

CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE ATRITO EM EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA PARA TUBO PVC DN32-PN60

Júlio César Neves dos Santos¹, Guilherme Nascimento Buiati², Cleene Agostinho de Lima³,
Marcos Paulo Lima Rezende², Cláudio Rezende Mendonça Filho², Diogo Martins Felix²

RESUMO: Para garantir a eficiência e sustentabilidade de sistemas de irrigação, é fundamental o correto dimensionamento hidráulico das tubulações, minimizando as perdas de carga. Este trabalho teve como objetivo calibrar os coeficientes de atrito das equações de Hazen-Williams e Flamant e desenvolver uma equação empírica específica para estimativa de perdas de carga em conduto de PVC DN32 e PN60. O experimento foi realizado em laboratório com piezômetro diferencial pressurizado, utilizando vazões que resultaram em velocidades entre 0,37 e 3,15 m/s. Observou-se que o uso do coeficiente $C = 140$ da equação de Hazen-Williams, recomendado na literatura, superestima as perdas em até 62% para velocidades superiores a 2,5 m/s. Após calibração, o valor de $C = 176$ apresentou excelente ajuste ($NSE = 0,995$). De forma similar, o coeficiente b da equação de Flamant foi ajustado de 0,00012 para 0,000096, também com ótimo desempenho ($NSE = 0,997$). Além disso, foi desenvolvida uma equação empírica baseada nos dados experimentais: $J = 0,0204V^2 + 0,0125V$, válida para velocidades entre 0,4 e 3,0 m/s, com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9974$). Conclui-se que a calibração dos coeficientes dos três modelos ajustados apresentou alta correlação com os dados medidos, resultando em melhora significativa na acurácia das estimativas de perda de carga, o que contribui para o dimensionamento eficiente e econômico de sistemas hidráulicos agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: hidrodinâmica, pressão, hidráulica agrícola.

¹ Prof. Doutor em Eng. Agrícola, Instituto Federal do Triângulo Mineiro, IFTM-Campus Uberlândia-MG, e-mail: juliosantos@iftm.edu.br

² Discente de Agronomia, Instituto Federal do Triângulo Mineiro, IFTM-Campus Uberlândia-MG.

³ Profa. Doutora em Eng. Agrícola, Centro Universitário do Triângulo, UNITRI-Campus Uberlândia-MG.

CALIBRATION OF FRICTION COEFFICIENTS IN HEAD LOSS EQUATIONS FOR PVC PIPE DN32-PN60

ABSTRACT: To ensure the efficiency and sustainability of irrigation systems, proper hydraulic design of pipelines is essential to minimize head losses. This study aimed to calibrate the friction coefficients of the Hazen-Williams and Flamant equations and to develop a specific empirical equation for estimating head losses in PVC DN32-PN60 pipes. The experiment was conducted in a laboratory using a pressurized differential piezometer, with flow rates generating velocities between 0.37 and 3.15 m/s. It was observed that using the coefficient $C = 140$ in the Hazen-Williams equation, as recommended in the literature, overestimates head losses by up to 62% at velocities above 2.5 m/s. After calibration, the coefficient $C = 176$ showed excellent fit (NSE = 0.995). Similarly, the coefficient b in the Flamant equation was adjusted from 0.00012 to 0.000096, also with outstanding performance (NSE = 0.997). Additionally, an empirical equation was developed based on experimental data: $J = 0.0204V^2 + 0.0125V$, valid for velocities between 0.4 and 3.0 m/s, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.9974$). It is concluded that the calibration of the coefficients in the three adjusted models showed high correlation with the measured data, resulting in a significant improvement in the accuracy of head loss estimates, thereby contributing to the efficient and cost-effective design of agricultural hydraulic systems.

KEYWORDS: hydrodynamics, pressure, agricultural hydraulics.

INTRODUÇÃO

A técnica de irrigação tem como finalidade suprir as necessidades hídricas das culturas agrícolas por meio da aplicação de água na forma, quantidade e momento adequados, considerando-se as condições climáticas, edáficas e características da cultura. Essa prática visa garantir o desenvolvimento ideal das plantas, promovendo um ambiente propício para o pleno aproveitamento do potencial genético das espécies cultivadas (FERREIRA et al., 2021).

A eficiência de um sistema de irrigação depende, entre outros fatores, do correto dimensionamento hidráulico de seus componentes. Um dos principais desafios no projeto de sistemas pressurizados é encontrar um equilíbrio entre perdas de carga e custos de implantação: tubulações com diâmetros subdimensionados aumentam o consumo de energia, enquanto tubulações superdimensionadas elevam o custo do sistema (SILVA et al., 2022). Dessa forma,

torna-se essencial que o projetista considere as perdas de carga ao longo do sistema, com vistas à maximização da eficiência energética (SOUSA; DANTAS NETO, 2014).

Para estimar as perdas de carga em tubulações, diversas equações empíricas vêm sendo utilizadas, entre as quais se destacam as fórmulas de Hazen-Williams e Flamant. Tais equações incorporam coeficientes de atrito que variam conforme o material e a rugosidade interna das tubulações. No entanto, com os avanços tecnológicos na fabricação de tubos, incluindo superfícies internas mais lisas e a redução do número de conexões por meio da produção de tubos mais longos, surgem dúvidas sobre a aplicabilidade dessas fórmulas desenvolvidas em contextos anteriores (PEREIRA et al., 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo calibrar o coeficiente de atrito C da equação de Hazen-Williams e o coeficiente b da equação de Flamant, além de desenvolver uma equação empírica específica para a estimativa de perdas de carga em tubulações de diâmetro nominal DN32 e classe de pressão PN60.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Uberlândia. Foram mensuradas as perdas de carga, em função de diferentes velocidades de fluxo de água em tubulação de PVC de diâmetro nominal de DN32 mm e pressão nominal de PN60 (Figura 1). A tubulação testada foi da linha agropecuária/irrigação (azul), com diâmetro externo de 32 mm e interno de 29 mm.

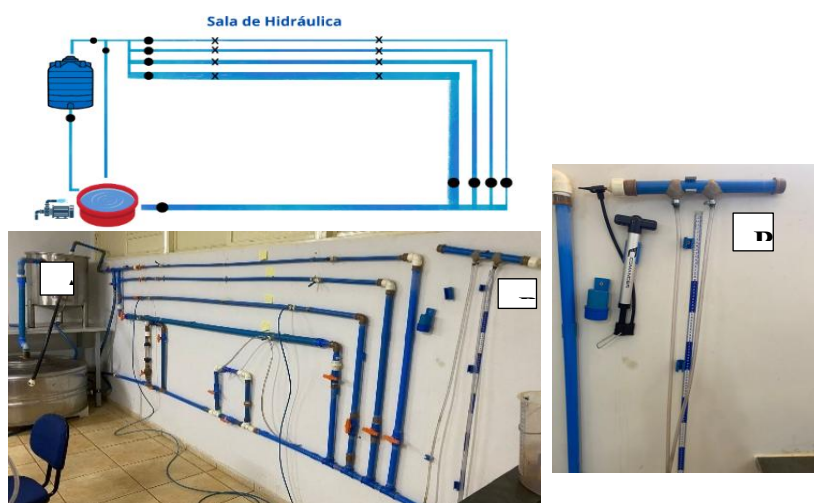


Figura 1 – Reservatório com volume pré-determinado em função da altura para mensuração de vazão (A) e piezômetro diferencial pressurizado (B).

A mensuração de vazão e conseqüente velocidade de escoamento foi determinada pelo método direto volumétrico, quantificando o volume e o tempo de enchimento de um reservatório com volume conhecido Figura 1A. A partir dos dados da curva de volume do reservatório e da variação de tempo foi determinado a vazão de cada teste. Conseqüentemente, conhecida a vazão e o diâmetro interno do tubo se obtêm a velocidade. Para a variação de vazão/velocidade o sistema foi alimentado por uma motobomba centrífuga, onde o recalque possui uma tubulação lateral para retorno da água o que possibilita controle de vazão no sistema de teste com a abertura e fechamento de registros de gaveta. Para o presente trabalho, foram medidos 35 pontos com velocidades variando de 0,37 a 3,15 m/s.

As perdas de carga singulares (J) em mca. por metro de tubulação foram determinadas com um piezômetro diferencial pressurizado. No piezômetro as duas tomadas de pressão foram conectadas a um tubo fechado com a inserção de uma válvula para engate de uma bomba manual. Desta forma, era possível pressurizar, criando uma pressão maior que pressão atmosférica, reduzindo/controlando proporcionalmente à altura na leitura do piezômetro (Figura 1B). Para a mensuração das perdas de cargas, as tomadas de pressão na tubulação foram inseridas a uma distância de 2 metros.

Para cada velocidade/vazão foram estimadas as perdas de carga unitária (J) a partir das equações de Hazen-Williams (Equação 1), Flamant (Equação 2), conforme descrito em Azevedo Netto et al. (1998).

$$J = 10,643 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \frac{1}{D^{4,87}} \quad (1)$$

$$J = 6,107 * b * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (2)$$

Em que:

J – perda de carga unitária, mca m-1;

C – coeficientes de atrito Hazen-Williams;

b – coeficientes de atrito Flamant;

Q – vazão conduzida, m³ s-1;

D – diâmetro interno da tubulação, m.

A partir dos dados de perdas de carga medidos em laboratório foram ajustados os coeficientes de atrito de forma a obter a melhor precisão e exatidão dos testes (C – coeficientes de atrito Hazen-Williams; b – coeficientes de atrito Flamant). O ajuste do melhor coeficientes de atrito foi realizado de forma a obter o melhor coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE - Equação

3) (valor mais próximo de 1) utilizando a função solver do Excel®. Este coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE está no intervalo aberto 0,36-0,75. De posse dos dados de velocidade e perdas de carga foi gerada a equação de regressão que melhor ajustou ao conjunto de dados. A equação foi ajustada a origem e determinado o coeficiente de correlação de Pearson.

$$J = 6,107 * b * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3)$$

Em que:

NSE – coeficiente de Nash-Sutcliffe ($-\infty$ até 1);

Y_i é o valor observado de perdas de carga em laboratório;

Y é o valor da média de perdas de carga obtido em laboratório.

X_i é o valor estimado pelas equações de perdas de carga;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 2A, observam-se as variações das perdas de carga singulares (J), medidas em laboratório e simuladas pela equação de Hazen-Williams, utilizando o fator C igual a 140. A literatura técnica em hidráulica recomenda o uso do fator C variando entre 130 e 155 para tubos de PVC. No entanto, com base nos dados obtidos em campo, verifica-se que o uso do coeficiente 140 tende a superestimar as perdas de carga, especialmente em maiores velocidades de escoamento — com destaque para velocidades superiores a 1 m/s. Embora a equação seja recomendada para diâmetros entre 50 mm e 3000 mm, ela ainda é amplamente utilizada na agricultura para qualquer diâmetro, geralmente com C igual a 140 ou 145. Isso resulta em superestimativas das perdas de carga em condutos DN32, variando de 32%, para velocidades de 0,5 m/s, até 62%, para velocidades de 2,5 m/s.

Quando ajustado o coeficiente de atrito C da equação de Hazen-Williams com base nos valores medidos, observa-se um melhor ajuste para $C=176$ (Figura 2B). Para esse valor, o coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou valor de 0,995, sendo considerado excelente, pois está muito próximo do valor máximo de 1. Assim, apesar da equação de Hazen-Williams não ser previamente recomendada para diâmetros inferiores a 50 mm, com o uso do C de 176 em tubos de PVC DN32/PN60 a equação apresenta excelente precisão. O uso de equações empíricas com coeficientes devidamente ajustados é fundamental para o dimensionamento adequado de

estruturas hidráulicas, garantindo melhor relação custo-benefício no projeto. Superestimativas das perdas de carga durante o dimensionamento resultam na especificação de motobombas superdimensionadas e na seleção de diâmetros comerciais de tubulações maiores do que o necessário.

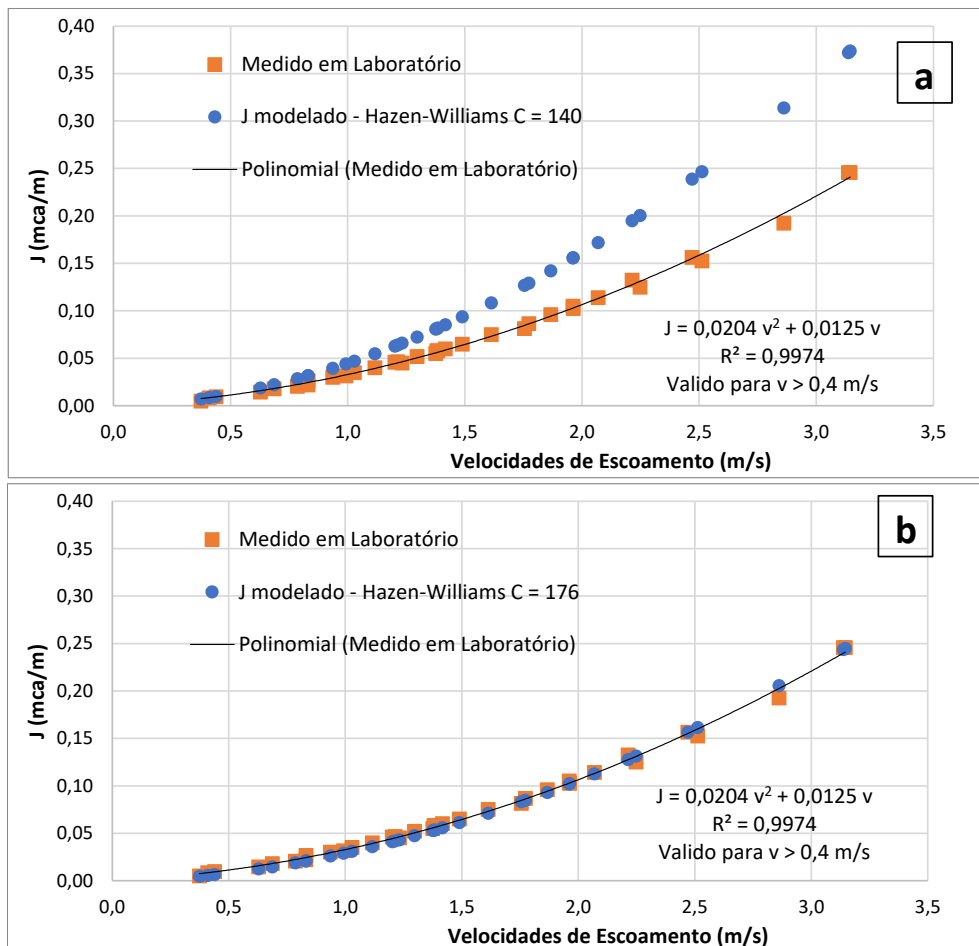


Figura 2. Variação das perdas de cargas singulares em função da velocidade de escoamento em conduto de PVC de DN32 e PN60 e simulação com coeficiente C de Hazen-Williams original de 140 (a) e ajudado de 176 (b), para conduto de PVC DN32 e PN60.

Ainda na Figura 2, foi possível com o conjunto de dados medidos gerar uma equação empírica para estimativa das perdas de carga unitária pra o conduto de PVC de DN32 e PN60, a equação leva em consideração apenas a velocidade da água no conduto de DN32PN60. A presente Equação 4 pode ser aplicado para velocidades ente 0,4 a 3 m/s e apresentado coeficiente de correlação de 0,9974.

$$J = 0,0204 V^2 + 0,0125 V \quad (4)$$

em que:

J – perda de carga unitária, mca m-1;

V – Velocidade da água no contudo m s-1.

Na Figura 3 observa-se o comportamento dos dados em relação a segunda equação empírica de perdas de carga mais utilizada na agricultura que é a equação de Flamant. Esta equação é satisfatoriamente aplicada em tubos de PVC de pequenos diâmetros (16 a 160 mm) e velocidade de escoamento de 0,1 a 4 m/s. Ao estimar das perdas de carga com o valor do coeficiente de atrito b recomendado para tubos de PVC e polietileno de 0,00012 (Figura 3a) observa-se superestimativas dos dados, variando de 15%, para velocidades de 0,5 m/s, até 25%, para velocidades de 2,5 m/s. Embora, essa superestimativa com valores de coeficientes de atrito da literatura ser menor do que os observados para a equação de Hazen-Williams, ainda apresenta valores elevados de erros.

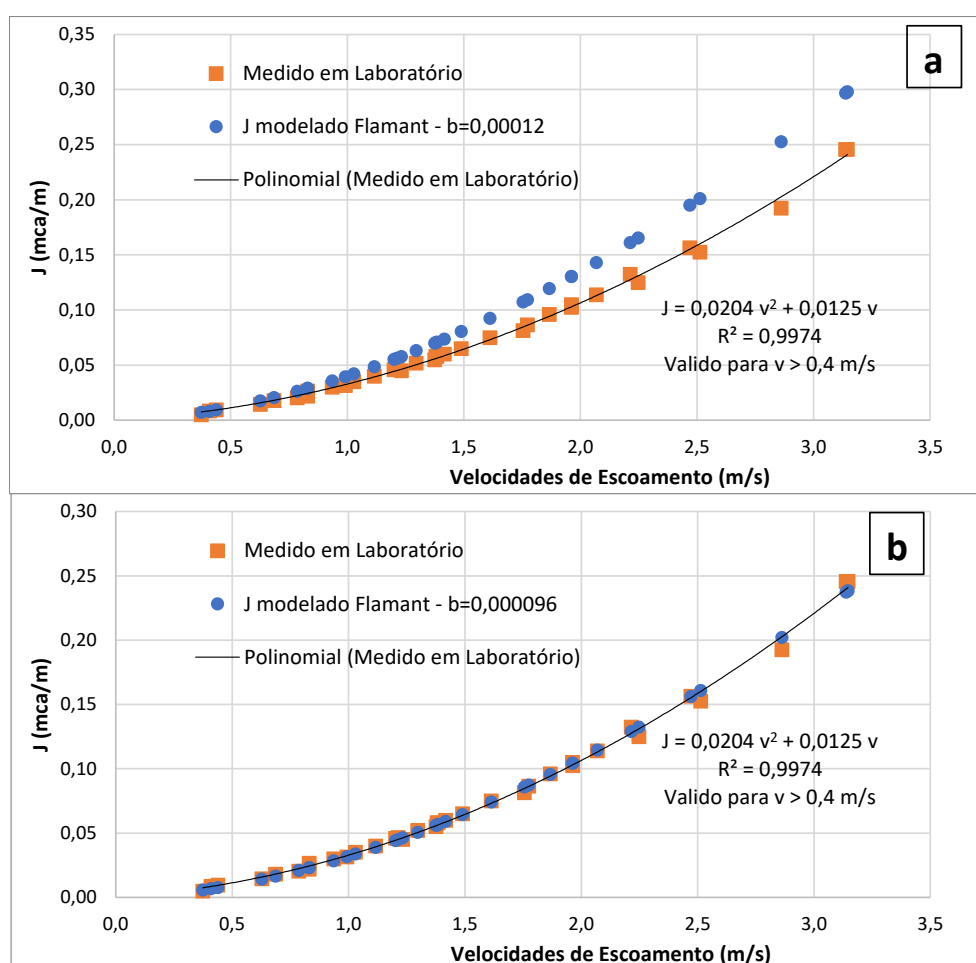


Figura 3. Variação das perdas de cargas singulares em função da velocidade de escoamento em conduto de PVC de DN32 e PN60 e simulação com coeficiente b de Flamant original de 0,00012 (a) e ajudado de 0,000096 (b), para conduto de PVC DN32 e PN60.

Ao ajustar o coeficiente de atrito b da equação de Flamant com base nos valores medidos, observa-se um melhor ajuste para $b=0,000096$ (Figura 3b). O coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou valor de 0,997, sendo considerado excelente, pois está muito próximo do valor máximo de 1. O coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou assim leve melhora em relação ao

ajuste da equação de Hazen-Williams que foi de 0,995. Para as duas equações estudadas (Hazen-Williams e Flamant) os valores dos coeficientes de atrito tiveram que ser ajustados para cima, o que significa que os novos tubos possuem menores rugosidades o que geram menores perdas de cargas por atrito.

De acordo com a Figura 4, correlacionando os valores medidos de perdas de carga com os estimados via Hazen-Williams ($C=176$), Flamant ($b = 0,000096$) e equação empírica para DN32PN60 (Figura 3c) observou-se coeficientes de determinação superior a 0,998 e coeficiente de inclinação da reta superior a 0,9981 em todos os três modelos. Destacando que o desejado são pontos em cima da reta 1:1 o que indica que os valores modelados são iguais aos medidos em laboratório. Assim, os coeficientes de inclinação próximos de 1 indicam que há excelente ajustes dos modelos matemáticas e os elevados coeficientes de determinação indicam baixa dispersão dos dados. Dessa forma, as três equações ajustadas apresentam igualmente bons resultados para estimativas de perdas de carga em DN32PN60.

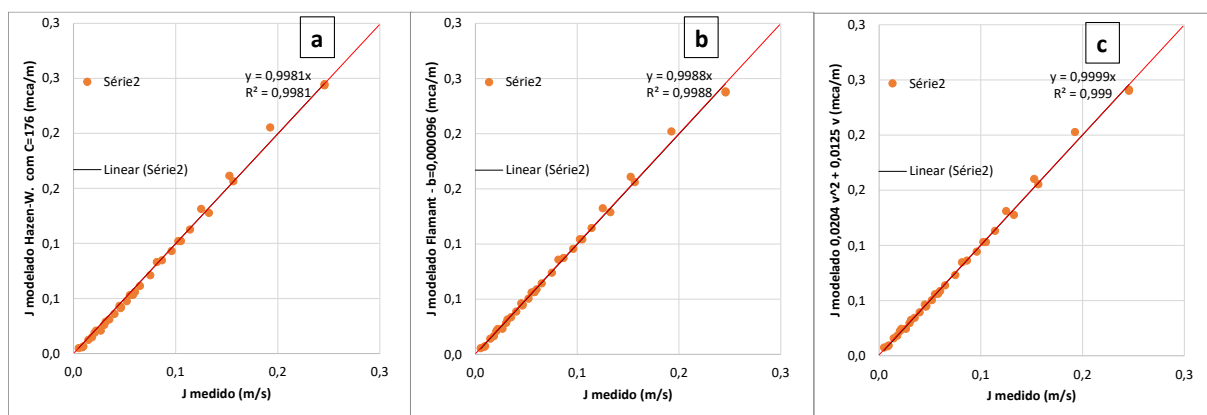


Figura 4. Relação entre perdas de carga medida e modeladas pela equação de Hazen-Williams com fator C ajustada em 173 (a); Flamant com coeficiente b ajudado de 0,000096 (b) e equação empírica modelada neste trabalho para tubulação de PVC de DN32 e PN60.

CONCLUSÕES

Apesar da equação de Hazen-Williams não ser recomendada para diâmetros menores que 50 mm, o presente trabalho demonstra que com a utilização do coeficiente de atrito C de 176 o modelo estima corretamente os dados com elevada exatidão para os tubos de PVC de DN32PN60. A equação de Flamant com uso do coeficiente de atrito $b = 0,000096$ apresentou excelente desempenho e exatidão para os tubos de PVC de DN32PN60. A equação empírica desenvolvida neste trabalho, exclusiva para tudo DN32PN60, também apresentou alta precisão

($R^2 = 0,9974$). Conclui-se que o uso de modelos ajustados melhora o dimensionamento hidráulico, reduzindo custos e aumentando a eficiência dos sistemas de irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDES, W.; FERNANDES, J. A. Q. **Hidráulica aplicada**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

FERREIRA, A. R. et al. Eficiência energética em sistemas de irrigação: revisão de literatura e perspectivas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 15, n. 3, p. 456-470, 2021.

PEREIRA, E. R. et al. Análise da aplicabilidade de equações empíricas de perda de carga em sistemas modernos de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 4, p. 478-486, 2020. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n4p478-486/2020

SILVA, D. F. et al. Dimensionamento técnico-econômico de sistemas de irrigação por pressão. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 30, n. 1, p. 90-98, 2022. DOI: 10.13083/reveng.v30i1.1335

SOUSA, F. A.; DANTAS NETO, J. Calibração de equações empíricas para determinação de perdas de carga em sistemas de irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 4, p. 280-289, 2014. DOI: 10.7127/rbai.v8n400171.