ANÁLISE DE LATERAIS PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÁXIMO DE ASPERSORES*

Jorge E. Quintero**
Raul Vallderuten***

RESUMO

O sistema de irrigação por aspersão tem sido bastante difundido no Brasil, principalmente por sua economia e adaptabilidade à topografia ondulada. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para calcular o número máximo de aspersores nas linhas laterais de um sistema, usando a equação de Hazen-Williams, para tubulações de aço zincado e cimento amianto produzidas comercialmente no País.

SUMMARY

Sprinkler irrigation systems are widely used in Brazil due mainly to their economy and adaptability to rough topography. The objetive of this work was to develop a method to estimate the maximum number of sprinklers on a lateral line, using the equation of Hazen-Willians for galvanized steel and asbestos-cement pipes commercially produced in Brazil.

INTRODUÇÃO

Devido à grande importância que atualmente representa para o País o aumento da produtividade agrícola, tem nascido uma consciência de uma agricultura mais racional e planejada, que não dependa em demasia dos azares climáticos. O sistema de irrigação por aspersão tem sido bastante defendido, principalmente devido à sua eficiência na aplicação, economía comparado com outros sistemas e sua adaptabilidade à topografia ondulada predominante em vastas áreas do País.

Um projeto econômico e racional dos sistemas de irrigação por aspersão apresenta aspectos interessantes de ser analisados, pois pode reduzir drasticamente os investimentos iniciais e aumentar a eficiência de operação do sistema.

A finalidade deste trabalho consistiu em desenvolver um método para calcular o número máximo de aspersores que podem ser instalados nas linhas laterais de um sistema de aspersão, usando a equação de Hazen-Williams, como função da vazão de cada aspersor, do espaçamento entre eles, da pressão de operação, da perda de pressão permissível, do diâmetro interno da tubulação e do tipo de material. Foram feitos os cálculos para tubulações de aço zincado e cimento amianto para materiais de diâmetros e especificações produzidos comercialmente no Brasil

MATERIAIS E MÉTODOS

Cada tipo de aspersor tem uma pressão mínima recomendável de operação, sendo reduzido abruptamente seu desempenho quando operação em pressão diferentes das recomendáveis. As linhas laterais de um sistema de irrigação por aspersão

---

(*) Contribuição do Departamento de Engenharia Agrícola, FEA, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas - SP
(**) Engº Civil, Ph.D., Chefe do Departamento de Eng. Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas - SP
(***) Engº Agrícola, M.S., Professor convidado, Hidrologia e Hidráulica, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas - SP

estão compostas por um número de aspersores uniformemente espaçados entre si. É recomendável que a perda máxima de pressão na linha lateral não seja superior a 20% da pressão de operação do aspersor (Hurd, 1974). Isto significa que se a pressão na linha lateral é 3,0 kg/cm^2 a perda máxima de pressão na linha lateral é 0,60 kg/cm^2, o que evidentemente limita o número de aspersores que podem ser instalados em uma linha lateral.

A equação clássica usada para calcular as perdas de carga em uma linha lateral foi proposta por Darcy-Weisbach (Vennard, 1965) e (Sprinkler Irrigation, Association, 1969).

$$H = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \tag{1}$$

onde:

H = Perda de carga, m
f = Fator de atrito
L = Comprimento da tubulação, m
V = Velocidade, m/s
d = Diâmetro, m
g = Aceleração da gravidade, m/s^2

O fator de atrito depende da rugosidade relativa do material e do número de Reynolds onde a rugosidade relativa se define como e_r.

$$er = \frac{e}{d} \tag{2}$$

onde:

e = Rugosidade do material, m
d = Diâmetro, m

O número de Reynolds é definido como:

$$NR = \frac{V\ d}{\gamma} \quad \text{(sem dimensões)} \tag{3}$$

onde:

V = Velocidade, m/s
d = Diâmetro, m
γ = Viscosidade cinemática do fluido, m^2/s

As relações entre o fator de atrito f é o número de Reynolds, tem sido amplamente estudadas para diferentes materiais (Vennard, 1965).

Hazen-Williams, (Morris M. e Wiggert, 1973) propôs uma equação empírica que tem sido muito utilizada em engenharia para calcular as perdas de carga. No sistema Inglês de unidades a equação é:

$$V = 1,318\ C\ R^{0,63} \left(\frac{H}{L}\right)^{0,54} \tag{4}$$

onde:

V = Velocidade, pé/s
C = Coeficiente de Hazen-Williams
R = Raio hidráulico, pés
H = Perda de carga, pés
L = Comprimento da tubulação, pés.

Baseado na forma geral da equação para calcular as perdas de carga numa linha de saída, Christiansen em 1942 desenvolveu um método para calcular as perdas de pressão numa linha com múltiplas saídas.

$$hf = \frac{K_1\ L\ V^m}{d^n} \tag{5}$$

onde:

K_1 = Constante que depende do material

Aplicando-se à equação de continuidade, onde **Q** é a vazão e **A** é a área, tem-se:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2} \tag{6}$$

e substituindo-se na equação (5) tem-se:

$$hf = \frac{K_1 \; L \; Q^m F}{d^{2m+n}} \tag{7}$$

onde:

F = Fator que depende do número de saídas
K_1 = Fator de atrito que depende do material
m = Parâmetro experimental que depende do material
n = Parâmetro experimental que depende do material

Para tubulações com múltiplas saídas, a perda total por atrito, **hf**, é igual à soma das perdas entre saídas adjacentes.

Chamando-se q_a a vazão de cada saída, e **S** ao espaçamento entre elas, as perdas por atrito entre as duas últimas saídas será:

$$hf_1 = \frac{K_1 \; S (q_a)^m}{d^{2m + n}} \tag{8}$$

e similarmente:

$$hf_n = \frac{K_1 \; S (q_a)^m \; N^m}{d^{2m + n}} \tag{9}$$

Sendo **N** o número total de saídas e fazendo-se a somatória delas, tem-se:

$$hf = \sum_1^N hn = K_1 \; S \; \frac{(q_a)^m \; (1^m + 2m + \ldots N^m)}{d^{2m+n}}$$

igualando-se com a equação (7) e sabendo-se que:

$$(q_a)^m = \frac{Q^m}{N^m} \quad e \quad L = S \; N$$

obtém-se

$$\frac{\sum_1^N N^m}{N^{m+1}} \tag{10}$$

A equação no sistema métrico, para calcular as perdas de carga numa tubulação com múltiplas saídas será:

$$hf = \frac{4{,}52 \; K_2 \; L \; Q^m \; F}{d^{(2m+n)}} \tag{11}$$

onde:

hf = m

$L = m$

$Q = m^3/h$

Christiansen usou a fórmula de Scobey para calcular as perdas em tubulações de aço zincado. Nessa equação os valores dos parâmetros são:

$m = 1{,}90$ $\quad n = 1{,}1$ $\quad K_2 = 0{,}33$ (Asbrasil, o.d.)

A equação ficará assim:

$$hf = 4{,}52\ K_2\ \frac{L\ Q^{1,9}\ F}{d^{4,9}}$$

Christiansen apresentou uma equação que permite estimar aproximadamente os valores de F.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6\ N^2}$$

Transformando-se do sistema inglês de unidades para o sistema métrico, a equação (4) ficará assim:

$$H = \frac{15212{,}10\ \ L\ \ Q^{1,85185}}{C^{1,85185}\ \ d^{4,8703}} \tag{12}$$

que, comparando-se com a equação de Scobey usada por Christiansen, obtém-se:

$$K_2 = \frac{15212{,}10}{C^{1,85185}\ \ 4{,}52} \tag{13}$$

onde:

$m = 1{,}85185$
$n = 1{,}1666$
$H =$ Comprimento da tubulação, m
$Q =$ Vazão, m^3/h
$d =$ Diâmetro, cm

Segundo os valores reportados por um estudo da Eternit (1978) o valor mais recomendável de C para ser usado em tubulações de cimento amianto Eternit é C = 140. Aplicando-se a equação (13) para obter K_2 tem-se:

$K_2 =$ (para cimento amianto) $= 0{,}35706$

$$hf = 4{,}52 \times 0{,}35706\ \frac{Q^{1,85185}}{d^{4,8703}}\ F \times L \tag{14}$$

Equação que permite calcular as perdas de cargas nas linhas com saídas múltiplas.

Os valores calculados de F para diferentes valores de **N** (número de saídas) para m = 1,85185 são apresentados no Quadro 1.

O procedimento adotado para calcular os valores do número máximo de aspersores foi:

1. Obtenção de:

   1.1. Diâmetro interno do tubo, d
   1.2. Rugosidade do material, K_2
   1.3. Vazão para cada aspersor, q_a
   1.4. Espaçamento entre aspersores, S
   1.5. Pressão de operação do aspersor, P_o

QUADRO 1 - Valores de F para M = 1.85185

N	F	N	F
1	1.000	22	0.3736
2	0.6835	24	0.3718
3	0.5342	26	0.3701
4	0.4852	28	0.3687
5	0.4568	30	0.3675
6	0.4382	32	0.3664
7	0.4252	34	0.3655
8	0.4155	36	0.3647
9	0.4081	38	0.3639
10	0.4022	40	0.3632
11	0.3973	45	0.3618
12	0.3933	50	0.3607
13	0.3900	60	0.3590
14	0.3871	80	0.3569
15	0.3846	100	0.3556
16	0.3825	150	0.3539
17	0.3806	200	0.3531
18	0.3789		0.3523
19	0.3744		
20	0.3760		

$$F = \frac{N'}{N^{m+1}}$$

1.6. Seleção de (m) e (n)

2. Utilização de dados para:

2.1. Determinar a perda máxima permissível, hf, como igual a 20% da pressão de operação do aspersor, hf = 0,20 P_o

2.2. Assumir um número máximo de aspersores, N

2.3. Calcular F, para o valor assumido de N

2.4. Da equação geral (11) tem-se:

$$hf = \frac{4,52\ K_2\ L\ Q^m\ F}{d^{2m + n}}$$

e como:

$$Q = q_a\ N$$

e $L = S\ N$ então substituindo:

$$hf = \frac{4,52\ K_2\ S\ N\ (q_a N)^m}{d^{2m + n}} \qquad (15)$$

manipulando os termos, obtém-se:

$$\frac{hf\ d^{2m + n}}{4,52\ K_2 S} = (N^{m + 1})\ F \qquad (16)$$

O membro esquerdo da igualdade é uma função **G** (N) que depende das características do material, do diâmetro da tubulação e do espaçamento entre aspersores. O membro direito da igualdade, **Z** (N), depende só do número de aspersores.

2.5. Comparar **G** (N) e Z(N) aumentando ou diminuindo **N**, até G(N) $\approx$ Z(N). É importante salientar que sempre se deve aproximar por defeito, quer dizer Z(N) $\leq$ G(N), garantindo porém segurança no projeto. Tomaram-se como normais aqueles valores de **N** que cumpriram esta relação.

$$0,90 \leq \frac{Z(N)}{G(N)} \leq 0,97$$

Foi usado um programa iterativo para determinar o número máximo de aspersores para os materiais em consideração.

Para aço zincado e alumínio foram usados valores de m = 1,90 e K_2 = 0,33

Para cimento amianto foi usado para m = 1,85185 e para K_2 = 0,35706

Os Quadros 1 e 2 do anexo, mostram os resultados obtidos.

Precisa-se estabelecer que não é evidente que C seja uma medida de rugosidade relativa, porque não leva em consideração o número de Reynolds, tal como faz a equação de Darcy.

Transformando-se a equação de Hazen-Williams em função da velocidade e para o sistema métrico, tem-se:

$$H = \frac{1466,392\ \ L\ V^{1,85185}}{C^{1,85185}\ \ d^{1,1666}} \qquad (17)$$

onde:

H = Perda de carga, m
V = Velocidade, m/s.
d = Diâmetro, cm
C = Coeficiente da Equação

ou:

$$H = \frac{6,808 \; L \; V^{1,85185}}{C^{1,85185} \; d^{1,1666}} \qquad (18)$$

onde:

d = Diâmetro, m

A equação pode ser escrita assim:

$$H = \left[\frac{6,808 \; L \; 20 \; g}{C^{1,85185}}\right] \left[\frac{(\gamma)^{0,1485}}{V^{0,1485} \; d^{0,1485}}\right] \times$$

$$\times \left[\frac{L \; V^2}{d^{0,0181} \; d \; 2g}\right] \times \left[\frac{1}{\gamma^{\;0,1485}}\right] \qquad (19)$$

g = Aceleração da gravidade, m/s^2

γ = Viscosidade cinemática d'água, m^2/s

Tomando-se um valor da viscosidade cinemática d'água para aproximadamente 20°C obtém-se da equação (1) o valor de f.

$$f \doteq \frac{6,808 \times 2 \times 9,81}{C^{1,85185} \; (9,27 \times 10^{-7})^{0,1485}} \; \left(\frac{\gamma}{V \; d}\right)^{0,1485}$$

ou:

$$f = \frac{1,050 \; W(d)}{C^{1,85185} \; NR^{0,1485}} \qquad (20)$$

O termo $W(d) = \dfrac{1}{d^{0,0181}}$ varia com o diâmetro, mas suas variações então são relativamente menores, podendo-se adotar um valor médio de 1,035, assim:

Diâmetro d,m	W(d)
0,050	1,055
0,075	1,048
0,100	1,042
0,125	1,038
0,150	1,034
0,200	1,029
0,250	1,025
0,500	1,012

$\bar{W}(d) = 1,035$

Usando-se o valor médio de W(d) na equação (20) tem-se:

$$f = \frac{1086,80}{C^{1,85185} \; NR^{0,1485}} \qquad (21)$$

Prandlt, (Vennard J. 1965) desenvolveu uma equação que permite calcular o fator de atrito para regime turbulento em tubulações medianamente rugosas, que é este caso:

$$f = 0,0032 + \frac{0,221}{NR^{0,237}} \tag{22}$$

A figura 1 mostra como se comparam, favoravelmente, os valores de f deduzidos da equação de Hazen-Williams, com a equação de Prandlt, o que indica, apesar de ser a equação de Hazen-Williams completamente empírica e não adimensional, pode ser usada com resultados satisfatórios para calcular as perdas por atrito em tubulações.

Para ilustrar a aplicação das tabelas, precisa-se de uma linha lateral de aspersores separados 12m, com uma vazão por aspersor de 1,25 m^3/h e com uma pressão de operação correspondente a uma altura de água de 24,60m para uma tubulação de cimento amianto de 75mm de diâmetro.

Da tabela 2 encontra-se que o número máximo de aspersores é de 23. Conferindo-se os resultados:

K_2 = 0,35706

L = S x N = 12,0 x 23 = 276,0m

d = 75mm = 7,50cm

Q = q_a · = 23 x 1,25 = 28,75 m^3pH

F = 0,3727 (da tabela 3)

m = 1,85185

n = 1,1666

Aplicando-se a equação (11) tem-se:

$$hf = \frac{(4,52) \times (0,35706) \times (28,75)^{1,85185} \times (0,3727) \times (276)}{(7,50)^{4,8703}}$$

hf = 4,565m

A perda máxima permissível será 20% da pressão de operação do aspersor, quer dizer: 0,20 x 24,60m = 4,92m.

A relação entre a perda de carga real e a perda máxima permissível será 4,565/4,92 = 0,93 ou seja, que garante um projeto com segurança, usando um número máximo de 23 aspersores na linha lateral.

CONCLUSÕES

1. O número máximo de aspersores numa linha lateral pode ser calculado usando-se a teoria geral de perdas de carga para saídas múltiplas.

2. A equação de Hazen-Williams, apesar de não incluir o número de Reynolds, NR, permite calcular as perdas de carga em regime turbulento com boa aproximação.

3. Os valores mais recomendáveis do valor de K a serem usados na equação de Hazen-Williams, nos materiais produzidos no Brasil, são:

3.1. Cimento amianto, K = 0,375706

3.2. Aço zincado, K = 0,3300

4. O fator F, para tubulações de cimento amianto com múltiplas saídas, deve ser estimado usando-se o expoente hidráulico m = 1,85185.

LITERATURA CITADA

ASBRASIL, Aspersão no Brasil. *Catálogo de tubulação de Aço Zincado* - São Bernardo do Campo - SP.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprikling. *Bull 670 University of California*. Berkeley, California. Reprinted November 1972 at Utah State University Logan, Utah USA. 1942.

ETERNIT S.A. Tubos de Pressão. *Boletim Técnico 20.4* São Paulo - SP. 1978.

HURD, Clarence J. *Guia para el Riego por Aspersión.* Centro Regional de Ayuda Técnica. AID. México. 1974.

SPRINKLER IRRIGATION ASSOCIATION. *Sprinkler Irrigation*. Compiled and Edited by Claude H. Pair et alii Washington D.C. 1969.

MORRIS, H.M. and J.M. WIGGERT, *Applied Hydraulics in Engineering*. J. Wiley. New York. USA. 1973.

VENNARD, J.K. *Elementary Fluid Mechanics*. J. Wiley. New York. USA. 1961.

A N E X O

QUADRO 1 - **Número Máximo de Aspersores nas Tubulações Laterais como Função do Espaçamento entre eles e a Vazão de cada Aspersor - AÇO ZINCADO**

DIÂMETRO			ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES m	VAZÃO EM CADA ASPERSOR m^3/h										
EXT mm	EXT Pol	INT mm		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
50	2.0	48	6	23	18	15	13	12	11	10	9	9		8
			9	20	15	13	11	10	9	8	8	8	7	7
			12	18	13	11	10	9	9	8	7	7	6	6
			18	16	11	10	9	8	7	6	6	6	5	5
70	$2^{3/4}$	68	6	41	33	28	26	22	21	19	17	17	16	15
			9	37	29	25	21	18	18	16	15	14	13	12
			12	34	25	21	19	17	16	15	14	13	12	11
			18	29	22	19	16	14	14	12	11	11	10	10
89	$3^{1/2}$	87	6	65	50	43	37	33	31	29	26	26	25	23
			9	57	43	37	32	28	27	25	23	23	22	20
			12	51	39	34	29	26	25	23	21	20	19	18
			18	45	34	30	25	22	21	19	18	17	16	15
108	$4^{1/2}$	106	6	92	71	61	53	47	45	41	38	36	34	32
			9	79	61	53	46	40	38	35	33	32	30	28
			12	73	56	48	41	36	35	32	31	29	27	26
			18	68	52	43	37	33	31	28	26	25	23	22
PRESSÃO DE SERVIÇO DO ÚLTIMO ASPERSOR			Psi	30		35			40			45		
			kg/cm^2	2.10		2.45			2.80			3.15 kg/cm^2		
			m	21.10		24.60			28.12			31.63		

OBS: Os resultados obtidos se baseiam numa perda máximo de 20% da pressão de operação.

QUADRO 2 - Número Máximo de Aspersores nas Tubulações Laterais como Função do Espaçamento entre eles e a Vazão de cada Aspersor - Cimento Amianto ETERNIT

Diâmetro Nominal		Classe	Diâmetro Externo.	Pressão de Serviço	Espaçamento entre Aspersorres - m	VAZÃO EM CADA ASPERSOR m^3/h										
mm	Pol.	mm	mm	kg/cm^2		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
50	2	25	68	12.5	6	25	19	15	13	11	12	11	10	10	9	8
					9	22	16	13	11	10	10	9	8	8	8	7
					12	19	15	12	10	9	9	8	7	7	7	6
					18	16	13	11	9	8	8	7	6	6	6	5
60	$2^{1/2}$	25	78	12.5	6	35	26	23	20	17	16	15	14	14	13	12
					9	30	23	20	17	15	14	13	12	10	10	9
					12	27	20	18	15	14	13	12	11	10	9	9
75	3	20	93	10.0	6	51	40	34	30	26	25	23	21	20	19	18
					12	40	31	27	23	20	19	17	16	16	15	14
100	4	15	118	7.5	18	35	27	23	20	17	16	15	14	14	13	12
					6	85	65	57	49	43	41	38	35	34	32	30
					9	74	56	49	42	37	36	33	30	29	27	26
125	5	15	171	7.5	12	66	50	44	38	34	32	29	27	26	25	23
					18	57	44	38	33	29	28	25	23	23	21	20
					6	124	96	83	72	64	61	56	51	50	47	44
					9	107	83	72	63	55	52	48	44	43	40	38
					12	97	75	65	56	50	47	43	40	39	37	35
150	6	15	175	7.5	18	85	64	57	49	43	41	37	34	34	32	30
					6	170	130	113	99	87	83	77	71	69	64	61
					9	148	114	99	85	76	72	66	61	59	55	52
					12	133	102	90	77	69	65	60	55	53	50	47
					18	115	88	77	67	59	56	51	48	46	43	41
PRESSÃO DE SERVIÇO DO ÚLTIMO ASPERSOR					Psi	30		35			40			45		
					kg/cm^2	2.10		2.45			2.80			3.15		
					m	21.10		24.60			28.12			31.63		