



Formulação adimensional do fluxo em injetores de fertilizantes

Iran E. Lima Neto¹

RESUMO

Nesta pesquisa, desenvolveu-se uma solução analítica para previsão e análise do desempenho de injetores de fertilizantes. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, foram aplicadas ao processo de mistura dos fluidos de sucção e motriz através de uma formulação adimensional. Injetores de alto desempenho foram avaliados experimentalmente, utilizando-se água, tanto como fluido motriz como de sucção, de forma que os coeficientes de perda de carga em cada componente desses equipamentos, fossem obtidos através de calibração. A formulação proposta apresentou estreita concordância com os dados experimentais e forneceu valores adequados para os coeficientes de perda de carga implícitos nas equações. Através de curvas teóricas de rendimento, geradas a partir dos coeficientes de perda de carga calibrados, constatou-se que, quanto maior é a densidade do fluido de sucção menores são as faixas de vazão de operação e os rendimentos alcançados.

Palavras-chave: fertirrigação, quimigação, performance, solução analítica

Dimensionless formulation of flow in fertilizer injectors

ABSTRACT

An analytical solution was developed in this research to predict and evaluate the performance of fertilizer injectors. The conservation equations for mass, momentum and energy were applied to the mixing process between the driving and suction fluids through a dimensionless formulation. High performance injectors were evaluated experimentally using water both as driving and suction fluids in order to determine the head-loss coefficients for each component of these accessories through calibration. The proposed solution presented excellent agreement with the experimental data and achieved adequate values for the implicit head-loss coefficients in the equations. Theoretical efficiency curves generated on the basis of these coefficients showed that the higher the density of the suction fluid, the lower the ranges of flow ratio and efficiencies reached.

Key words: fertigation, chemigation, efficiency, analytical solution

¹ Doutorando em Recursos Hídricos, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, T6G 2G7. Fone: (780) 492-1465. E-mail: flimaneto@ualberta.ca

INTRODUÇÃO

Injetores são bombas a jato, utilizadas nos mais diversos ramos da engenharia para realizar o transporte de líquidos, gases ou mesmo sólidos granulares. Na engenharia agrícola, esses equipamentos são largamente empregados para a aplicação de fertilizantes via água de irrigação. Conforme Miranda & Pires (2001), esta técnica proporciona a economia de mão-de-obra e a minimização do trânsito na lavoura evitando, deste modo, a disseminação de esporos de fungos, sementes de plantas daninhas, ovos de insetos e a compactação do solo.

Diversas pesquisas experimentais têm sido desenvolvidas com o objetivo de se obter informações técnicas a respeito do funcionamento dos injetores. Ferreira (1994) e Rojas (1995), por exemplo, avaliaram experimentalmente o desempenho de injetores do tipo Venturi, disponíveis no mercado e construídos em laboratório, respectivamente, utilizando água como fluido motriz e de sucção, mas ainda se carece de ferramentas, como métodos analíticos ou numéricos, para se avaliar o desempenho de injetores de fertilizantes sob as mais diversas condições de operação e configurações geométricas desses equipamentos. Em virtude disto, geralmente se utilizam dados de catálogos comerciais de injetores para se projetar e operar os sistemas de aplicação de fertilizantes, porém as capacidades de sucção apresentadas nesses catálogos normalmente se referem à água pura; logo, como neste tipo de técnica as soluções de produtos químicos utilizadas apresentam, em geral, densidades superiores a r da água usada para irrigação, as taxas de aplicação de fertilizantes podem ser significativamente reduzidas em campo, caso a diferença de densidade não seja levada em consideração no dimensionamento do injetor.

Nesta pesquisa, objetivou-se desenvolver uma formulação adimensional, baseada nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, para simular a performance de injetores de fertilizantes para diferentes relações entre as áreas do jato e da garganta, vazões e densidades dos fluidos de sucção e motriz, e coeficientes de perda de carga em cada componente desses aparelhos.

MATERIAL E MÉTODOS

Similares aos injetores do tipo Venturi desenvolvidos por Rojas (1995), os injetores utilizados neste trabalho (Figura 1) se compõem de duas peças torneadas em tarugos de PVC, representadas pelas partes hachuradas, inseridas em uma

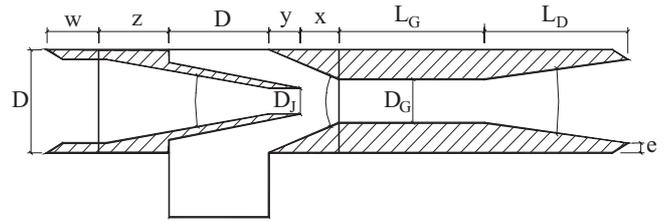


Figura 1. Injetor de PVC

conexão do tipo tê de mesmo material.

A Tabela 1 mostra os parâmetros geométricos adotados para cada injetor, dimensionados de acordo com os valores recomendados por Mueller (1964), Sanger (1970) e Lima Neto (2001).

Esses injetores apresentam rendimento entre o dobro e o triplo do rendimento dos injetores do tipo Venturi, normalmente empregados nos sistemas de fertirrigação (Lima Neto & Porto, 2004).

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo – USP. Os equipamentos utilizados, foram: bomba centrífuga, com capacidade de $8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e altura manométrica de $60 \text{ mH}_2\text{O}$; dois medidores de vazão digitais, com transdutores do tipo magnético indutivo, com capacidade de 7 e $8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ambos com precisão de $\pm 1\%$; dois manômetros com leitura digital, precisão de duas casas decimais e fundo de escala de $60 \text{ mH}_2\text{O}$; vacuômetro de coluna de mercúrio, com escala em milímetros e fundo de escala de 750 mmHg ; dois tanques de amianto, com capacidade de 100 L cada um, e registros de gaveta, globo e agulha.

O esquema de montagem experimental é apresentado na Figura 2. A bomba (1) capta a água do tanque de alimentação e a conduz até o injetor (8). O fluido secundário é elevado do tanque de sucção (9), sendo o tanque de descarga, então, abastecido pela vazão resultante. O tanque de sucção (9) é alimentado pelo tanque auxiliar (10) para evitar problemas de turbulência na sucção. A bomba auxiliar abastece tanto o tanque auxiliar (10) como o tanque de alimentação. A água do tanque de descarga retorna ao reservatório da bomba auxiliar, através de um extravasor. O comprimento total da linha varia de acordo com o comprimento C de cada injetor.

Utilizando-se água como fluidos motriz e de sucção, fixaram-se as cargas de pressão no primeiro manômetro (ponto A, Figura 2) e na sucção do injetor (ponto de tomada de pressão no tê, Figura 2) em, respectivamente, 50 e

Tabela 1. Parâmetros geométricos adotados para cada injetor

Injetor	D (mm)	$R = (D_j/D_g)^2$	α	β	θ	D_j/D	e/D	L_g/D	L_D/D	w/D	x/D	y/D	z/D
1	25,0	0,25			$38,3^\circ$			2,50	1,78			0,47	0,72
2	25,0	0,35			$43,9^\circ$			2,10	2,24			0,47	0,72
3	25,0	0,53			$49,0^\circ$			1,72	2,67			0,47	0,72
4	32,0	0,25	20°	10°	$39,2^\circ$	0,25	0,094	2,50	1,78	0,94	0,25	0,45	0,70
5	32,0	0,35			$44,7^\circ$			2,11	2,23			0,45	0,70
6	32,0	0,53			$50,0^\circ$			1,72	2,67			0,45	0,70

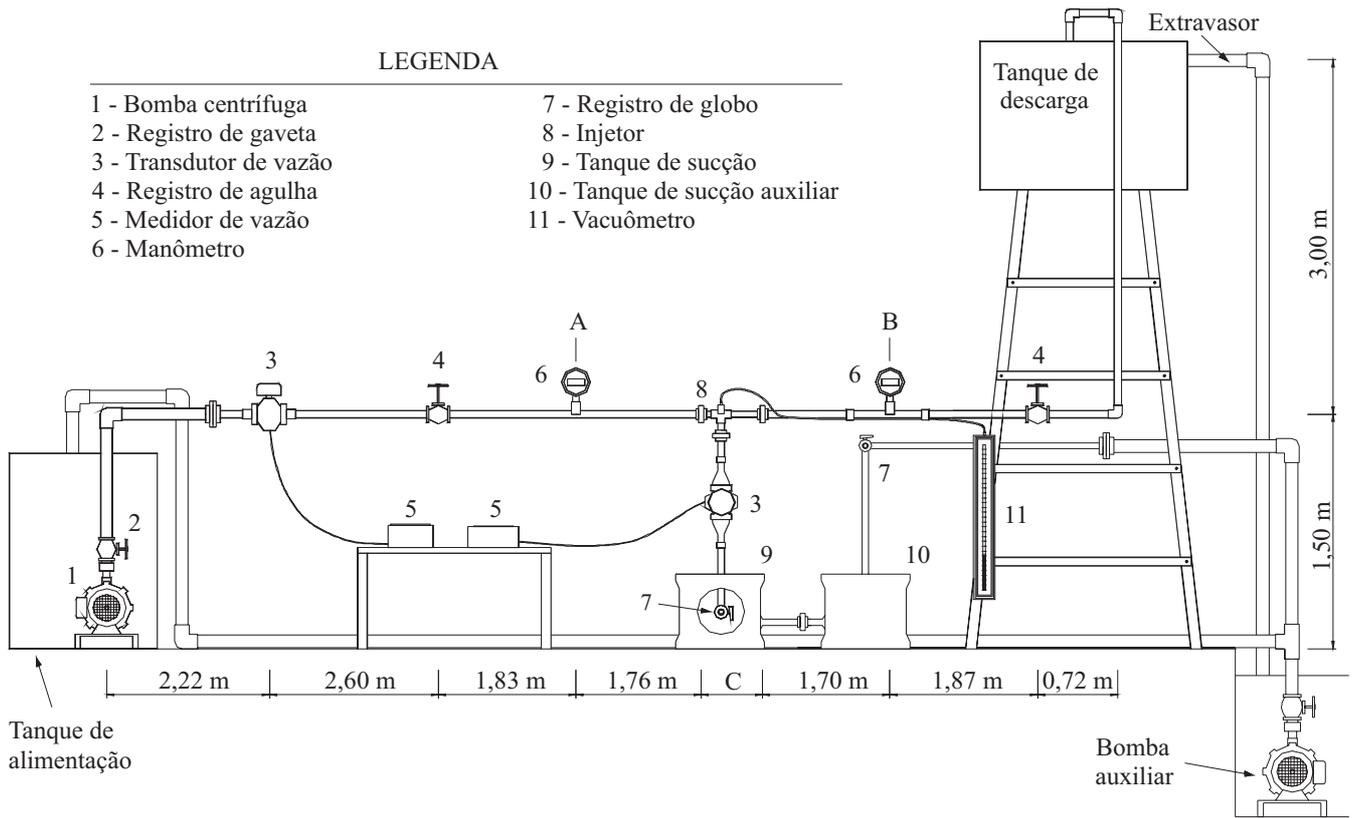


Figura 2. Esquema de montagem experimental

-1,60 mH₂O. Através de ajustes nos registros de sucção e de descarga, variou-se a carga de pressão no segundo manômetro (ponto B, Figura 2) do seu valor mínimo, quando o registro de descarga estava totalmente aberto, até o seu valor máximo, quando a vazão de sucção era nula.

Medidas as vazões de alimentação e sucção e as pressões nos pontos A, B e na sucção do injetor, as cargas nas seções 1, 2 e 3 (Figura 3) foram calculadas pela equação de energia, sendo o coeficiente de atrito calculado pela fórmula de Swamee & Jain (1976), considerando-se viscosidade cinemática igual a 10⁻⁶ m² s⁻¹ (água a 20 °C) e rugosidade absoluta igual a 0,0015 mm (tubos de PVC).

Logo, a equação do rendimento pode ser obtida através de um balanço de potência entre as seções 1, 2 e 3 (Figura 3) e expressa em termos da relação de vazão, entre os fluidos de sucção e motriz (M) e da relação de carga (N):

$$\eta = MN = \frac{Q_2}{Q_1} \frac{H_3 - H_2}{H_1 - H_3} \quad (1)$$

Aplicando-se as equações de continuidade, quantidade de movimento e energia através das seções 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 3), obter-se-á uma fórmula teórica adimensional para o rendimento em função de M e N', onde N' é a relação de carga teórica expressa em termos de M, R, das densidades dos fluidos motriz (d₁), de sucção (d₂) e combinado (d₃), e dos coeficientes de perda de carga no bocal de alimentação (K_B), na câmara de sucção (K_S), na garganta (K_G) e no difusor (K_D):

$$N' = \frac{d_1 [2R] + d_2 \left[\frac{M^2 R^2}{1-R} \left(2 - \frac{1+K_S}{1-R} \right) \right] - d_3 \left[R^2 (1+M)^2 \left(1 + \frac{K_G + K_D}{4} \right) + \frac{M^2 R^2}{(1-R)^2} \left(\frac{K_G}{4} \right) \right]}{d_1 [1+K_B - 2R] - d_2 \left[\frac{2M^2 R^2}{1-R} \right] + d_3 \left[R^2 (1+M)^2 \left(1 + \frac{K_G + K_D}{4} \right) + \frac{M^2 R^2}{(1-R)^2} \left(\frac{K_G}{4} \right) \right]} \quad (2)$$

em que a densidade do fluido combinado é expressa por:

$$d_3 = \frac{d_1 Q_1 + d_2 Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{d_1 + d_2 M}{1 + M} \quad (3)$$

Na derivação da Eq. 2, a velocidade adotada para cálculo da perda de carga na garganta foi a média geométrica entre a velocidade do fluido de sucção na seção 4 e a velocidade

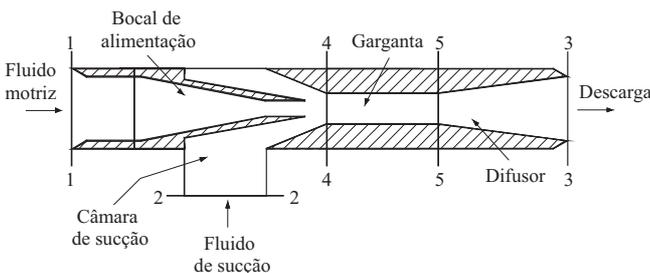


Figura 3. Seções do injetor

do fluido combinado na seção 5 (Figura 3), uma vez que, para uma mesma vazão total, a perda de carga por atrito na garganta é menor que a perda em um tubo com as mesmas dimensões (Mueller, 1964; Lima Neto, 2001); além disso, considerou-se que o jato proveniente do bocal de alimentação sofre influência da vazão de sucção apenas na entrada da garganta, que a pressão é uniformemente distribuída na entrada e na saída da garganta e que os fluidos de sucção e motriz são incompressíveis e de mesma temperatura e viscosidade cinemática (para estudos sobre injetores tendo em vista o efeito da compressibilidade, temperatura e viscosidade dos fluidos (Cunningham, 1995 e Yuan et al., 2000).

Logo, substituindo-se N por N' na Eq. 1, o rendimento teórico será expresso por:

$$\eta' = MN' \tag{4}$$

Os valores para os coeficientes de perda de carga K_B , K_S , K_G e K_D foram calibrados através de minimização do quadrado médio dos desvios entre os rendimentos medidos (η) e calculados (η'). A partir desses coeficientes, geraram-se curvas teóricas de rendimento, considerando-se água como fluido motriz e fluidos de sucção de diferentes densidades.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentados os ajustes das curvas teóricas de rendimento aos dados experimentais, para os injetores de diâmetros nominais D de 25 mm (injetores 1, 2 e 3)

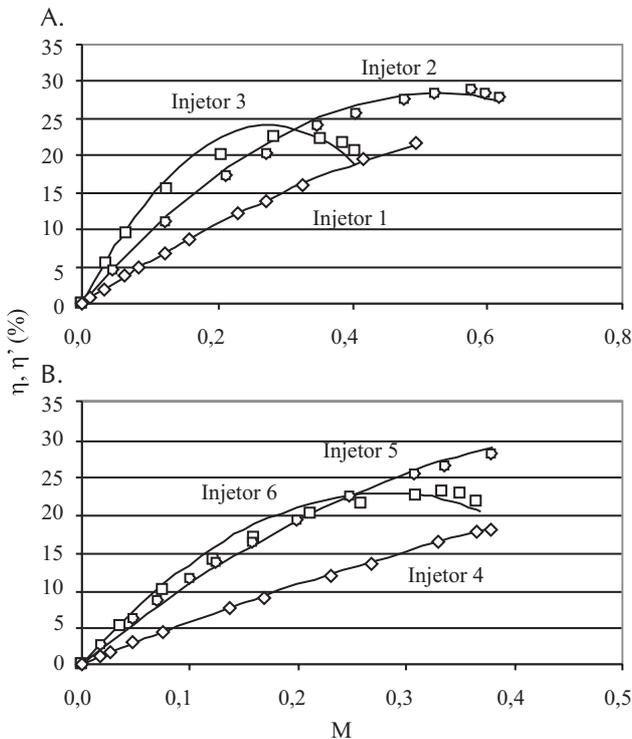


Figura 4. Ajuste das curvas teóricas (η') aos dados experimentais (η) para os injetores de 25 mm (A) e de 32 mm (B)

e de 32 mm (injetores 4, 5 e 6).

Os coeficientes de determinação entre as curvas teóricas e experimentais para os injetores 1, 2 e 3 (Figura 4A) foram, respectivamente, 0,999; 0,997 e 0,987. A calibração forneceu coeficientes de perda de carga no bocal de alimentação (K_B) de 0,15; 0,10 e 0,16, para os injetores 1, 2 e 3, respectivamente. Os coeficientes de perda de carga na câmara de sucção (K_S), na garganta (K_G) e no difusor (K_D) foram, respectivamente, iguais a 0,90; 0,06 e 0,10, para os três injetores.

Os coeficientes de determinação entre as curvas teóricas e experimentais para os injetores 4, 5 e 6 (Figura 4B) foram, respectivamente, 0,999; 0,999 e 0,990. A calibração forneceu coeficientes de perda de carga no bocal de alimentação (K_B) de 0,15; 0,04 e 0,19, para os injetores 4, 5 e 6, respectivamente, sendo os demais coeficientes de perda de carga iguais aos obtidos com os injetores 1, 2 e 3.

Os coeficientes de perda de carga obtidos estão de acordo com os valores sugeridos por Engel (1963), Mueller (1964) e Silvester & Mueller (1968) para injetores similares aos utilizados nesta pesquisa, o que leva a crer que as considerações e aproximações realizadas na derivação da Eq. 2 são pertinentes.

Na Figura 5 são apresentadas curvas teóricas $N' \times M$ e $\eta' \times M$ geradas para diversas densidades do fluido

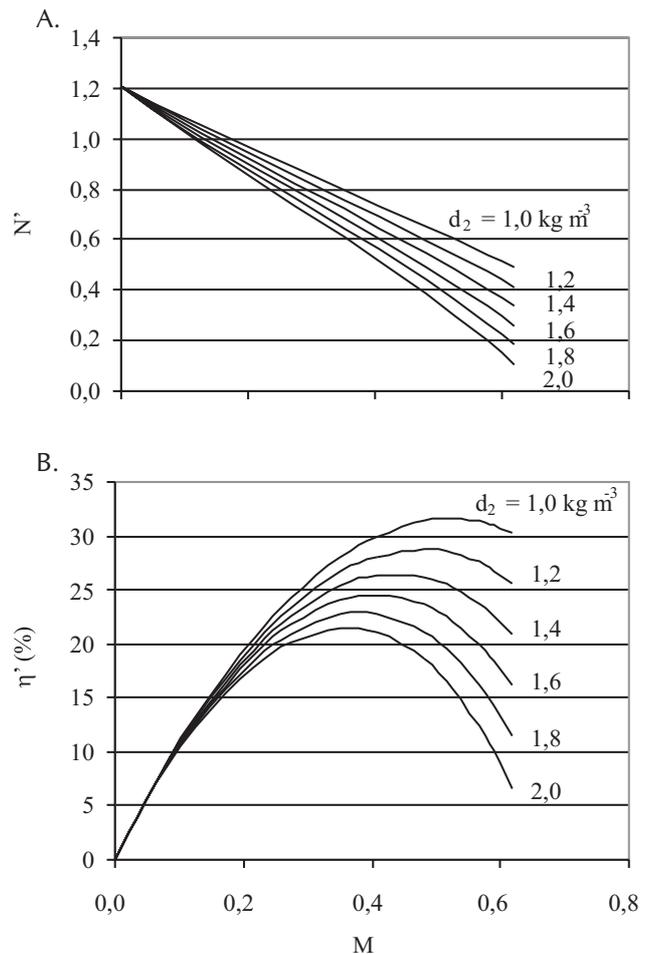


Figura 5. Curvas $N' \times M$ (A) e $\eta' \times M$ (B) para $d_1 = 1,0 \text{ kg m}^{-3}$; $d_2 = 1,0\text{--}2,0 \text{ kg m}^{-3}$; $K_B = 0,04$; $K_S = 0,90$; $K_G = 0,06$ e $K_D = 0,10$

de sucção (d_2), considerando-se água como fluido motriz ($d_1 = 1,0 \text{ kg m}^{-3}$) e os coeficientes K_B , K_S , K_G e K_D obtidos com o injetor 5, aquele que produz menor perda de carga.

Nota-se, na Figura 5A, que a relação de carga teórica N' é inversamente proporcional à relação de vazão M e à densidade do fluido de sucção d_2 ; logo, para mesmas relações de vazão, quanto maior a densidade do fluido de sucção, maiores também são as perdas de carga e, conseqüentemente, menores as pressões disponíveis na linha de irrigação à jusante do injetor.

Verifica-se, na Figura 5B, que maiores densidades do fluido de sucção d_2 reduzem não apenas o rendimento dos injetores η' mas, também, as faixas de vazão de operação, isto é, para $d_2 = 2,0 \text{ kg m}^{-3}$, por exemplo, o máximo rendimento é da ordem de 22% (para M em torno de 0,35), enquanto para $d_2 = 1,0 \text{ kg m}^{-3}$, o máximo rendimento é da ordem de 32% (para M em torno de 0,53).

CONCLUSÕES

1. A formulação adimensional proposta nesta pesquisa para avaliar o rendimento de injetores de fertilizantes, apresentou excelente ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação variando entre 0,987 e 0,999, e valores coerentes para os coeficientes de perda de carga calibrados.

2. As curvas teóricas de rendimento geradas, permitiram evidenciar-se que, quanto maior a densidade da solução de fertilizante a ser misturada à água de irrigação, menores são as faixas de vazão de operação e os rendimentos alcançados.

3. A formulação proposta também pode ser utilizada para simular a performance de injetores com outras configurações geométricas, como os do tipo Venturi; no entanto, necessita-se avaliar, previamente, as perdas de carga em cada componente de tais equipamentos.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos concedida, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado

de São Paulo – FAPESP, pela contribuição financeira para aquisição dos materiais necessários à realização dos experimentos.

LITERATURA CITADA

- Cunningham, R. G. Liquid jet pumps for two-phase flows. *Journal of Fluids Engineering ASME*, New York, v.117, n.2, p.309-316, 1995.
- Engel, M. O. Some problems in the design and operation of jet ejectors. *Proceedings, Institute of Mechanical Engineering*, New York, v.177, n.13, p.347-357, 1963.
- Ferreira, J. O. P. Caracterização hidráulica de dois injetores de fertilizantes do tipo Venturi. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994. 76p. Dissertação Mestrado
- Lima Neto, I. E. Desenvolvimento e avaliação experimental de ejetores de baixo custo. São Carlos: EESC/USP, 2001. 107p. Dissertação Mestrado
- Lima Neto, I. E.; Porto, R. M. Performance of low-cost ejectors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, New York, v.130, n.2, p.122-128, 2004.
- Miranda, J. H.; Pires, R. C. M. Irrigação. Jaboticabal: FUNEPE, 2001. 410p.
- Mueller, N. H. G. Water jet pump. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, New York, v.90, n.3, p.83-113, 1964.
- Rojas, R. N. Z. Desenvolvimento e avaliação de dois injetores de fertilizantes tipo Venturi. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 67p. Dissertação Mestrado
- Sanger, N. L. An experimental investigation of several low-area-ratio water jet pumps. *Journal of Basic Engineering ASME*, New York, v.92, n.1, p.11-20, 1970.
- Silvester, R.; Mueller, N. H. G. Design data for the liquid-liquid jet pump. *Houille Blanche*, Paris, v.6, n.2, p.129-162, 1968.
- Swamee, P. K.; Jain, A. K. Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, New York, v.102, n.5, p.627-664, 1976.
- Yuan, Z.; Choi, C. Y.; Waller, P. M.; Colaizzi, P. Effects of liquid temperature and viscosity on Venturi injectors. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.43, n.6, p.1441-1447, 2000.