

AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HAZEN-WILLIANS PARA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES DE PVC

Eugenio Paceli de Miranda¹, Tatiana Belo de Sousa Custodio², Francisco Uchoa de Lima³,
Taiane Almeida Pereira⁴, André Luiz Ribeiro Bicudo⁵

RESUMO: A perda de carga é um parâmetro fundamental para o dimensionamento das tubulações, estando diretamente relacionada ao custo dessas tubulações, a seleção do sistema de bombeamento e o custo com o consumo de energia elétrica. Nesse estudo ajustou-se a equação de Hazen-Willians e comparou com a equação de Darcy-Weisbach. O desempenho da equação ajustada foi determinada pelo índice de concordância (c), Erro Padrão Estatístico (EPE), Erro Absoluto Médio (EAM), Diferença Absoluta máxima (DAmáx) e a Diferença Absoluta média (DAméd). Os resultados mostram que todos os índices usados para verificar o desempenho da equação de Hazen-Willians ajustada melhoraram. A maior diferença entre os valores da perda de carga contínua entre o método de Darcy-Weisbach e a equação de Hazen-Willians ajustada ficou em torno de 0,08%, valor que pode ser considerado extremamente baixo.

PALAVRAS-CHAVE: Perda de carga, Darcy-Weisbach, diâmetro.

ADJUSTMENT OF THE HAZEN-WILLIANS EQUATION FOR DETERMINATION OF CONTINUOUS PRESSURE DROP IN PVC PIPE

ABSTRACT: The head loss is a fundamental parameter for the dimensioning of the pipes, being directly related to the cost of these pipes, the selection of the pumping system and the energy cost of electricity. That study fitted the Hazen-Williams equation and compared it with the Darcy-Weisbach equation. The performance of the adjusted equation was determined by the concordance index (c), Statistical Standard Error (EPE), Mean Absolute Error (EAM),

¹ Professor, Doutor IFCE, Campus Iguatu/CE, email: paceli.miranda@gmail.com;

² Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, IFCE, Campus Iguatu, email: tathyannabello@gmail.com;

³ Graduando em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, IFCE, Campus Iguatu.

⁴ Graduando em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, IFCE, Campus Iguatu.

⁵ Prof. do Colégio Técnico Industrial "Prof. Isaac Portal Roldan", Unesp, Campus Bauru

Maximum Absolute Difference (DAm_{ax}) and Mean Absolute Difference (DAm_{ed}). The results show that all gridded indices to verify the performance of the adjusted Hazen-Williams equation have improved. The largest difference between the values of continuous load loss between the Darcy-Weisbach method and the adjusted Hazen-Williams equation was about 0.08%, which can be considered extremely low.

KEYWORDS: Head loss, Darcy-Weisbach

INTRODUÇÃO

Nos projetos de dimensionamento de sistemas de irrigação é essencial e indispensável o conhecimento dos processos físicos, como por exemplo as perdas de cargas, que ocorrem desde o conjunto moto-bomba até o final do sistema. Sabe-se que para o dimensionamento do sistema de irrigação é necessário o conhecimento de dados técnicos específicos do comportamento hidráulico do líquido e também referente ao sistema água-solo-planta-atmosfera da região (MIRANDA, ROSAL e LIMA, 2018).

Segundo Miranda (2016) a perda de carga contínua é aquela que ocorre devido ao atrito entre as partículas do próprio fluido, viscosidade cinemática, e também ao atrito do líquido com a parede da tubulação. O mesmo autor ressalta que a correta determinação da perda de carga é fundamental para o bom funcionamento do sistema de irrigação durante o projeto de dimensionamento do sistema.

Os projetos hidráulicos visam quantificar as perdas de carga totais, que servem para o dimensionamento do conjunto moto-bomba mais adequada ao sistema de irrigação, minimizando os custos anuais e de implantação do projeto, bem como melhorar a uniformidade de distribuição de água na área irrigada (GUIMARÃES e FRIZZONNE, 2014).

Entretanto, o dimensionamento de sistemas de irrigação não visa apenas na determinação de perdas de cargas de cada trecho de um sistema de irrigação e a recomendação de diâmetros para cada um deles. É através do dimensionamento que é possível verificar a vazão e a pressão de serviço de um emissor, a quantidade de emissores por linha lateral, o comprimento da linha lateral, a quantidade de linhas laterais que vão funcionar simultaneamente, o tempo de irrigação de cada parcela, o número de parcelas irrigadas diariamente, o tempo total de irrigação por dia, fornece parâmetros para a seleção da bomba e a determinação do rendimento desta e o consumo de energia elétrica.

O transporte de um fluido no interior das tubulações sofre interferência das paredes no seu interior assim ocorrendo perda de carga, os cálculos da perda de carga é importante, pois permite a otimização dos projetos gerando economia na produção e eficiência o sistema de irrigação (AMARAL; AMARAL, 2016).

De acordo com Dalcin Pimenta et al., (2018) para dimensionamento de tubulações pressurizadas, pode-se estimar a perda de carga contínua através de várias equações, sendo uma delas a equação de Hazen-Williams. Segundo Azevedo Netto (2007) a Fórmula de Hazen-Williams pode ser utilizada satisfatoriamente para qualquer tipo de conduto e de material. Seja em condutos livres ou forçados. Os autores basearam-se em diversos tipos de materiais para o estabelecimento da fórmula: aço, cimento, chumbo, estanho, ferro fundido, latão, madeira, tijolo e vidro. Todavia segundo Batista e Lara (2010) a equação de Hazen-Williams é usada para transporte de água somente e para conduto circular.

Segundo Sousa (2018) o projetista tem de decidir qual equação de perda de carga usar, logo esta decisão pode acarretar erros significativos, já que os cálculos de perda de carga são imperativos na definição dos diâmetros das tubulações e, por conseguinte, em toda a estrutura hidráulica do projeto.

Dos vários métodos para calcular a perda de carga distribuída, o mais bem aceito é o calculado através da equação de Darcy-Weisbach, também chamada de fórmula Universal (BAGARELLO et al.,1995).

O objetivo desse trabalho foi ajustar a equação de Hazen-Williams para aumentar seu desempenho.

MATERIAL E MÉTODOS.

Simulou-se a determinação das perdas de carga contínua pelas equações de Darcy-Weisbach (Equação 1) e Hazen-Williams (Equação 2) para uma linha adutora de 1.000 m de comprimento de PVC, para os diâmetros de 0,0508 m, 0,0762 m, 0,1016 m e 0,12 m para diferentes vazões.

$$hf_{DW} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$hf_{HW} = \frac{10,643 \cdot L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} \quad (2)$$

Em que:

hf_{DW} - Perda de carga contínua pelo método de Darcy-Weisbach (m); hf_{HW} - Perda de carga contínua pelo método de Hazen-Williams (m); f - Fator de atrito (adimensional); L - Comprimento da tubulação (m); D - Diâmetro interno da tubulação (m); v - Velocidade de escoamento ($m\ s^{-1}$); g - Aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$) e C – Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional).

A equação de Hazen-Williams foi inicialmente calculada com o coeficiente “C” de 140 para tubulação de PVC usou-se a perda de carga continua determinada pela de Darcy-Weisbach para encontrar um novo do coeficiente “C” (equação 3) para cada vazão em seguida, fez-se a correlação entre os novos valores e a vazão.e a obtenção de uma equação potencia (equação 4). Em seguida a equação do coeficiente “C” foi incorporado à equação de Hazen-Willans

$$C = \left(\frac{10,643}{hf_{DW}} \cdot L \cdot \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}}\right)^{0,54} \quad (3)$$

$$C = \alpha Q^\beta \quad (4)$$

$$hf_{HW} = \frac{10,643}{D^{4,87}} \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{\alpha Q^\beta}\right)^{1,85} \quad (5)$$

$$hf_{HW} = \frac{10,643}{\alpha \cdot D^{4,87}} \cdot L \cdot Q^{(1,85-\beta)} \quad (6)$$

Em que:

C – Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional); hf_{DW} - Perda de carga contínua pelo método de Darcy-Weisbach (m); L - Comprimento da tubulação (m); D - Diâmetro interno da tubulação (m) hf_{HW} - equação de Hazen-Williams ajustada e α e β - parâmetros da equação.

Foram usados os coeficientes de concordância (Equação 7), o Erro Padrão Estatístico (EPE, Equação 8), o Erro Absoluto Médio (EAM, Equação 9), a maior diferença absoluta e a diferença média para verificar o desempenho da Equação de Hazen-Willians original e ajustada. O índice de concordância de Willmott e o coeficiente de correlação foram determinadas pelas Equações 10 e 11, respectivamente.

$$c = d \cdot r \quad (7)$$

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1} \right]^{0,5} \quad (8)$$

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (9)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum[(P_i - \bar{P}) \cdot (O_i - \bar{O})]}{\sqrt{[\sum(P_i - \bar{P})^2] \cdot [\sum(O_i - \bar{O})^2]}} \quad (11)$$

Em que:

c – índice de concordância (adimensional); d – índice de Willmott (adimensional) e r – coeficiente de correlação (adimensional); EPE – erro padrão de estimativa (adimensional); O_i – estimativa do método padrão (adimensional); P_i – estimativa do método avaliado (adimensional); e n – número de observações. EAM- erro absoluto médio (adimensional); d- coeficiente de concordância P_i - evapotranspiração de referência estimada pelo método testado (mm); O_i - evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão (mm); \bar{O} - média dos valores observados pelo método padrão (mm).

O índice de concordância (c) foi classificado de acordo com a Tabela 1

Tabela 1. Critérios de classificação do índice de concordância (c).

Índice de concordância (c)	Classificação
>0,85	Ótimo
0,76 – 0,85	Muito Bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Mediano
0,51 – 0,60	Sofrível
0,41 – 0,50	Mal
<= 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 são apresentadas as diferenças (%) entre as perdas de cargas contínuas para os métodos de Darcy-Weisbach e Hazen-Willians original e ajustada. Percebesse que as diferenças entre os dois métodos variam com a vazão. Para as menores vazões o método de Darcy-Weisbach produz as maiores perdas de cargas contínua. Com o aumento da vazão a perda de carga contínua determinada pelo método de Hazen-Willians passa a ser maior que o método de Darcy-Weisbach. Usando a Equação de Hazen-Willians original as maiores diferenças entre os dois métodos são de 15,1%, 16,98%, 19,79% e 21,38%, respectivamente, para os diâmetros de 0,0508 m, 0,0762 m, 0,1016 m e 0,12 m.

Miranda *et al.* (2018) comparando os dois métodos, chegou a uma diferença de 29,9%, com as perdas de cargas obtidas com a equação de Hazen-Willians maiores que as obtidas pela equação de Darcy-Weisbach.

As equações utilizados para determinação da perda de carga continua foram desenvolvidos para aterias utilizados na época sendo que as equações de Darcy em 1857; Flamant em 1892 e de 1903 a 1920 (AZEVEDO NETO; ALVAREZ, 1982). Araújo et al. (2009) constatando que o coeficiente de Hazen-Williams varia também em função da vazão, esses autores encontraram valores do coeficiente de Hazen-Williams (C) variando de 96,7 a 305,9, para uma tubulação de PVC.

Tabela 2. Diferenças percentuais entre as perdas de carga contínua pelos métodos de Darcy-Weisbach e Hazen-Willians original e ajustada

Vazão (m ³ /s)	Original				Ajustada			
	0,0508	0,0762	0,1016	0,12	0,0508	0,0762	0,1016	0,12
0,0001	12,84	16,98	19,8	21,38	-0,077	-0,077	-0,076	-0,08
0,0002	6,58	11,02	14,04	15,74	-0,071	-0,071	-0,07	-0,074
0,0003	2,72	7,34	10,48	12,25	-0,068	-0,067	-0,067	-0,071
0,0004	-0,12	4,63	7,87	9,69	-0,065	-0,065	-0,064	-0,068
0,0005	-2,38	2,48	5,79	7,65	-0,064	-0,063	-0,062	-0,066
0,0006	-4,26	0,69	4,06	5,95	-0,062	-0,061	-0,061	-0,065
0,0007	-5,88	-0,86	2,57	4,49	-0,061	-0,06	-0,059	-0,064
0,0008	-7,31	-2,21	1,26	3,21	-0,06	-0,059	-0,058	-0,062
0,0009	-8,58	-3,42	0,09	2,06	-0,059	-0,058	-0,057	-0,061
0,001	-9,73	-4,52	-0,97	1,03	-0,058	-0,057	-0,056	-0,06
0,0011	-10,78	-5,52	-1,94	0,08	-0,057	-0,056	-0,055	-0,06
0,0012	-11,75	-6,44	-2,83	-0,8	-0,056	-0,055	-0,055	-0,059
0,0013	-12,65	-7,3	-3,66	-1,61	-0,055	-0,055	-0,054	-0,058
0,0014	-13,48	-8,09	-4,43	-2,36	-0,055	-0,054	-0,053	-0,058

0,0015	-14,27	-8,84	-5,15	-3,07	-0,054	-0,054	-0,053	-0,057
0,0016	-15,01	-9,55	-5,83	-3,74	-0,054	-0,053	-0,052	-0,056

As diferenças entre as perdas de cargas obtidas pelas equações de Darcy-Weisbach e de Hazen-Willians ajustada. A maior diferença observada foi de 0,08%, valor esse que pode ser considerado muito pequeno.

Nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 são mostrados os índices usados para avaliar o desempenho da equação de Hazen-Willians. Como pode ser observado, o uso das equações ajustadas melhorou o desempenho da equação de Hazen-Willians para todos os diâmetros usados nesse estudo. Especificamente com relação ao índice de concordância (c), esse foi o índice que menos variou com o ajuste da equação de Hazen-Willians, o que pode ser atribuído ao fato de que esse parâmetro esteja mais relacionado com a correlação entre os valores, do que propriamente mostre as diferenças entre eles.

Tabela 3. Índices de desempenho para diâmetro da tubulação de 0,0508 m.

Índice	hf _{HW} original	hf _{HW} ajustada
c	0,99027	1
EPE	0,91073	0,00385
EAM	0,59952	0,00299
DAm _{max} ¹	17,605	0,077
DAm _{med} ²	10,251	0,059

¹ Diferença absoluta máxima (%), ² Diferença absoluta média (%).

Tabela 4. Índices de desempenho para diâmetro da tubulação de 0,0762 m.

Índice	hf _{HW} original	hf _{HW} ajustada
c	0,99617	1
EPE	0,07957	0,00055
EAM	0,04673	0,00043
DAm _{max} ¹	16,978	0,076
DAm _{med} ²	7,220	0,058

¹ Diferença absoluta máxima (%), ² Diferença absoluta média (%).

Tabela 5. Índices de desempenho para diâmetro da tubulação de 0,1016 m.

Índice	hf _{HW} original	hf _{HW} ajustada
c	0,9986	1,0000
EPE	0,0115	0,0001
EAM	0,0049	0,0001
DAm _{max} ¹	19,795	0,0759
DAm _{med} ²	6,009	0,0579

¹ Diferença absoluta máxima (%), ² Diferença absoluta média (%).

Tabela 6. Índices de desempenho para diâmetro da tubulação de 0,120 m.

Índice	hf _{HW} original	hf _{HW} ajustada
c	0,9993	1,0000
EPE	0,0033	0,0001
EAM	0,0004	0,0001
DAm _{max} ¹	21,381	0,0801
DAm _{med} ²	5,803	0,0621

¹ Diferença absoluta máxima (%), ² Diferença absoluta média (%).

As Equações 12, 13, 14 e 15 são as equações ajustadas após a regressão do coeficiente “C” de Hazen-Willians em função da vazão, para os diâmetros 0,0508, 0,0762, 0,1016 e 0,12 m, respectivamente, para tubos de PVC.

$$hf_{HWa} = 0,00052 \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,75} \quad (12)$$

$$hf_{HWa} = 0,0005454 \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,75} \quad (13)$$

$$hf_{HWa} = 0,0005656 \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,75} \quad (14)$$

$$hf_{HWa} = 0,000577 \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,75} \quad (15)$$

Em que: hf_{HWa} – Equação ajustada de Hazen-willians (m); D – Diâmetro (m) e Q – Vazão (m³.s⁻¹).

CONCLUSÕES

O ajuste da equação de Hazen-Willians para determinação da perda de carga contínua melhorou seu desempenho nas quatro tubulações usadas na simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, E. R.; AMARAL, T.R. Análise Dos Fatores Que Influenciam Nas Perdas De Carga Em Tubulações E Acessórios Hidráulicos. **Anais...** Seminário De Iniciação Científica (SIC) vol. 5. Montes Claros, 2016.

ARAÚJO, R.D.M.; MIRANDA, E.P.; BARBOSA, M.A.G.; MARTINS, G.S.; OLIVEIRA, T.C.; VIANA, K.C. Determinação do coeficiente perda de carga contínua “C” da equação de Hazen-Willians. IN: XXVI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Montes Claros, MG, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. Manual de hidráulica. 7 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 336p.

AZEVEDO NETTO, J.M., FERNANDEZ, M.F., ARAUJO, R., ITO, A.E. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2007. 669 p.

BAPTISTA, M. B., LARA, M. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 3. ed. rev. E ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p

COSTA DE SOUSA, J.S. Equações de Perda de Carga para Dimensionamento Hidráulicos em Projetos de Irrigação Pressurizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 12, n. 7, 2018.

DALCIN PIMENTA, B. et al. Desempenho e Precisão de Equações Explícitas do Coeficiente de Perda de Carga em Regime de Fluxo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 12, n. 2, 2018.

GUIMARÃES CARDOSO, G. G.; FRIZZONE, J.A. Perda de carga localizada em Conexão de Emissor On-Line. **IRRIGA**, v. 19, n. 4, p. 537, 2018.

MIRANDA, E.P. **Programa computacional para dimensionamento e determinação dos custos de energia elétrica de um sistema de irrigação localizada**. 2016. 250p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016.

MIRANDA, E.P.; ROSAL, G.B.; OLIVEIRA ALVES, J.V.; CUSTÓDIO, T.B.S; BEZERRA, T.R. Comparação do consumo de energia elétrica em função do método de determinação da perda de carga contínua. IN: Congresso Norte-Nordeste de pesquisa e inovação, novembro, 2018, Pernambuco.

NETO, O.R.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, F.A.; PINTO, M.F.; CAMARGO, A. P. Quantificação Do Erro Na Determinação Da Perda Contínua De Carga Em Tubos Elásticos. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.33, n.6, p.1312-1321, nov./dez. 2013

PERRONI, B.L.T; FARIA, L. C.; CARVALHO, J.A.; OLIVEIRA, H.F.E. Influência Do Custo Da Energia Elétrica E Do Material Da Tubulação Na Velocidade Econômica De Bombeamentos. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 13-20, janeiro-março, 2015.

ROCHA, H. S. **Rugosidade Superficial Interna de Tubos para Irrigação**. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em ciencias, área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas. Piracicaba, 2014.