para a estimação dos valores de velocidade mínima de jorro (EPSTEIN and GRACE, 2011).

*Mathur e Gishler (1955)*

$$U_{ms} = (d_p / D)(D_i / D)^{1/3} \sqrt{2gH(\rho_p - \rho) / \rho} \quad (1)$$

*Choi e Meisen (1992)*

$$U_{ms} = 18,5 \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{0,263} (H / D)^{-0,103} \left( \frac{d_p}{D} \right)^{1,19} \left( \frac{D_i}{D} \right)^{0,373} \sqrt{2gH} \quad (2)$$

*Olazar et al. (1992)*

$$U_{ms} = (d_p / D)(D_i / D)^{0,1} \sqrt{2gH(\rho_p - \rho) / \rho} \quad (3)$$

As Equações de 4 a 6 foram empregadas para o cálculo da queda de pressão (EPSTEIN and GRACE, 2011).

*Asenjo et al. (1977)*

$$\frac{-\Delta P_M}{\rho_b g H} = 1 + 2,8 \exp(-0,312H/D) \quad (4)$$

*Kmiec (1980)*

$$\frac{-\Delta P_M}{\rho_b g H} = 1 + 0,206 \exp(1,24H/D) \quad (5)$$

*Manurung (1964)*

$$\frac{-\Delta P_M}{\rho_b g H} = \left[ 0,8 + \frac{6,8}{\tan \gamma} \left( \frac{D_i}{D} \right) \right] - 34,4 \frac{d_p}{H} \quad (6)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os valores experimentais de velocidade mínima de jorro, os previstos via correlação e via rede neural, respectivamente.

Com base nos dados apresentados na Tabela 1 constatou-se que as correlações testadas não previram satisfatoriamente os parâmetros fluidodinâmicos para todas as geometrias de leito e materiais inertes utilizados. Dentre as correlações testadas as que apresentaram menores desvios entre os dados calculados e os dados experimentais foram as equações de Mathur e Gishler (1955) e de Choi e Meisen (1992), sendo que a primeira obteve os parâmetros fluidodinâmicos com os menores desvios. No entanto, para partículas de polietileno e esferas de vidro de

alta densidade ambas correlações não de até 100% do valor experimental. obtiveram uma boa previsão, obtendo desvios

**Tabela 1 – Comparação entre os valores de velocidade de mínimo jorro experimentais e obtidos via correlação e redes neurais.**

Leito	dp (m)	H (m)	m (Kg)	pp (kg/m <sup>3</sup> )	Θ (°)	Exp.	Eq. I	Eq. II	Eq. III	RNA
I*	0,00218	16,50	5,07	2512,60	75	0,23	0,28	0,301	0,47	0,26
I*	0,00218	18,00	7,00	2512,60	75	0,29	0,29	0,311	0,49	0,27
I*	0,00218	20,00	8,93	2512,60	75	0,31	0,31	0,325	0,52	0,31
I	0,00218	14,50	5,07	2512,60	75	0,21	0,26	0,286	0,44	0,16
I	0,00218	16,00	7,00	2512,60	75	0,25	0,28	0,297	0,47	0,27
I	0,00218	18,00	8,93	2512,60	75	0,29	0,29	0,311	0,49	0,28
I*	0,00218	18,00	5,07	2512,60	60	0,24	0,29	0,311	0,49	0,27
I*	0,00218	20,00	7,00	2512,60	60	0,29	0,31	0,325	0,52	0,29
I*	0,00218	21,50	8,93	2512,60	60	0,33	0,32	0,334	0,54	0,33
I	0,00218	16,00	5,07	2512,60	60	0,24	0,28	0,297	0,47	0,23
I	0,00218	18,00	7,00	2512,60	60	0,28	0,29	0,311	0,49	0,28
I	0,00218	19,50	8,93	2512,60	60	0,32	0,31	0,321	0,51	0,33
I*	0,00218	21,50	5,07	2512,60	45	0,28	0,32	0,334	0,54	0,25
I*	0,00218	24,00	7,00	2512,60	45	0,32	0,34	0,349	0,57	0,33
I*	0,00218	27,00	8,93	2512,60	45	0,37	0,36	0,366	0,61	0,36
I	0,00218	19,50	5,07	2512,60	45	0,27	0,31	0,321	0,51	0,28
I	0,00218	22,00	7,00	2512,60	45	0,32	0,33	0,337	0,55	0,32
I	0,00218	25,00	8,93	2512,60	45	0,36	0,35	0,355	0,58	0,35
II	0,00218	20,50	4,50	2512,60	60	0,47	0,51	0,593	0,82	0,21
II	0,0039	25,00	4,50	2500,00	60	0,51	1,00	1,279	1,62	0,60
II	0,0039	30,00	7,50	2500,00	60	0,50	1,10	1,375	1,78	0,53
II	0,00438	28,00	3,00	930,50	60	0,57	0,72	1,184	1,18	0,64
II	0,00438	40,00	5,00	930,50	60	0,65	0,87	1,365	1,41	0,62

\* Bocal I

A equação de Olazar foi a que apresentou maiores desvios para todas as geometrias testadas, sobretudo para o leito II onde a altura de partículas inertes eram maiores do que as do leito I devido ao seu menor diâmetro de coluna cilíndrica. Nas condições do leito II com partículas de vidro de 3,9 mm de diâmetro, seus desvios foram da ordem de 200%. Verificou-se ainda que os dados estimados via rede neural apresentaram melhor previsão dos valores de velocidade mínima de jorro do que os calculados via correlações. Isso, em grande parte por que, as RNAs foram projetadas segundo informação contendo mais parâmetros.

A Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores experimentais de queda de pressão máxima do leito de jorro, os previstos via correlação e via rede neural, respectivamente.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 2, verificou-se que assim como para os valores de velocidade mínima de jorro os dados previstos via rede neural apresentaram melhor concordância com os dados experimentais. Ficou claro que as correlações utilizadas para a previsão dos valores de queda de pressão máxima apresentaram valores mais distantes dos dados experimentais quando comparados para o cálculo da velocidade mínima de jorro. A equação de Kmiec (1980) foi a que obteve as melhores previsões, inclusive para as partículas de vidro com diâmetro de 3,9 mm onde as demais correlações obtiveram desvios superiores a 100%. A correlação de Asenjo *et al.* (1977) foi a que obteve resultados mais distantes daqueles encontrados experimentalmente.

Assim como verificado anteriormente, as correlações testadas neste trabalho utilizaram no máximo quatro das sete variáveis estudadas experimentalmente. Deste modo, não usam as demais variáveis significativas no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, como o ângulo da base cônica, a

geometria do bocal de entrada de gás, e a massa de partículas inertes. Para o leito II todas as correlações testadas obtiveram desvios maiores que aqueles obtidos no leito I, isso pode ser explicado pelo fato da utilização de uma maior altura de leito estático para uma geometria muito menor de leito.

**Tabela 2 – Comparação entre os valores de queda de pressão experimentais e obtidos via correlação e redes neurais.**

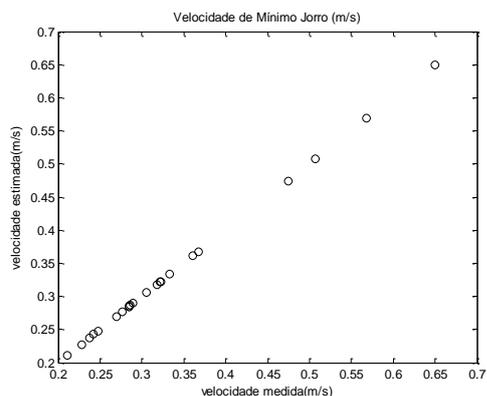
Leito	dp (m)	H (m)	m (Kg)	pp (kg/m <sup>3</sup> )	θ (°)	Exp.	Eq. 4	Eq. 5	Eq. 6	RNA
I*	0,00218	16,50	5,07	2512,60	45	2598,40	7089,40	2970,94	1615,50	3088,10
I*	0,00218	18,00	7,00	2512,60	45	3168,59	8298,62	3581,00	2006,44	3135,40
I*	0,00218	20,00	8,93	2512,60	45	3400,86	9017,33	4050,83	2326,78	2796,00
I	0,00218	14,50	5,07	2512,60	45	2002,32	7194,03	2902,70	1483,17	1353,00
I	0,00218	16,00	7,00	2512,60	45	2319,86	9823,96	4077,60	2189,07	2215,50
I	0,00218	18,00	8,93	2512,60	45	2681,15	13473,94	5814,25	3257,73	2858,90
I*	0,00218	18,00	5,07	2512,60	60	2062,38	7012,33	3025,95	5294,35	2342,38
I*	0,00218	20,00	7,00	2512,60	60	2573,65	9542,42	4286,72	7431,17	2675,60
I*	0,00218	21,50	8,93	2512,60	60	3061,83	11017,62	5105,65	8762,22	4543,10
I	0,00218	16,00	5,07	2512,60	60	1680,44	7115,35	2953,35	5184,42	2546,20
I	0,00218	18,00	7,00	2512,60	60	3459,55	9681,72	4177,84	7309,75	2805,50
I	0,00218	19,50	8,93	2512,60	60	3230,53	12217,48	5432,82	9444,30	3135,40
I*	0,00218	21,50	5,07	2512,60	75	3702,27	6837,13	3168,38	2459,50	3751,90
I*	0,00218	24,00	7,00	2512,60	75	4599,23	9272,35	4533,43	3289,87	4610,50
I*	0,00218	27,00	8,93	2512,60	75	5061,43	11579,72	6056,02	4067,86	5584,30
I	0,00218	19,50	5,07	2512,60	75	2947,49	6936,46	3084,48	2535,02	34822,00
I	0,00218	22,00	7,00	2512,60	75	3499,99	9405,98	4404,98	3372,66	3714,30
I	0,00218	25,00	8,93	2512,60	75	3922,95	11744,95	5870,52	4150,47	3832,20
II	0,00218	20,50	4,50	2512,60	60	6044,57	11155,80	6377,57	15614,17	9393,70
II	0,0039	25,00	4,50	2500,00	60	5882,26	8248,09	5612,82	17898,80	8228,50
II	0,0039	30,00	7,50	2500,00	60	8325,76	11161,08	9417,22	22136,62	7733,00
II	0,00438	28,00	3,00	930,50	60	3191,50	4805,36	3710,35	7457,60	2463,70
II	0,00438	40,00	5,00	930,50	60	5400,26	5712,64	7905,33	11243,15	3474,30

\* Bocal I

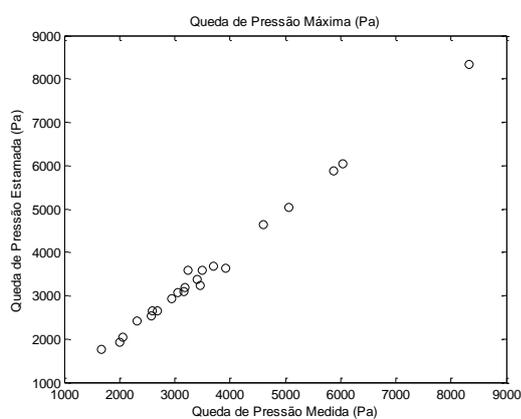
As redes neurais de 5 neurônios desenvolvidas neste trabalho obtiveram resultados muito próximos daqueles encontrados experimentalmente para as geometrias de leito estudadas. Tais resultados quando comparados com os obtidos via correlações ressaltaram as vantagens de se utilizar as RNAs para previsão fluidodinâmica

do leito. As RNAs permitiram boas estimativas dentro da faixa de operação estudada.

As Figuras 6 e 7 apresentam os valores dos parâmetros fluidodinâmicos previstos via rede neural pelos dados determinados experimentalmente.



**Figura 6 – Dados experimentais e estimados pela rede neural para a velocidade mínima de jorro.**



**Figura 7 – Dados experimentais e estimados pela rede neural para a queda de pressão máxima.**

Os dados apresentados nas Figuras 6 e 7 comprovam que os valores tanto da velocidade mínima de jorro quanto da queda de pressão máxima do leito determinados via rede neural apresentaram boa concordância com os dados experimentais para as condições de operação estudadas.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se a capacidade de previsão dos dados de velocidade mínima de jorro e de queda de pressão máxima do leito via correlação e redes neurais. Constatou-se que as correlações testadas não apresentaram boa previsão para as geometrias de leito testadas. Verificou-se também que a correlação que apresentou melhor concordância com os dados experimentais foi a Mathur e Gishler (1955) para o cálculo da velocidade mínima de jorro e a Kmiec (1980) para a queda de pressão máxima do leito.

Como esperado os resultados mostraram ainda que valores estimados via rede neural se aproximaram mais dos valores experimentais do que os calculados via correlação, as redes neurais são estruturas mais complexas e elaboradas do que uma simples correlação.

## NOMENCLATURA

D	Diâmetro da coluna cilíndrica	m
$D_i$	Diâmetro do bocal	m
$d_p$	Diâmetro da partícula	m
g	Gravidade	$m/s^2$
H	Altura do leito estático	m
m	Massa de partículas inertes	Kg
$U_{mj}$	Velocidade de mínimo jorro	m/s
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Queda de Pressão Máxima	Pa
P	Pressão	Pa
$\rho$	Densidade do ar	$Kg/m^3$
$\rho_b$	Densidade de Bulk	$Kg/m^3$
$\rho_p$	Densidade da partícula	$Kg/m^3$
$\theta$	Ângulo da base cônica	-

## REFERÊNCIAS

- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (2011), Spouted and spout-fluid bed: fundamentals and applications. Editora Cambridge University Press, 340 p.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. (1974), Spouted Beds. Editora New York: Academic Press, 304 p.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. (1992), Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. Industrial Engineering Chemical Research, 31, p.1784-1792.
- SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; IZQUIERDO, M. A.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. (2004), Solid trajectories and cycle times in spouted beds. Industrial Engineering Chemical Research, 43, p.3433-3438.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao CNPq pelo apoio financeiro.