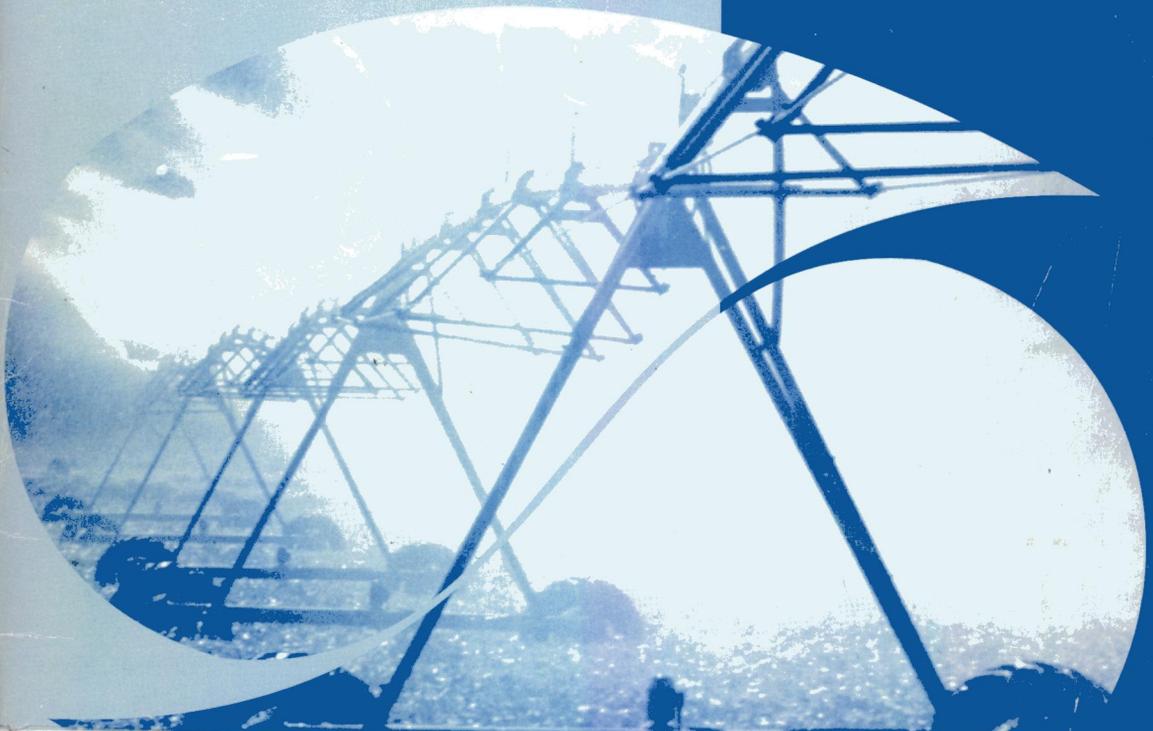


CPAC
C. 71
Ministério
da Cultura
do Patrimônio

DIMENSIONAMENTO DA LATERAL DE IRRIGAÇÃO DO PIVÔ-CENTRAL



CPAC
S586d
1998
LV-2004.01070

Euzebio Medrado da Silva
Juscelino Antônio de Azevedo

Dimensionamento da lateral de
1998 LV-2004.01070

29175-1



DOCUMENTO nº 71

ISSN 0102-0021
Dezembro, 1998



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

DIMENSIONAMENTO DA LATERAL DE IRRIGAÇÃO DO PIVÔ-CENTRAL

Euzebio Medrado da Silva
Juscelino Antônio de Azevedo

Planaltina, DF

1998

Copyright © Embrapa - 1998
Embrapa-CPAC. Documentos, 71

Embrapa	
Unidade:	AT-Sede
Valor aquisição:	
Data aquisição:	
N.º N. Fiscal/Fatura:	
Fornecedor:	
N.º CC:	
Origem:	Doação
N.º Registro:	3070/04

Exemplares desta publicação podem ser solicitados a:
Embrapa Cerrados
BR 020, km 18, Rodovia Brasília/Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73301-970 - Planaltina, DF
Telefone (061) 389-1171 - Fax (061) 389-2953

Tiragem: 200 exemplares

Comitê de Publicações:

Eduardo Delgado Assad (Presidente), Maria Alice Bianchi,
Daniel Pereira Guimarães, Leide Rovênia Miranda de
Andrade, Euzébio Medrado da Silva, Carlos Roberto
Spehar, José Nelsilene Sombra de Oliveira e Nilda Maria
da Cunha Sette (Secretária-Executiva).

Coordenação editorial: Nilda Maria da Cunha Sette

Revisão gramatical: Nilda Maria da Cunha Sette
Maria Helena Gonçalves Teixeira

Normalização bibliográfica: Dauf Antunes Correa

Diagramação e arte final: Jussara Flores de Oliveira

Capa: Chaile Cherne Evangelista

Impressão e acabamento: Jaime Arbués Carneiro e Divino B. de Souza

SILVA, E.M. da; AZEVEDO, J.A. de. Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô-central. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. 54p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 71).

1. Irrigação. 2. Irrigação - pivô-central. I. AZEVEDO, J.A. de. II. EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Planaltina, DF). III. Título. IV. Série.

631.7-CDD 21

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	5
1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	6
2 TAXAS DE APLICAÇÃO DE ÁGUA	8
3 CARACTERÍSTICAS DOS ASPERORES	12
4 CAPACIDADE DO SISTEMA	13
5 CARACTERIZAÇÃO DA LATERAL	14
5.1 Vazão na linha de distribuição	15
5.2 Velocidade de deslocamento	17
6 LOCALIZAÇÃO DOS ASPERORES NA LATERAL	19
6.1 Vazão em função do espaçamento	19
6.2 Espaçamento em função da vazão	20
7 PRESSÃO NA LATERAL	22
7.1 Perda de carga na tubulação	24
7.2 Diferenças de elevação no terreno	25
7.3 Perdas de carga localizadas	25
7.4 Pressão no final da linha	26
7.5 Pressão na entrada da linha	27
7.6 Distribuição da pressão ao longo da linha	27
8 ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DA ÁGUA ..	32
8.1 Taxa de aplicação do aspersor estacionário	33
8.2 Taxa de aplicação do aspersor em movimento	35

8.3	Taxa de aplicação de vários aspersores em um ponto da lateral	39
8.4	Lâmina total aplicada em um ponto da lateral	45
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

DIMENSIONAMENTO DA LATERAL DE IRRIGAÇÃO DO PIVÔ-CENTRAL

Euzebio Medrado da Silva¹
Juscelino Antônio de Azevedo²

INTRODUÇÃO

A área irrigada na região do Cerrado teve crescimento rápido, notadamente na década de 1980, em resposta aos programas de financiamento governamentais que buscavam promover o desenvolvimento da agricultura irrigada nesta região. O sistema de irrigação por pivô-central tem sido o mais adotado, devido principalmente à sua facilidade de operação, adaptabilidade às condições de solo e à topografia e seu baixo requerimento de mão-de-obra. A crescente demanda por pivô-central, nestes últimos 15 anos, tem incentivado o desenvolvimento da indústria brasileira no ramo da irrigação e o resultado tem sido a produção de uma variedade de equipamentos a um custo mais baixo. No entanto, a falta de controle rígido de qualidade desses equipamentos e a limitada orientação técnica que os produtores irrigantes dispõem sobre a irrigação, em geral, têm contribuído para que muitos sistemas sejam mal dimensionados e operem com desempenho inadequado.

O tradicional teste de avaliação da uniformidade de distribuição de água ao longo da linha lateral do pivô-central (ASAE, 1984) tem sido uma das ferramentas utilizadas para verificação do grau de desempenho do equipamento. Com o resultado desse teste, pode-se identificar facilmente os trechos da linha lateral que estão operando de forma inadequada, porém, a informação disponível não é suficiente para se estabelecer com precisão as mudanças exigidas para a melhoria do desempenho do equipamento. A alteração do padrão de distribuição de água do pivô passa necessariamente pela troca de emissores, contudo, isso não pode ser feito de forma alea-

¹ Eng. Agr., Ph.D., pesquisador da Embrapa Cerrados, km 18, BR 020, Caixa postal 08223, CEP 73301-970, Planaltina, DF.

² Eng. Agr., Ph.D., pesquisador da Embrapa Cerrados.

tória, porque a vazão requerida por unidade de comprimento da lateral do pivô varia e precisa ser conhecida para orientar as modificações a serem realizadas. Este trabalho tem por objetivo fornecer as principais relações para se proceder à análise hidráulica da lateral do pivô-central, permitindo o levantamento das informações necessárias para o redimensionamento do sistema de irrigação.

1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema de irrigação pivô-central consiste em uma lateral com aspersores que se movimenta em círculo, em torno de um ponto fixo, chamado pivô. A lateral é sustentada, acima do solo, por meio de uma estrutura metálica, constituída de tesouras, tirantes e cabos de aço, montada em torres sobre rodas. O movimento da estrutura é feito por motores, instalados em cada torre para acionamento dos moto-redutores das rodas. Esses motores são normalmente elétricos com potência variando entre 0,5 a 1,5 HP. Existem também os sistemas de pivô-central movidos a óleo ou a água (Addink *et al.*, 1983). O sistema movido a óleo é pouco conhecido no Brasil mas é comercialmente disponível nos EUA. O movido a água foi utilizado, principalmente, no desenvolvimento dos primeiros equipamentos de pivô-central.

O comprimento da lateral do sistema de irrigação por pivô-central é bastante variado, dependendo da necessidade do produtor, das características topográficas e das dimensões da área a ser irrigada. Existem laterais de pivô-central, variando desde 60 a 790 m de comprimento, correspondendo a uma área irrigada de 1,13 a 196 ha, respectivamente (Addink *et al.*, 1983). A lateral do pivô-central é ligada em cada torre por meio de junções móveis as quais conferem certa flexibilidade de ângulos verticais e horizontais para acomodar a estrutura metálica às variações de topografia e de alinhamento durante sua movimentação. Nos sistemas elétricos, o alinhamento é alcançado utilizando-se de um mecanismo de acionamento elétrico-mecânico que pára o movimento de determinada torre quando a lateral está alinhada, ou põe em funcionamento essa torre quando a lateral atinge um ângulo preestabelecido de desalinhamento. A velocidade de rotação

do equipamento é determinada pela movimentação da última torre, que comanda as demais ao se deslocarem em resposta ao acionamento de cada respectivo motor, buscando sempre a manutenção do grau de alinhamento preestabelecido.

Uma disposição típica de pivô-central encontra-se ilustrada na Figura 1. A tubulação lateral do equipamento pode girar para esquerda ou para direita ancorado no ponto pivô. Em geral, a condução de água da fonte até esse ponto é feita por meio de tubulação, com sistema de bombeamento localizado próximo ao manancial. Contudo, dependendo da situação, a água poderá ser conduzida através de canais para o ponto pivô, onde será instalado o conjunto moto-bomba. Vale destacar também que no caso de utilizar-se de um conjunto de equipamento de pivô-central para irrigação de uma

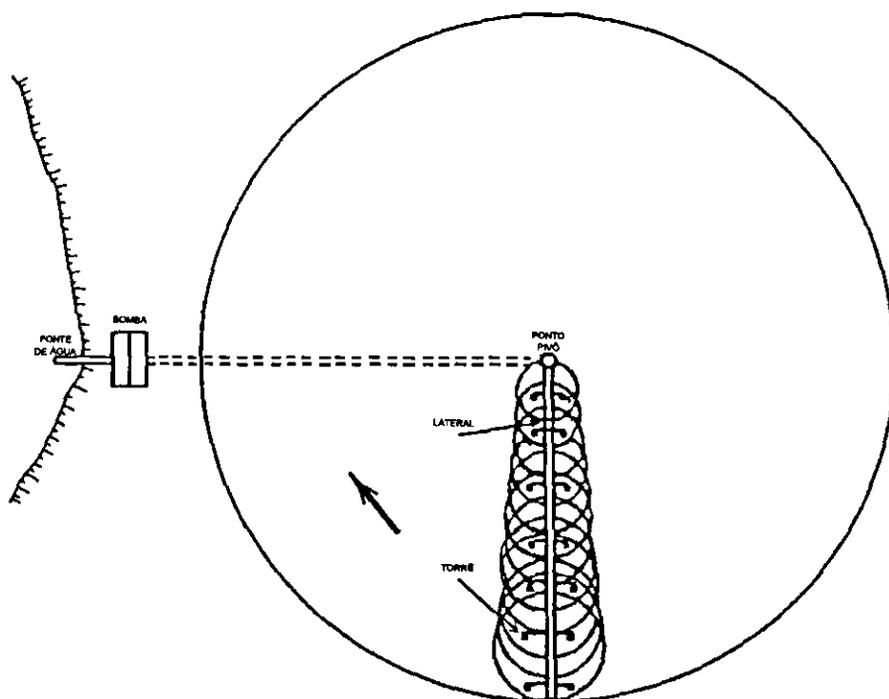


FIG. 1. Esquema típico de instalação de pivô-central.
Fonte: James (1988).

área contínua haverá sempre uma perda de área entre os equipamentos por causa do formato circular de aplicação de água do pivô-central. É importante ressaltar que nos EUA existem equipamentos de pivô-central dotados de um braço retrátil, localizado no final da lateral, que se estende em determinados locais da área irrigada, objetivando cobrir uma área de formato próximo ao retangular.

2 TAXAS DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

O sistema de irrigação por pivô-central caracteriza-se pela aplicação de água em taxas crescentes a partir do ponto pivô. Essa característica, de certa forma, representa limitação no uso do pivô-central, tornando-o mais apropriado para solos com alta capacidade de infiltração de água. A intensidade de aplicação da água na extremidade final do equipamento aumenta com o comprimento da lateral. De modo que os problemas de escoamento superficial geralmente surgem nas últimas torres do pivô-central. A ocorrência de escoamento de água na superfície é indesejável tanto do ponto de vista da uniformidade de distribuição da água como das possibilidades de erosão do solo. Na eventualidade da taxa de aplicação de água exceder à capacidade de infiltração de água no solo, pode-se adotar um regime de manejo de água baseado em lâminas freqüentes para minimizar a ocorrência do escoamento superficial. Nessa forma de manejo, o tempo de exposição do solo à irrigação é reduzido, de forma que a aplicação ocorra no momento em que o solo estiver com maior capacidade de absorção da água (Dillon *et al.*, 1972).

As taxas de aplicação de água, ilustradas na Figura 2, referem-se à mesma posição da lateral do pivô-central, diferindo apenas em relação à velocidade de deslocamento do equipamento. Na primeira distribuição, a irrigação ocorreu meia hora, na segunda uma hora e na terceira duas horas. Observa-se que, nos dois últimos casos, as taxas de aplicação ultrapassam a capacidade de absorção de água do solo, estabelecendo as condições para acumulação de água na superfície. Essa ilustração demonstra claramente que esse pivô deve ser manejado com o esquema de irrigações mais freqüentes.

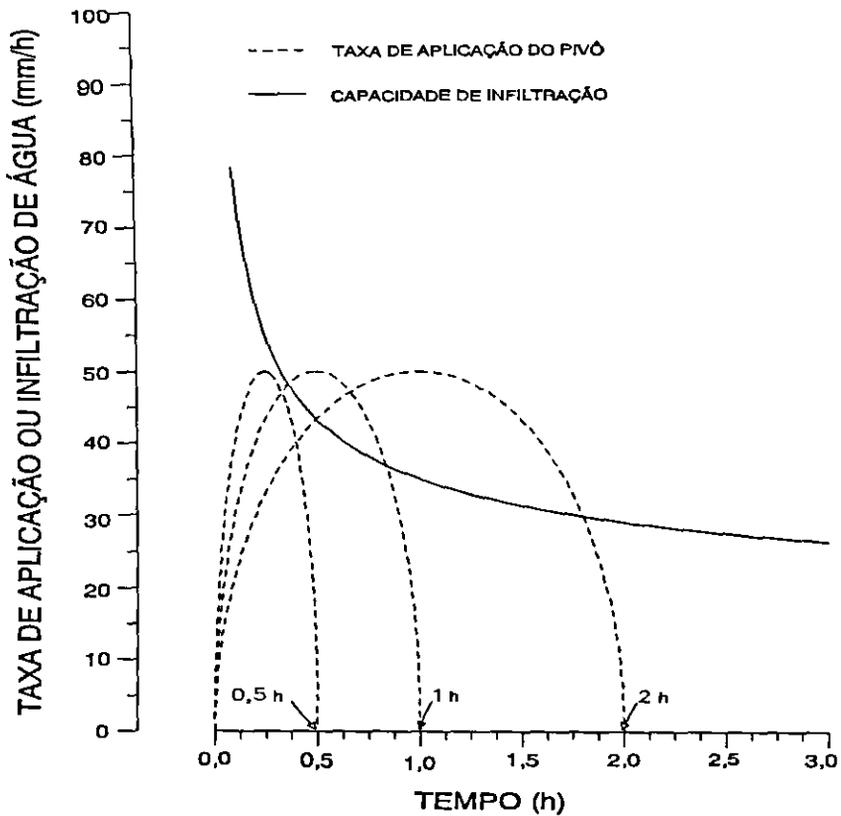


FIG. 2. Características de infiltração do solo e curvas de distribuição de água típicas da extremidade final da lateral de um pivô-central, considerando três velocidades de operação.

Os tipos de aspersores utilizados, seu espaçamento ao longo da lateral, e o raio de alcance de cada um têm efeito significativo na intensidade de aplicação da água do pivô-central. Em geral, destacam-se três tipos de disposições de aspersores com resultados diferentes, em relação às taxas de aplicação de água ao longo da lateral de um pivô-central (Figura 3).

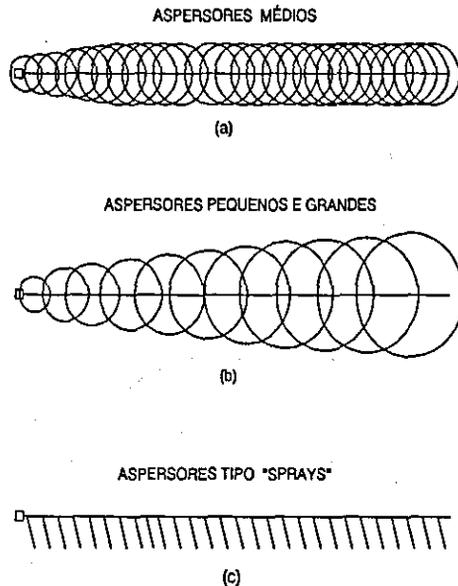


FIG. 3. Tipos de distribuição de água em pivô-central.
 Fonte: Addink *et al.* (1983)

O primeiro padrão de distribuição de água (Figura 3a) resulta da utilização de aspersores rotativos do tipo impacto e de tamanho médio, com bocais de diâmetro constante ou variável. Nesse tipo de arranjo, os aspersores com bocais constantes são colocados na lateral com espaçamento decrescente em relação ao ponto pivô. No caso de se variar também o diâmetro dos bocais, inicia-se com aspersores de bocais menores, aumentando seu tamanho na direção da extremidade final da lateral. Um pivô desse tipo, com 400 m de raio, normalmente, utiliza cerca de 85 a 100 aspersores, requerendo uma pressão, no ponto pivô, de 300 a 500 kPa (30,6 a 51,0 m.c.a.) para a adequada operação (Addink *et al.*, 1983).

O segundo padrão de distribuição de água (Figura 3b) resulta da utilização de aspersores rotativos do tipo impacto e de tamanho variado. Nesse caso, começa-se com aspersores pequenos, próximos ao

ponto pivô e termina com aspersores grandes na extremidade final da lateral do equipamento. Nessa disposição, geralmente, adota-se o mesmo espaçamento entre aspersores, enquanto seu tamanho, e conseqüentemente a vazão, aumentam gradualmente ao longo da lateral de forma a compensar a lâmina aplicada. Nessa disposição, segundo Addink *et al.* (1983), uma lateral de 400 m utiliza, normalmente, cerca de 35 a 40 aspersores, operando com uma pressão de serviço no ponto pivô de 400 a 700 kPa (40,8 a 71,4 m.c.a.).

O terceiro arranjo de colocação de aspersores na lateral do pivô-central é obtido, utilizando-se de aspersores do tipo *sprays* ou difusores (Figura 3c). Esses aspersores possuem um padrão de distribuição estático diferente daqueles do tipo impacto que são rotativos. Essa categoria de aspersores utiliza o difusor para efetuar a quebra do jato de água e promover sua distribuição. Os aspersores podem ser distribuídos ao longo da lateral com mesmo espaçamento, variando o tamanho dos bocais, ou com espaçamento decrescente, a partir do ponto pivô, mas mantendo a mesma vazão dos aspersores. Os equipamentos projetados com difusores são normalmente de baixa pressão, operando com 140 a 275 kPa (14,3 a 28,0 m.c.a) no ponto pivô (Addink *et al.*, 1983).

O sistema de irrigação por pivô-central, equipado com difusores, apresenta padrão de distribuição de água caracterizado por gotas pequenas e altas taxas de aplicação. Na lateral de 400 m, é comum obter-se taxas de aplicação no final da linha da ordem de 150 a 300 mm/h. Nas mesmas condições, os equipamentos projetados com aspersores rotativos de tamanho médio apresentam taxas máximas de aplicação variando de 50 a 80 mm/h, enquanto aqueles dotados de aspersores do tipo impacto, de tamanho variado, apresentam taxas máximas de aplicação de 25 a 40 mm/h (Addink *et al.*, 1983).

As taxas de aplicação de água que caracterizam cada equipamento dependem do tipo de aspersor utilizado, da pressão de serviço adotada e do comprimento da lateral projetada. Assim sendo, uma vez definido o sistema, a taxa de aplicação do equipamento fica estabelecida, cabendo ao usuário variar a velocidade de deslocamento da lateral para obtenção das lâminas de água desejadas.

3 CARACTERÍSTICAS DOS ASPERORES

A escolha correta dos aspersores representa um dos pontos fundamentais do projeto de um pivô-central. O dimensionamento dos aspersores consiste no cálculo de sua vazão e da pressão de serviço, devido a sua distância em relação ao ponto pivô. Uma vez definidos esses parâmetros operacionais, selecionam-se, dentre as alternativas disponíveis no mercado, os aspersores que mais se aproximam das características hidráulicas calculadas. Além disso, a escolha do conjunto de aspersores deve levar, também, em consideração as características de infiltração do solo, as condições prevaletentes do vento na área irrigada e seu tipo de distribuição de água.

O perfil de distribuição de água dos aspersores depende da pressão de operação e do tipo de aspersor utilizado. A Figura 4 ilustra alguns casos de distribuição de água em virtude do tipo de aspersor utilizado.

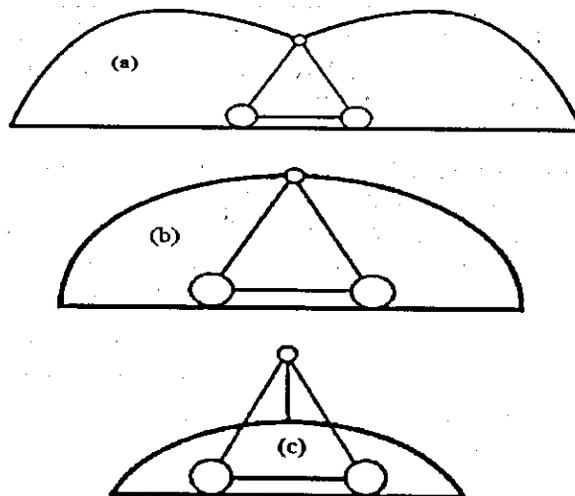


FIG. 4. Perfis típicos de distribuição de água de aspersores usados em pivô-central. (a) aspersores rotativos de impacto; (b) aspersores tipo *sprays*, colocados no topo da lateral; (c) aspersores do tipo *sprays*, instalados em bengalas.

Fonte: James (1988).

É importante destacar que para obter melhor padrão de uniformidade ao longo da lateral, os aspersores devem ser espaçados de tal forma que cada ponto do solo receba água proveniente de pelo menos três aspersores, ou seja: o raio de alcance de cada aspersor é uma informação importante a ser considerada no dimensionamento.

4 CAPACIDADE DO SISTEMA

A vazão do sistema, para efeito de dimensionamento do pivô-central, depende do comprimento da lateral, do requerimento de água da cultura de maior demanda do sistema produtivo utilizado e da eficiência de irrigação. O cálculo da vazão do sistema pode ser efetuado, utilizando a seguinte expressão:

$$Q_0 = K \frac{(R^2)(E_t)}{(T_o)(E_f)} \quad (1)$$

onde

- Q_0 = vazão do sistema (l/s);
- K = constante igual a $8,7266 \times 10^{-4}$;
- R = raio irrigado pela lateral do pivô (m);
- E_t = requerimento máximo de água da cultura mais exigente (mm/dia);
- E_f = eficiência de irrigação (decimal);
- T_o = tempo de operação por dia (horas).

O raio irrigado R , corresponde à distância do ponto pivô até o último aspersor acrescido de uma fração do raio molhado deste último aspersor. Em caso de utilização de um aspersor do tipo canhão no final da linha, recomenda-se considerar um raio irrigado adicional correspondente a 40% da raio de alcance do aspersor final (James, 1988). Em sistemas que não usam canhão final, reco-

menda-se utilizar como raio irrigado adicional o comprimento equivalente à metade do espaçamento do último aspersor.

Exercício 1. Considere uma lateral de um pivô-central com as seguintes características:

- Comprimento da tubulação = 395,8 m
- Espaçamento entre aspersores = 3,2 m
- Localização do último aspersor na tubulação = 393,6 m
- Eficiência de irrigação planejada = 86,7%
- Lâmina líquida diária requerida = 6,8 mm
- Tempo de operação por dia = 20 horas
- O sistema não possui canhão na extremidade final.

Determine a vazão requerida para esse sistema de irrigação.

Solução: Em primeiro lugar, estima-se o raio irrigado do pivô-central da seguinte forma:

$$\begin{aligned} R &= 393,6 + 3,2 / 2 \\ &= 395,2 \text{ m} \end{aligned}$$

Em seguida, determina-se a vazão do sistema, utilizando a fórmula (1), ou seja:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 8,7266 \times 10^{-4} \frac{(395,2)^2 (6,8)}{0,867} \\ &= 53,449 \text{ l/s} \end{aligned}$$

5 CARACTERIZAÇÃO DA LATERAL

A lateral do pivô-central é normalmente constituída de uma tubulação de aço galvanizado. Com o passar do tempo, esse material fica sujeito à corrosão interna e externamente. Com o envelhecimento do aço galvanizado e à medida que a ferrugem ataca a parede do tubo, pequenas placas se desprendem internamente, provocando obstrução da passagem de água nos reguladores de pres-

são e aspersores. Alguns fabricantes de pivô-central usam esse argumento para justificar a utilização de tubulações revestidas com tinta à base de *epoxi* que além de reduzir os riscos de corrosão diminuem substancialmente a perda de energia devido à fricção do fluxo da água com as paredes internas da tubulação.

O diâmetro externo da lateral do pivô-central, geralmente, varia entre 100 e 250 mm (4 e 10 pol.), sendo, no entanto, os diâmetros de 6½ (168 mm) e 8 (200 mm) polegadas considerados os mais comuns (James, 1988). Recomenda-se que a escolha do diâmetro da lateral de um pivô-central seja baseada em uma análise econômica, considerando o balanço entre o custo do material e o custo da energia. Diâmetros maiores resultam em menores perdas de carga na tubulação e, conseqüentemente, menor potência requerida para o sistema, resultando em menor consumo de energia. Por outro lado, a escolha de diâmetros maiores significa custos mais elevados com a aquisição do equipamento. Os primeiros equipamentos de pivô-central, implantados no Brasil, utilizavam diâmetro de tubulação de 6½ polegadas, independentemente do comprimento da linha. Nesses casos, os equipamentos com mais de doze torres apresentavam perdas de cargas elevadas ao longo da linha lateral do pivô, resultando em um custo muito alto de energia do sistema. Atualmente, os equipamentos já estão sendo dimensionados com uma combinação de diâmetros de 8 e 6½ polegadas, procurando reduzir os requerimentos de energia do sistema.

5.1 Vazão na linha de distribuição

A vazão na lateral decresce progressivamente à medida que se afasta do centro do pivô-central, e seu valor depende da distância do aspersor em relação ao ponto pivô e do comprimento do raio irrigado. Essa relação é definida pela seguinte equação:

$$Q_r = Q_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2)$$

onde

- r = distância em relação ao ponto pivô (m);
- Q_0 = vazão do sistema no ponto pivô (l/s);
- Q_r = vazão logo após o ponto r (l/s);
- R = raio irrigado (m).

Exercício 2. Determine a vazão logo após o 100º aspersor de um pivô-central com as seguintes características:

- Capacidade do sistema = 53,449 l/s;
- Espaçamento entre aspersores = 3,2 m
- Raio irrigado = 395,2 m

Solução: Primeiro, determine a distância entre o ponto pivô e o 100º aspersor, ou seja:

$$\begin{aligned} r &= 3,2 \times 100 \\ &= 320 \text{ m} \end{aligned}$$

Em seguida, calcule a vazão que circula na linha lateral logo após a posição 320 m da tubulação do pivô-central, utilizando a equação (2):

$$\begin{aligned} Q_{320} &= 53,449 \times \left(1 - \frac{320^2}{(395,2)^2} \right) \\ &= 18,406 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Essa é a vazão que sobra na tubulação após alimentar os 100 aspersores existentes até a posição 320 m. A lista completa de vazões ao longo da lateral do pivô de dez torres está no Apêndice A.

É importante destacar que as primeiras posições calculadas para aspersores na lateral, normalmente não são preenchidas, pois é necessário deixar uma área circunvizinha ao ponto pivô sem irrigação, para ser utilizada como espaço de manobras e para instalação

de equipamentos diversos, como os de aplicação de produtos químicos via água de irrigação. Geralmente, deixa-se sem irrigação os primeiros 10 a 15 metros do ponto pivô.

5.2 Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento da lateral de um pivô-central é controlada na última torre. Nos sistemas elétricos, essa velocidade é estabelecida por um temporizador, instalado na caixa de comando central do pivô, o qual controla o tempo de acionamento e a parada do motor da última torre. Por exemplo, a situação em que o tempo de parada do motor é igual ao de movimento corresponde à regulação de 50% da velocidade máxima estabelecida pelo percentímetro de controle do temporizador. Na velocidade máxima de 100%, o motor da última torre fica continuamente em movimento.

Uma das informações importantes no dimensionamento de um pivô-central é a velocidade de deslocamento da lateral. Essa velocidade depende das características construtivas do moto-reductor, da redução na roda e da rotação do motor de cada torre. Por exemplo, a rotação inicial de um motor de 1750 rpm, operando em um sistema com redução de 50:1 no moto-reductor e de 52:1 na redução da roda, cai para 0,58 rpm ($= 1750/50/52$). A velocidade máxima desse sistema, na última torre, tendo o diâmetro de roda de 1,16 m, é igual a 126 m/h ($= 0,58 \times 3,14 \times 1,16 \times 60$).

Em geral, a velocidade linear dos pivôs situa-se na faixa de 120 a 300 m/min. Essa velocidade e o comprimento do raio até a última torre determinam o tempo de rotação que leva o pivô para completar um giro. Esse tempo, conhecido por tempo de giro ou de rotação, pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$t_g = \frac{2 \pi r_n}{v} \quad (3)$$

onde

- t_g = tempo de giro da lateral do pivô-central (h);
- r_u = distância da última torre em relação ao ponto pivô (m);
- v = velocidade linear no arco de deslocamento da última torre (m/h).

Exercício 3. Determine o tempo de giro de um pivô-central que se desloca a 50% da velocidade máxima, sabendo que a velocidade da última torre é de 126 m/h e que essa encontra-se a 386,8 m do ponto pivô.

Solução: A velocidade linear média de deslocamento desse pivô, na última torre, é de 63 m/h (= 50 x 126/100).

Dessa forma, calcula-se o tempo de giro, utilizando a equação (3) da seguinte maneira:

$$t_g = \frac{2 \times 3,14 \times 386,8}{63}$$
$$= 38,58 \text{ h}$$

Esse mesmo pivô deslocando-se a 100% da velocidade máxima fará um giro completo na metade do tempo obtido do exercício anterior, ou seja 19,29 h.

Em muitas situações, no processo de dimensionamento da lateral de um pivô-central, há necessidade de se conhecer a velocidade angular de deslocamento do equipamento, em vez da velocidade linear de rotação. Nesse caso, a velocidade angular é calculada utilizando a seguinte relação:

$$\omega = \frac{v}{r_u} \quad (4)$$

onde

ω = velocidade angular (rad/h);

Exercício 4. Calcule a velocidade angular de um pivô-central que se desloca a uma velocidade contínua de 126 m/h, medida na última torre a qual se encontra a 386,8 m do ponto pivô:

Solução: Utilizando-se a equação (4), chega-se ao seguinte resultado:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{126}{386,8} \\ &= 0,3257 \text{ rad / h}\end{aligned}$$

6 LOCALIZAÇÃO DOS ASPERSORES NA LATERAL

Uma das fases importantes do dimensionamento de um pivô-central é a definição do local de instalação dos aspersores, que depende da vazão de cada um. Em geral, quando a vazão é conhecida, calcula-se a posição do aspersor; ao contrário, quando o espaçamento é conhecido determina-se a vazão do aspersor. Essa última alternativa é a opção comumente adotada pela indústria, pois a padronização do espaçamento entre saídas nas tubulações facilita o processo de fabricação e os trabalhos de montagem do equipamento no campo.

6.1 Vazão em função do espaçamento

Uma vez estabelecido o espaçamento entre os aspersores e, conseqüentemente, definida sua posição na lateral, calcula-se a vazão (q_r) de cada aspersor, utilizando a seguinte expressão:

$$q_r = Q_{r-1} - Q_r \quad (5)$$

onde

- r = distância do aspersor em relação ao ponto pivô (m);
- $r - 1$ = ponto localizado a uma distância r menos um espaçamento entre aspersores (m);
- Q_{r-1} = vazão da lateral que passa pelo ponto $r-1$ (l/s).

Exercício 5. Determine a vazão de um aspersor, localizado a 320 m de distância do centro de um pivô-central com as seguintes características:

- Capacidade do sistema = 53,449 l/s
- Espaçamento entre aspersores = 3,2 m
- Raio irrigado = 395,2 m

Solução: Primeiro, determine a vazão que passa pela posição 320 m e em seguida calcule a vazão que passa pelo aspersor anterior mais próximo, o qual se encontra na posição 316,8 m. A diferença de vazão entre os dois pontos considerados será igual à do aspersor na posição solicitada.

A vazão que passa pela posição 320 m é de 18,406 l/s, conforme ficou demonstrado no exercício 2.

A vazão que passa pela posição 316,8 m é calculada utilizando-se a equação (2):

$$\begin{aligned} Q_{316,8} &= 53,449 \times \left(1 - \frac{(316,8)^2}{(395,2)^2} \right) \\ &= 19,103 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Dessa forma, obtém-se a vazão do aspersor na posição requerida, aplicando-se a equação (5):

$$\begin{aligned} q_{320} &= Q_{316,8} - Q_{320} \\ &= (19,103 - 18,406) \text{ l/s} \\ &= 0,697 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Outros valores de vazão ao longo da lateral de um pivô-central de dez torres encontram-se listados no apêndice A.

6.2 Espaçamento em função da vazão

Quando a vazão dos aspersores é conhecida e constante, o dimensionamento do pivô-central consiste, basicamente, em deter-

minar a distância de cada aspersor ao longo da lateral, em relação ao ponto pivô. Nesse caso, a fórmula para o cálculo da posição de cada aspersor é a seguinte:

$$r_n = R \left(\frac{n q}{Q_o} \right) \quad (6)$$

onde

- r_n = distância do enésimo aspersor em relação ao ponto pivô (m);
- q = vazão do aspersor (l/s);
- n = número de ordem do aspersor.
- R = raio irrigado (m)
- Q_o = vazão do pivô (l/s)

Nesse caso, o número total de aspersores na lateral (N_q) pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$N_q = \frac{Q_o}{q} \quad (7)$$

O valor de N_q , encontrado mediante o emprego da fórmula (7), deve ter sua parte decimal eliminada, considerando apenas a parte inteira.

Exercício 6. Suponha que um pivô-central com uma vazão de 53,449 l/s tenha sido dimensionado com aspersores de vazão fixa em torno de 0,53 l/s. Calcule a posição do quinto aspersor e o número total de aspersores considerando o raio irrigado da lateral igual a 395,2 m.

Solução: Os dados do problema estabelecem que:

$$\begin{aligned} Q_o &= 53,449 \text{ l/s} \\ n &= 5 \\ q &= 0,53 \text{ l/s} \\ R &= 395,2 \text{ m} \end{aligned}$$

A localização do quinto aspersor pode ser determinada pela equação (6), conforme indicado a seguir:

$$\begin{aligned}r_5 &= 395,2 \left(\frac{(5) (0,53)}{53,449} \right) \\ &= 19,59 \text{ m}\end{aligned}$$

O número de aspersores na lateral do pivô é então calculada, utilizando a equação (7):

$$\begin{aligned}N_q &= \frac{53,449}{0,53} \\ &\cong 101 \text{ aspersores}\end{aligned}$$

7 PRESSÃO NA LATERAL

A uniformidade de aplicação de água na área irrigada pelo pivô-central está intimamente ligada à variação de pressão ao longo da linha lateral. A água ao fluir pela tubulação de distribuição produz perda de pressão devido à fricção nas paredes internas do tubo, nas conexões, nos aspersores e nas demais peças singulares. Nesse caso, a pressão na tubulação cai progressivamente na direção da extremidade final da lateral. As diferenças de nível no terreno também constituem causa de variação de pressão, que poderá aumentar ou diminuir, ao longo da lateral, em razão das elevações e das depressões na área.

Um princípio normalmente adotado para reduzir a variação de pressão na lateral é a utilização de reguladores de pressão em cada aspersor. Do ponto de vista hidráulico, esses dispositivos devem ser evitados, principalmente, quando se tratar de variação de pressão devido à perda de carga excessiva ao longo da lateral. Nesse caso, o usuário estaria desperdiçando a energia bombeada em um dispositi-

vo de quebra de energia que não resulta em nenhum trabalho útil para o sistema. No entanto, em topografias irregulares, o uso do regulador de pressão é desejável para se obter maior uniformidade de aplicação de água. Nessa situação, o regulador de pressão estaria dissipando a energia gravitacional e não desperdiçando a energia de bombeamento.

7.1 Perda de carga na tubulação

A perda de carga (h_l) em uma tubulação com saídas, como é caso da lateral de um pivô-central, é menor do que a perda de carga em uma tubulação sem saídas, a exemplo de uma adutora. Na lateral com saídas (aspersores), a vazão decresce do início para o final da linha e com isso há redução gradativa da perda de carga na tubulação. Essa perda de carga pode ser obtida da seguinte forma:

$$h_l = F \times h_f \quad (8)$$

onde

F = fator de redução (decimal)

h_f = perda de carga em uma tubulação sem saídas laterais (m).

A perda de carga (h_f) varia diretamente com a vazão e o comprimento da linha e indiretamente com o diâmetro da tubulação. Seu valor pode ser estimado facilmente utilizando-se da seguinte fórmula de Hazen-Williams:

$$h_f = K \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{(D)^{4,87}} l \quad (9)$$

onde

- K = constante igual a $1,22 \times 10^{10}$;
- Q = vazão do sistema (l/s);
- C = constante dependente do material da tubulação;
- D = diâmetro da tubulação (mm);
- l = comprimento do trecho considerado (m).

Para os materiais normalmente utilizados em sistemas de irrigação por pivô-central, os valores de C são os seguintes: aço galvanizado novo ($C=120$); plástico (PVC) ($C=150$) e ferro fundido novo ($C=130$). Os dois últimos são comumente utilizados em adutoras.

O valor de F da equação (8) depende da fórmula utilizada no cálculo da perda de carga da tubulação sem saídas. No caso da fórmula de Hazen-Williams, o valor de F é igual a 0,548 (Chu & Moe, 1972).

Exercício 7. Determine a perda de carga na lateral de um pivô-central com capacidade de 53,449 l/s, dimensionado com uma tubulação de aço zincada com diâmetro nominal de 6½ de polegadas e com o último aspersor posicionado a 386,8 m do ponto pivô.

Solução: A perda de carga na lateral pode ser calculada, combinando as fórmulas (8) e (9) e considerando o valor de $F=0,548$. É importante destacar que o diâmetro interno da tubulação de 6½ polegadas é igual a 168 mm e o coeficiente C da equação (9) é igual a 120.

$$h_l = 0,548 \times 1,22 \times 10^{10} \times \frac{\left(\frac{53,449}{120}\right)^{1,852}}{(168)^{4,87}} \times 393,6$$
$$\cong 8,56 \text{ m}$$

7.2 Diferenças de elevação no terreno

O efeito das diferenças de nível do terreno sobre a pressão na lateral do pivô-central pode ser de ganho ou perda de pressão, dependendo se a posição da lateral estiver em declive ou aclive, respectivamente, em relação ao ponto pivô. Do ponto de vista do dimensionamento, considera-se a lateral posicionada no aclive mais forte do terreno e toma-se como base de cálculo para perda de pressão o aclive médio observado nessa posição. Dessa forma, a elevação da lateral, devido ao aclive, em qualquer posição da lateral, pode ser dada pela seguinte fórmula:

$$Z_r = \frac{i\% \cdot r}{100} \quad (10)$$

onde

Z_r = elevação da lateral na posição r (m);
 $i\%$ = aclive médio na posição mais crítica do terreno (m).

Exercício 8. Determine a elevação da lateral na posição correspondente ao último aspersor que se encontra a 393,6 m do ponto pivô, sabendo que o aclive médio mais forte da área é de 3%.

Solução: Nesse caso, o ponto considerado está no final da linha, onde $r = L$ e esse igual a 393,6 m. Assim, considerando o aclive de $i\% = 3$, pode-se calcular a elevação da lateral da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} Z_L &= \frac{3 \times 393,6}{100} \\ &= 11,808 \text{ m} \end{aligned}$$

7.3 Perdas de carga localizadas

As perdas de carga (h_c), produzidas nas conexões (curvas, saídas de água, registros), são, geralmente, pequenas e, por isso, nor-

malmente, são ignoradas. Essas perdas de carga decorrem diretamente da velocidade da água e das características físicas restritivas ao fluxo estabelecidas pela conexão. Na verdade, para cada conexão existe uma formulação específica para se calcular a magnitude da perda de carga associada. Contudo, em geral, não vale a pena o trabalho de determinar individualmente essas perdas, adotando-se como solução, acrescer a pressão do sistema no ponto pivô de valores entre 5% e 10% da perda de carga da lateral (h_c).

Exercício 9. Estime a perda de carga localizada na lateral do pivô-central, sabendo que a perda de carga devido ao atrito foi de 8,56 m.

Solução: Assumindo o valor de 10% para as perdas de carga localizadas, tem-se:

$$\begin{aligned}h_c &= 0,10 \times 8,56 \\ &= 0,856 \text{ m}\end{aligned}$$

7.4 Pressão no final da linha

A pressão no final da linha lateral P_L tem de ser suficiente para suprir a pressão de serviço do último aspersor (P_s), acrescida da elevação do final da linha devido ao aclive (Z_L) e do diferencial atribuído às perdas de carga localizadas (h_c), mais a altura da lateral em relação ao solo (h_a), ou seja:

$$P_L = P_s + Z_L + h_c + h_a \quad (11)$$

Exercício 11. Determine a pressão no final da lateral de um pivô-central com os aspersores localizadas a 2,5 m em relação ao ponto pivô, sabendo que $P_s = 14,06$ m; $Z_L = 11,808$ m; $h_c = 0,856$ m.

Solução: O resultado pode ser obtido aplicando diretamente a equação (11):

$$\begin{aligned}P_L &= 14,06 + 11,808 + 0,856 + 2,5 \\ &= 29,224 \text{ m}\end{aligned}$$

7.5 Pressão na entrada da linha

A pressão na entrada linha lateral P_0 tem de ser suficiente para suprir a pressão no final da linha (P_L), acrescida das perdas carga na lateral devido ao atrito (h_f), ou seja:

$$P_0 = P_L + h_f \quad (12)$$

Exercício 10. Determine a pressão na entrada da lateral de um pivô-central, sabendo que $P_L = 29,224 \text{ m}$ e $h_f = 8,56 \text{ m}$.

Solução: A pressão na entrada da lateral pode ser calculada, utilizando simplesmente a equação (12):

$$\begin{aligned}P_0 &= 29,224 + 8,56 \\ &= 37,784 \text{ m}\end{aligned}$$

7.6 Distribuição da pressão ao longo da linha

A pressão é máxima no ponto pivô e decresce ao longo da linha devido à perda de carga ocasionada pelo fluxo da água na tubulação. No cálculo da distribuição de pressão na linha, elas são calculadas considerando o decréscimo não linear da perda de carga,

a variação linear de ganho ou perda de pressão devido ao declive ou aclave, respectivamente, o acréscimo de valor constante de pressão para compensação das perdas localizadas e da altura dos aspersores.

7.6.1 Cálculo pelo método analítico

Nesse procedimento de cálculo, a pressão ao longo da lateral é calculada analiticamente, considerando a fórmula proposta por Chu & Moe (1972), desenvolvida para o caso das laterais compostas de tubulação com um só diâmetro e pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_r = P_L + h_f \left[1 - \frac{15}{8} \left(\frac{r}{L} - \frac{2}{3} \left(\frac{r}{L} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{r}{L} \right)^5 \right) \right] + (Z_L - Z_r) \quad (13)$$

onde

- L = distância do ponto pivô até a posição do último aspersor (m);
- r = uma posição específica da lateral no intervalo entre 0 e L (m);
- P_r = pressão na posição r (m);
- h_f = perda de carga na lateral devido ao atrito (m);
- P_L = pressão requerida no final da linha (m);
- Z_r = elevação da lateral na posição r (m);
- Z_L = elevação da lateral na posição L (m).

Exercício 12. Determine a pressão na lateral de um pivô, a uma distância de 320 m do ponto pivô, considerando as seguintes informações:

- Distância do último aspersor ao ponto pivô = 393,6 m
- Pressão requerida no final da linha = 29,224 m

- Perda de carga localizada = 0,856 m
- Perda de carga na lateral = 8,56 m
- Aclive médio do terreno na posição mais crítica = 3% m
- Altura dos aspersores em relação ao ponto pivô = 2,5 m.

Solução: Para o aclive de 3%, as alturas de elevação nos pontos $r=320$ m e $L=393,6$ m são 9,6 m e 11,808 m, respectivamente. Dessa forma, a pressão na distância considerada pode ser calculada diretamente por meio da equação (13), a seguir:

$$\begin{aligned}
 P_{320} &= 29,224 + 8,56 \times \left[1 - \frac{15}{8} \left(\frac{320}{393,6} - \frac{2}{3} \left(\frac{320}{393,6} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{320}{393,6} \right)^5 \right) \right] + (11,808 - 9,6) \\
 &= 29,224 + 8,56 \times [0,0141] + 2,208 \\
 &= 31,553 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Esse procedimento pode ser repetido para qualquer ponto da tubulação e assim determinar a distribuição de pressão ao longo da lateral. O apêndice A apresenta uma lista completa dos valores de pressão para outros pontos dessa lateral.

7.6.2 Cálculo pelo método numérico

Nesse procedimento, a lateral é subdividida em trechos compreendidos entre os aspersores. Tomando-se como ponto de partida a pressão do último aspersor, obtêm-se as pressões sucessivas adicionando-se a perda de carga de cada trecho ao valor de pressão conhecido. As diferenças de elevação também são consideradas trecho por trecho. De maneira geral, a seqüência de cálculo pode ser expressa pela seguinte fórmula recursiva:

$$P_{r,i} = P_r + \Delta h_f + \Delta Z \quad (14)$$

onde

P_r = pressão na posição r da lateral no intervalo entre 0 e L (m);

- P_{r-1} = pressão na posição $r-1$, imediatamente anterior a r (m);
- Δh_f = perda de carga na tubulação no trecho compreendido entre r e $r-1$ (m);
- ΔZ = diferença de elevação ($Z_r - Z_{r-1}$) no trecho considerado (m);

É importante salientar que nesse procedimento, inicia-se o cálculo na extremidade final da lateral, partindo-se da pressão no final da linha $r=L$ e mediante adições sucessivas das perdas de carga de cada trecho da tubulação, determina-se a pressão requerida para cada um dos aspersores.

Exercício 13. Determine a pressão na lateral de um pivô, com tubulação de aço zincado de 168 mm de diâmetro a uma distância de 387,2 m do ponto pivô, considerando as seguintes informações:

- Vazão no ponto pivô = 53,449 l/s
- Raio irrigado = 395,2 m
- Pressão requerida no final da linha = 29,224 m
- Perda de carga localizada = 0,856 m
- Aclive médio do terreno na posição mais crítica = 3% m
- Altura dos aspersores em relação ao ponto pivô = 2,5 m
- Localização do último aspersor = 393,60 m
- Espaçamento entre aspersores = 3,2 m

Solução: Nesse caso, o cálculo envolverá dois trechos da tubulação, uma vez que o último aspersor está localizado a 393,6 m do início da lateral para um raio irrigado R de 395,2 m.

a) Trecho compreendido entre $r-1 = 390,4$ m e $r = 393,6$ m.

A vazão nesse trecho é representada pelo fluxo de água que passa pelo ponto $r-1 = 390,4$ m e chega ao ponto $r = 393,6$ m, o que de acordo com a equação (2) pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_{390,4} = 53,449 \left(1 - \frac{390,4^2}{395,2^2} \right) = 1,290 \text{ l/s}$$

A perda de carga nesse trecho devido ao atrito pode ser calculada utilizando a equação (9), considerando $l=3,2$ m e $h_f = \Delta h_f$, ou seja:

$$\Delta h_f = 1,22 \times 10^{-10} \frac{\left(\frac{1,290}{120}\right)^{1,852}}{(168)^{4,87}} 3,2 = 0,000128 \text{ m}$$

A diferença de elevação ΔZ no trecho considerado pode ser calculada utilizando a equação (10), tendo em vista o valor de $r=3,2$ m e $Z_i = \Delta Z$, como demonstrado a seguir:

$$\Delta Z = \frac{3 \times 3,2}{100} = 0,096 \text{ m}$$

Assim sendo, a pressão no ponto considerado é a seguinte:

$$P_{390,4} = 29,224 + 0,000128 + 0,096 = 29,320 \text{ m}$$

b) Trecho compreendido entre $r-1 = 387,2$ e $r = 390,4$.

A vazão nesse trecho é representada pelo fluxo de água que passa pelo ponto $r-1=387,2$ m e chega ao ponto $r=390,4$ m, o que de acordo com a equação (2) pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_{387,2} = 53,449 \left(1 - \frac{387,2^2}{395,2^2}\right) = 2,142 \text{ l/s}$$

A perda de carga neste trecho devido ao atrito pode ser calculada utilizando a equação (9), considerando $l=3,2$ m e $h_f = \Delta h_f$, ou seja:

$$\Delta h_f = 1,22 \times 10^{-10} \frac{\left(\frac{2,142}{120}\right)^{1,852}}{(168)^{4,87}} 3,2 = 0,000328 \text{ m}$$

A diferença de elevação ΔZ calculada no trecho é a mesma que a anterior, pois trata-se de declividade média e, portanto, considerada constante ao longo da linha lateral.

Assim sendo, a pressão no ponto em questão é a seguinte:

$$P_{387,2} = 29,320 + 0,000328 + 0,096 = 29,416 \text{ m}$$

A seqüência completa dos valores de pressão para um pivô-central de dez torres, com espaçamento regular de 3,2 m, encontra-se no Apêndice A. Nesses resultados, observa-se que houve pequena divergência entre os valores de pressão, calculados pelo método numérico e pelo analítico. Nesse caso, o valor calculado no ponto pivô pelo método analítico foi de 49,591 m, enquanto pelo método numérico foi 49,692 m, representando diferença de apenas 0,2%.

A determinação da distribuição de pressão pelo método analítico é menos trabalhosa do que pelo método numérico, pois utiliza uma fórmula de aplicação direta para qualquer ponto da lateral, enquanto no método numérico, o procedimento é recursivo, envolvendo sucessivos cálculos, a partir da extremidade final da lateral até atingir o ponto considerado da tubulação. No entanto, vale destacar que o uso de planilhas de cálculo eletrônicas simplifica sobremaneira o processo computacional recursivo. Por outro lado, o método analítico tem a desvantagem de ter sua aplicação restrita a uma lateral com um só diâmetro, ao passo que, no método numérico essa limitação não existe.

8 ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DA ÁGUA

Uma vez estabelecidas a pressão, a vazão e a localização dos aspersores na lateral, o próximo passo consiste em escolher, dentre as alternativas de aspersores comercialmente disponíveis, aqueles que mais se aproximam das características hidráulicas calculadas.

Normalmente, nem todos os aspersores estão disponíveis. O fato de não existir exatamente aquele aspersor que satisfaça integralmente as condições hidráulicas calculadas faz com que a uniformidade de distribuição das lâminas aplicadas esteja sempre abaixo de 100%. Além disso, outras variáveis como velocidade do vento, entupimento de aspersores e vazamentos na lateral do pivô, contribuem para alterar a uniformidade de aplicação de água. Um dos desafios no dimensionamento de pivô-central é o de encontrar um conjunto de aspersores que satisfaça, o mais próximo possível, as características hidráulicas de pressão e vazão determinadas teoricamente.

8.1 Taxa de aplicação do aspersor estacionário

A intensidade de aplicação de água de um aspersor estacionário, em determinado ponto da área irrigada, é, teoricamente, constante. No entanto, seu valor depende da distância em que ele se encontra em relação ao pivô. Para efeito de modelagem, a variação das taxas de aplicação de água é considerada simétrica, em todas as direções, em relação ao aspersor. Deste modo, qualquer perfil transversal da superfície de distribuição de água do aspersor pode ser utilizado para representar seu padrão de aplicação.

O desenvolvimento das formulações para análise das taxas de aplicação de água de um pivô-central passa primeiro pela caracterização de um aspersor estacionário. Vários modelos têm sido propostos para representar o padrão de distribuição de água do aspersor (Bittinger & Longenbaugh, 1962). A Figura 4 ilustra alguns perfis de distribuição típicos de aspersores utilizados em pivô-central. Observa-se que o perfil de água desenvolvido pelos aspersores do tipo *sprays* se aproxima bastante de uma elipse (Figura 5).

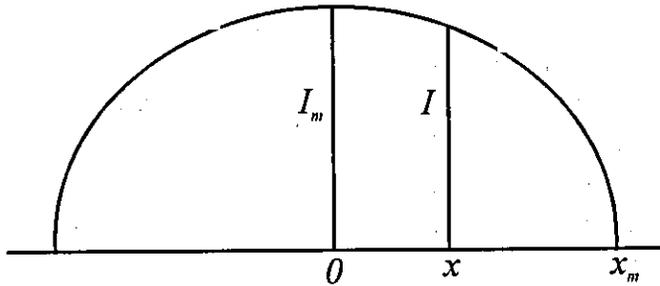


FIG. 5. Distribuição elíptica das taxas de aplicação de água de um aspersor.

Neste diagrama (Figura 5), as taxas de aplicação de água estão representadas pela variável I (mm/h) e a distância em que ela ocorre em relação ao aspersor está representada por x . Nesse modelo, a taxa de aplicação é máxima (I_m) no local ($x=0$) onde se encontra o aspersor e zero no ponto ($x=x_m$). Considerando o modelo de distribuição elíptico, a taxa de aplicação de água, em qualquer ponto localizado no raio de alcance do aspersor, pode ser determinada pela seguinte equação (Bittinger & Longenbaugh, 1962):

$$I = \frac{I_m}{x_m} \left[x_m^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

onde

- I_m = máxima taxa de aplicação (mm/h);
- x_m = raio de alcance do aspersor (m);
- x = ponto qualquer entre 0 e x_m (m);
- I = taxa de aplicação correspondente ao ponto x (mm/h).

O valor de I_m depende, essencialmente, da vazão do aspersor e do modelo de distribuição utilizado. No modelo elíptico, essa relação pode ser definida pela seguinte equação:

$$I_m = 3600 \frac{3 q}{2 \pi x_m^2} \quad (16)$$

onde a constante 3600 é utilizada para conversão de unidades.

Exercício 14. Determine a taxa máxima de aplicação de água de um aspersor tipo *spray*, isolado e estacionário, com a capacidade de vazão de 0,70 l/s e raio de alcance de 5 m.

Solução. A solução do problema pode ser encontrada usando a equação (16):

$$I_m = 3600 \frac{3 (0,70)}{2 \pi (5)^2}$$
$$\cong 48 \text{ mm / h}$$

8.2 Taxa de aplicação do aspersor em movimento

As características de distribuição de água do aspersor em movimento são as mesmas do estacionário. Contudo, ao analisar as taxas de aplicação do aspersor em movimento, em relação a determinado ponto dentro de sua área de influência, observa-se que a intensidade de aplicação que atinge a posição considerada, muda em função do ângulo de afastamento da lateral. Para melhor entendimento considere o diagrama apresentado pela Figura 6.

Neste diagrama, o ponto *P* representa o local onde se deseja determinar a taxa de aplicação do aspersor em dado instante, com a lateral em movimento. Observa-se que o referido ponto está localizado no arco de raio *s* a uma distância *x* do aspersor, o qual, por sua vez, encontra-se posicionado a uma distância *r* do ponto pivô. O ângulo α mede o deslocamento da lateral do pivô em relação ao ponto *P*. A variável ω representa a velocidade de rotação da lateral, em radianos/hora, e *t* o intervalo de tempo, em horas, que a lateral leva para se deslocar do ponto de máxima taxa de aplicação ao ponto considerado. A expressão ωt é o ângulo de giro do pivô correspondente à metade do deslocamento da lateral durante o tempo em que o ponto *P* permanece na área de influência do aspersor.

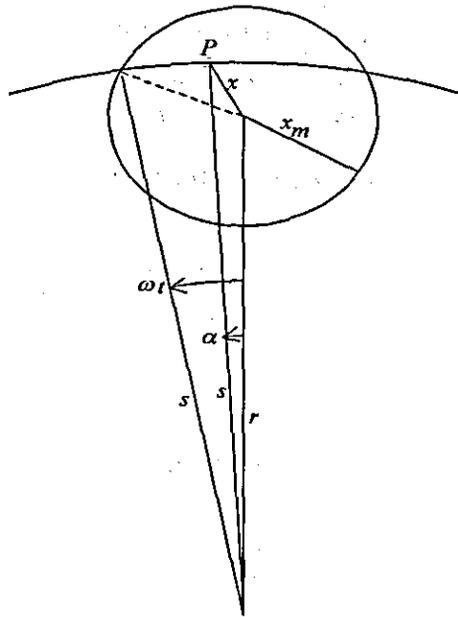


FIG. 6. Diagrama de localização da área de influência de um aspersor em relação ao ponto pivô.

Fonte: Bittinger & Longenbaugh (1962).

A distância x do ponto P ao aspersor pode ser determinada pela da lei dos cosenos, ou seja:

$$x = \left(s^2 + r^2 - 2 r s \cos \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Quando a taxa de aplicação no ponto P torna-se zero, o valor de x torna-se x_m e o ângulo α alcança o valor máximo ωt . Nesse caso, a equação (17) pode ser transformada e usada para determinar o ângulo ωt da seguinte forma:

$$\omega t = \cos^{-1} \left(\frac{s^2 + r^2 - x_m^2}{2 r s} \right) \quad (18)$$

Na equação (18), o argumento do arco coseno tem de ser menor ou igual a 1, ou seja:

$$s^2 + r^2 - x_m^2 \leq 2 r s \quad (19)$$

Utilizando essa condição, é possível deduzir a fórmula para o cálculo da taxa de aplicação de água em determinado ponto s na área de influência do aspersor, que está localizado a uma distância r do ponto pivô. Essa fórmula é derivada a partir da equação (16), substituindo-se o valor de x pelo seu correspondente na equação (17) (Heermann & Hein, 1968).

$$I = \frac{I_m}{x_m} \left[x_m^2 - s^2 - r^2 + 2 r s \cos a \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

O perfil de distribuição de água do aspersor, determinado ao longo do arco onde se encontra o ponto P, segundo a equação (18) está ilustrado na Figura 7.

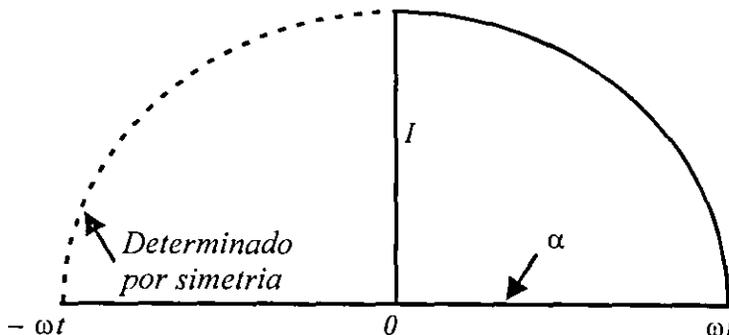


FIG. 7. Perfil de distribuição de água em determinado ponto da lateral na área de influência de um aspersor em movimento.

Observa-se que, a equação (20) modela apenas metade do perfil da distribuição do aspersor porque a outra metade é automaticamente determinada por simetria, conforme está indicado na Figura 7.

Exercício 15. Considere um aspersor com a capacidade de aplicação máxima de água de 18 mm/hora e um raio de alcance de 5 m. Seu padrão de distribuição de água é elíptico e ele se encontra instalado a 320 m de distância do ponto pivô. Calcule a taxa de aplicação de água, ao longo do arco que passa pelo ponto P que localizado a 322 m de distância do ponto pivô, nas seguintes condições:

- No momento em que a lateral do pivô passa pelo ponto P ;
- No momento em que a lateral do pivô deixa de aplicar água no ponto P ;
- No momento em que a lateral encontra-se na metade do ângulo total de deslocamento além do ponto P .

Solução: Na condição (a), o ângulo de deslocamento α é igual a zero e a taxa de aplicação no ponto P pode ser calculada usando a equação (20) da seguinte forma:

$$I = \frac{18}{5} \left[(5)^2 - (322)^2 - (320)^2 + 2 (322) (320) \cos(0) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 16,5 \text{ mm/h}$$

Na condição (b), o ângulo de deslocamento α atinge o máximo e torna-se igual ωt , cujo valor pode ser calculado pela equação (18) a seguir:

$$\omega t = \cos^{-1} \left(\frac{s^2 + r^2 - x_m^2}{2 r s} \right)$$

$$= \cos^{-1} \left[\frac{(322)^2 + (320)^2 - (5)^2}{2 (322) (320)} \right]$$

$$= 0,01427613 \text{ radianos}$$

Neste caso, a taxa de aplicação no ponto P torna-se igual a zero como pode ser comprovado utilizando a equação (20):

$$I = \frac{18}{5} \left[(5)^2 - (322)^2 - (320)^2 + 2 (322) (320) \cos (0,01427613) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0 \text{ mm / h}$$

Na condição (c), o ângulo de deslocamento é igual à metade de ωt e a taxa de aplicação fica sendo:

$$I = \frac{18}{5} \left[(5)^2 - (322)^2 - (320)^2 + 2 (322) (320) \cos (0,00713806) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{18}{5} [3,9686]$$

$$= 14,3 \text{ mm / h}$$

8.3 Taxa de aplicação de vários aspersores em um ponto da lateral

As análises anteriores consideraram apenas as taxas de aplicação de água provenientes de um só aspersor. No entanto, na realidade, determinado ponto da área irrigada recebe contribuição de mais de um aspersor ao mesmo tempo. Como já ressaltado anteriormente, para se alcançar uniformidade de distribuição de água, cada ponto da lateral do pivô deve receber contribuição de dois a quatro aspersores. Nesse caso, a descrição das taxas de aplicação que atingem dado ponto é feita considerando as contribuições individuais de cada aspersor.

O diagrama apresentado pela Figura 8 ilustra uma situação em que o ponto P recebe contribuição simultânea de três aspersores.

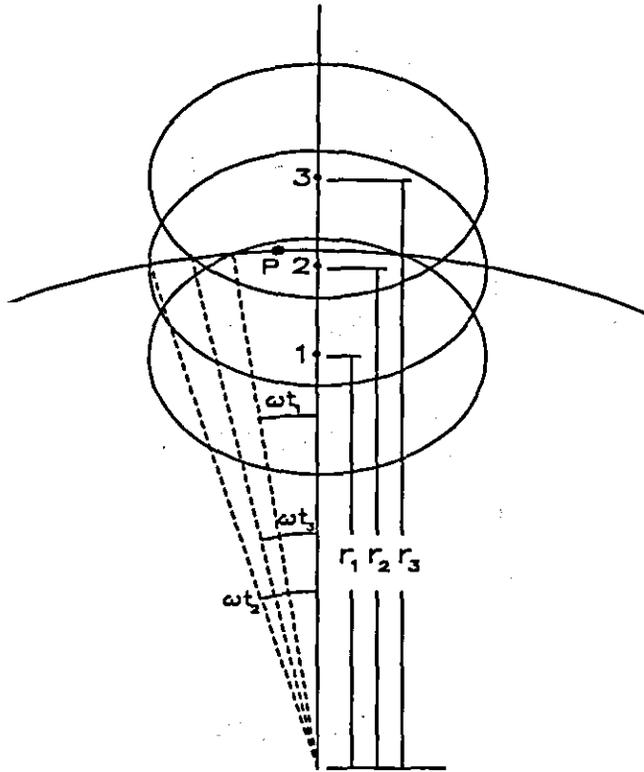


FIG. 8. Diagrama de localização da área de influência de três aspersores em relação ao ponto pivô.

Neste diagrama, o ponto P se encontra a uma distância s do centro do pivô e os três aspersores, que atingem aquele local, possuem raios de alcance de comprimento igual a r_1 , r_2 e r_3 , respectivamente. Vale ressaltar que, cada aspersor cobre o ponto P durante algum tempo e o ângulo de rotação correspondente pode ser determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$(\omega t)_i = \cos^{-1} \left[\frac{s^2 + r_i^2 - (x_m)_i^2}{2 r_i s} \right] \text{ para } \left(\frac{s^2 + r_i^2 - (x_m)_i^2}{2 r_i s} \right) \leq 1 \quad (21)$$

onde o índice i representa o i -ésimo aspersor contado a partir do centro do pivô. Se o aspersor i não atingir o ponto P , durante o deslocamento da lateral então, por definição, $(\omega t)_i = 0$. Considerando essas definições, a equação (21) torna-se útil na determinação dos aspersores que contribuem com a lâmina aplicada sobre o ponto P em evidência.

De maneira geral, a taxa global de aplicação de água, em dado ponto (s), resultante da contribuição de mais de um aspersor (i), pode ser expressa da seguinte forma (Heermman & Hein, 1968):

$$I_T = \sum_{i=1}^n I_i \quad (22)$$

onde

n = número de aspersores que atinge o ponto P considerado;

I_T = soma das contribuições de cada aspersor, $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$
(mm/h)

e

$$I_i = \frac{(I_m)_i}{(x_m)_i} \left[(x_m^2)_i - s^2 - (r^2)_i + 2(r)_i(s) \cos \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Em resumo, para se determinar a taxa de aplicação de um conjunto de aspersores, em dado ponto da lateral do pivô central, deve-se, inicialmente, identificar os aspersores que atingem o ponto considerado durante a passagem da lateral do pivô. Os aspersores que atingem o local escolhido obedecem à seguinte relação:

$$0 \leq (\omega t)_i \leq 1$$

A soma das contribuições de cada aspersor, determinada pela equação (22), para dado valor de α representa a taxa total de aplicação de água sobre o ponto considerado.

A Figura 9 ilustra a contribuição individual e total de três aspersores sobre dado ponto da lateral do pivô durante seu deslocamento sobre a área irrigada. Observa-se que a curva representada pela taxa de aplicação I_1 corresponde ao aspersor que menos tempo teve para aplicação de água no ponto em questão. Por outro lado, a curva representada pela taxa de aplicação I_2 corresponde ao aspersor que mais contribuiu com a lâmina de água aplicada no local considerado. A desuniformidade do perfil de distribuição I_T que representa a contribuição total dos três aspersores reflete a desigualdade no tempo de contribuição de água de cada um dos aspersores em relação ao local estudado.

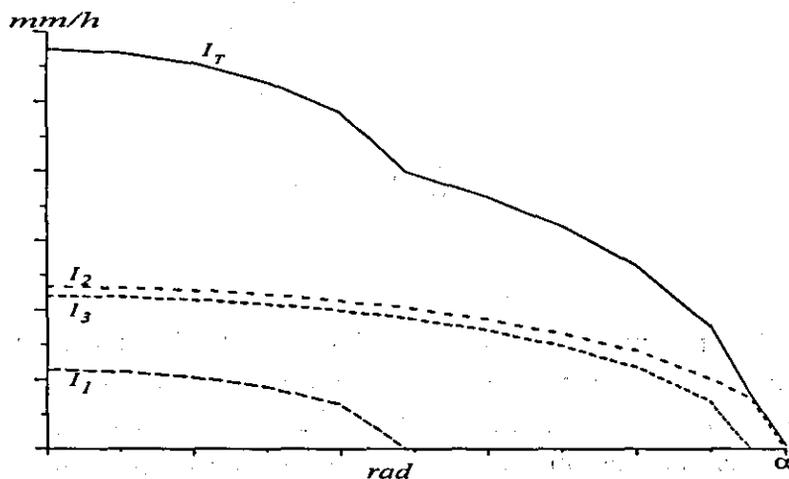


FIG. 9. Perfis individuais e total de distribuição de água de três aspersores em relação a determinado ponto da lateral do pivô-central.

Exercício 16. Considere cinco aspersores do tipo *spray*, com vazão média de 0,70 l/s, instalados na lateral de um pivô-central nas posições 99ª, 100ª, 101ª, 102ª e 103ª correspondentes às seguintes distâncias em relação ao ponto pivô: 316,8 m, 320 m, 323,2 m, 326,4 m e 329,6 m, respectivamente. Esses aspersores possuem raio de alcance médio de 5,0 m e perfil de distribuição de água elíptico. Determine a taxa de aplicação individual e total desses aspersores ao longo do arco estabelecido no ponto da lateral localizado a 322 m de distância do centro do pivô.

Solução: O primeiro passo consiste em identificar os aspersores que realmente atingem o ponto $s=322$ m durante o deslocamento da lateral. Para isso, utiliza-se a condição representada pela equação (21), cujos resultados encontram-se resumidos na Tabela 1.

TABELA 1. Ângulo de cobertura de cada aspersor no ponto $s = 322$ m.

Aspersor (i)	r (m)	x_m (m)	$\left(\frac{s^2 + r_i^2 - (x_m)_i}{2 r_i s} \right)$	$(\omega t)_i$ (rad)
99	316,8	5,0	1,000009999	-
100	320,0	5,0	0,000909098	0,014276127
101	323,2	5,0	0,999886807	0,015046245
102	326,4	5,0	0,999973169	0,007325504
103	329,6	5,0	1,000154337	-

Pelos valores de ωt_i encontrados, conclui-se que somente os aspersores localizados nas posições 100ª, 101ª e 102ª possuem raio de alcance suficiente para atingir o ponto $s=322$ m, durante o deslocamento da lateral, e o aspersor $i=101$ é o que contribuirá com o maior tempo de exposição sobre o ponto considerado.

O segundo passo consiste em determinar a taxa de aplicação máxima dos aspersores 100^a, 101^a e 102^a sobre o local $s=322$ m. Isso ocorre no instante em que a lateral do pivô-central passa sobre o local especificado. Nessa posição, o ângulo α é igual a 0. Assim, utilizando-se da equação (23), com $\alpha = 0$, obtêm-se as seguintes contribuições máximas de cada aspersor (Tabela 2). Observa-se que o valor de I_m foi calculado usando a equação (18), já exemplificada anteriormente.

TABELA 2. Taxa de contribuição máxima de três aspersores no ponto $s=322$ m.

Aspersor (i)	r (m)	x_m (m)	I_m (mm/h)	I (mm/h)
100	320,0	5,0	48	44,0
101	323,2	5,0	48	46,6
102	326,4	5,0	48	22,8

Exemplo: $i=100$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{48}{5} \left[(5)^2 - (322)^2 - (320)^2 + 2(322)(320)(\cos(0)) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{48}{5} [4,5826] \\
 &= 44,0 \text{ mm/h}
 \end{aligned}$$

O terceiro passo consiste em determinar as taxas de aplicações individuais e total dos aspersores que atingem o ponto estabelecido. Para isto, utiliza-se a equação (23) para calcular os valores I , para cada aspersor, em função de diferentes valores de α . Para facilitar o entendimento dessa operação, tome o maior ângulo (ωt), correspondente ao aspersor $i=100$, subdivida-o em dez partes e

determine os valores de I correspondentes a cada aspersor. A Tabela 3 resume os resultados desses cálculos:

TABELA 3. Taxas de aplicações individuais (I_1, I_2, I_3) globais (I_T) de cada aspersor.

Divisão n°	α (rad)	I_1 (mm/h)	I_2 (mm/h)	I_3 (mm/h)	I_T (mm/h)
0	0,0	44,0	46,6	22,8	113,4
1	0,001504624	43,7	46,4	22,3	112,4
2	0,003009249	43,0	45,7	20,8	109,5
3	0,004513873	41,7	44,5	18,0	104,2
4	0,006018498	39,9	42,7	13,0	95,6
5	0,007523122	37,4	40,4	0,0	77,8
6	0,009027747	34,1	37,3	-	71,4
7	0,010532371	29,7	33,3	-	63,0
8	0,012036996	23,7	28,0	-	51,7
9	0,013541620	13,9	20,3	-	34,2
10	0,015046245	-	0,0	-	0,0

8.4 Lâmina total aplicada em um ponto da lateral

Observa-se que até agora a análise das taxas de aplicação de água do pivô foi baseada apenas no padrão de distribuição dos aspersores, que independe da velocidade de rotação do equipamento. No entanto, quando se trata da lâmina de água aplicada, a velocidade de deslocamento da lateral do pivô tem de ser considerada na análise, uma vez que para o mesmo padrão de distribuição, a lâmina aplicada aumenta com o decréscimo da velocidade.

A expressão que determina a lâmina total aplicada em dado ponto da lateral pode ser deduzida integrando a equação (22) no intervalo de variação de α . Essa integral é equivalente à área delimitada em baixo do perfil de distribuição representada pela curva que totaliza as contribuições individuais dos aspersores que atingem o ponto da lateral em questão (Figura 9).

O resultado dessa integração pode ser expresso da seguinte maneira (Heermman & Hein, 1968):

$$h_T = \frac{2}{\omega} \int_0^{\omega t} f(\alpha) d\alpha \quad (24)$$

onde

- h_T = lâmina total aplicada (mm);
- $f(\alpha) = I_T$ (mm/h);
- ω = velocidade de rotação em (rad/h)

Observa-se que o valor da integral está multiplicado por dois porque na análise efetuada utiliza-se apenas metade do perfil de distribuição de água pois a outra metade é considerada simétrica.

A integral de $f(\alpha)$, que depende da equação (23), pode ser resolvida numericamente, utilizando a regra de Simpson (Press et al., 1988), representada da seguinte forma:

$$\int_0^{\omega t} f(\alpha) d\alpha = \frac{\Delta\alpha}{3} [f(\alpha_0) + 4f(\alpha_1) + 2f(\alpha_2) + 4f(\alpha_3) + \dots + 2f(\alpha_{n-2}) + 4f(\alpha_{n-1}) + f(\alpha_n)] \quad (25)$$

onde

- n = número de intervalos (valor par);
- $\alpha_{0,\dots,n}$ = subdivisões do maior ângulo de cobertura (rad);
- $f(\alpha_{0,\dots,n})$ = valor de I_T correspondente ao ângulo $\alpha_{0,\dots,n}$ (mm/h)
- $\Delta\alpha$ = fração equivalente a $\frac{1}{n}$ avos do maior ângulo de cobertura (rad)

Essa integração pode ser melhor entendida considerando a seguinte ilustração apresentada pela Figura 10, em que a área sob a curva representa a integral expressa pela equação (25):

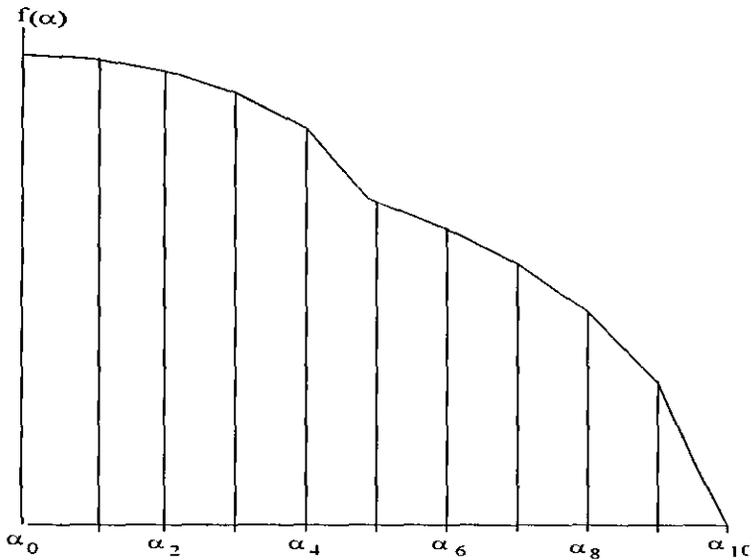


FIG. 10. Perfil final da distribuição de vários aspersores em relação à sua aplicação em determinado ponto da lateral do pivô.

Exercício 17. Considere os dados do exercício anterior, relativos à aplicação de água no ponto $s=322$ m, determine a lâmina total aplicada nesse ponto, sabendo que a velocidade de deslocamento da última torre, que se encontra a 386,8 m do ponto pivô, é de 126 m/h.

Solução: Esse problema consiste basicamente em resolver a integral representada pela equação (25). Tomando por base as dez subdivisões do ângulo máximo de deslocamento do problema anterior e observando que os valores de I_T correspondem exatamente aos valores da função $f(\alpha)$, pode se estabelecer o seguinte para solução da referida integral:

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\omega} f(\alpha) d\alpha &= \frac{(0,001504624)}{3} [(113,4) + 4 (112,4) + 2 (109,5) + 4 (104,2) + 2 (95,6) + \\
 &\quad + 4 (77,8) + 2 (71,4) + 4 (63,0) + 2 (51,7) + 4 (34,2) + (0)] \\
 &= (0,00050154) [2.336,2] \\
 &= 1,1717 \text{ rad.mm/h}
 \end{aligned}$$

Em seguida, determine a velocidade de rotação ω utilizando a equação (4):

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{126}{386,8} \\
 &= 0,3258 \text{ rad/h}
 \end{aligned}$$

E, finalmente, calcule a lâmina aplicada, utilizando a equação (24):

$$\begin{aligned}
 h_T &= \frac{2}{0,3258} (1,1717) \\
 &= 7,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Essa lâmina representa a quantidade total de água que o sistema aplica no local 322 m distante do ponto pivô com a lateral se deslocando na velocidade de 126 m/h. Vale lembrar que nessa velocidade o pivô (exercício 3) leva 19,29 horas para completar um giro de 360°. É importante destacar que esse pivô foi dimensionado para aplicar uma lâmina líquida diária de 6,8 mm com o tempo de operação de apenas 20 horas. Assim sendo, o pivô teria capacidade de aplicar 6,56 mm (= 6,8 x 19,29/20).

Como pode ser observado, a lâmina calculada, resultante da superposição dos três aspersores, que atingem a posição localizada

a 322 m de distância do ponto pivô é 9,8% maior do que a lâmina requerida. A diferença existe apesar de o cálculo ter sido efetuado utilizando aspersores com vazões muito próximas daquelas calculadas para a posição $r = 320$ m. Ou seja, a superposição resultará sempre em um valor aproximado, pois é na realidade uma combinação de lâminas de aspersores com vazões aproximadas dos valores teóricos obtidos. Na prática, a variabilidade de vazões dos aspersores disponíveis é limitada e, por isso, os valores de lâmina obtidos serão sempre aproximados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos de cálculo apresentados neste trabalho permitem definir precisamente os valores de vazão e pressão dos aspersores ao longo da lateral do pivô-central. De posse dessas informações, pode-se então selecionar, dentre os aspersores comercialmente disponíveis, aqueles que mais se aproximam das condições teóricas de vazão e pressão calculadas. Por melhor que seja o critério de seleção, o conjunto de aspersores encontrados dificilmente satisfaz integralmente os valores de vazão e pressão calculados e, por isso, na prática obtém-se um padrão de distribuição de água aplicada oscilante em torno de uma média próxima da lâmina projetada.

A ferramenta de análise apresentada permite efetuar o cálculo das lâminas aplicadas por determinado conjunto de aspersores selecionados, simulando as lâminas que seriam coletadas em um teste com o sistema em operação. Nesse caso, os cálculos exemplificados no exercício 9 seriam repetidos para qualquer um de interesse, ao longo da lateral do pivô, até formar o conjunto de lâminas aplicadas que permita concluir acerca da uniformidade de distribuição do conjunto de aspersores selecionados. A seqüência de cálculo realizada nessa análise pode ser facilmente programada em computador.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDINK, J.W.; KELLER, J.; PAIR, C.H.; SNEED, R.E.; WOLFE, J. Design and operation of sprinkler systems. In: DESIGN AND OPERATION OF FARM IRRIGATION SYSTEMS. In: JENSEN, M.E. ed. Design and operation of form irrigation systems. Michigan: ASAE, 1983. 829p. (ASAE. Monograph series, 3).
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil and water division standards commitee. (St. Joseph, Michigan). Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center, corner, and moving irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. Michigan: ASAE, 1984. S436, p.517-518.
- BITTINGER, M.W.; LONGENBAUGH, R.A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. Transactions of the ASAE, v.5, n.1, p.25-30, 1962.
- CHU, S.T.; MOE, D.L. Hydraulics of the center pivot system. Transactions of ASAE, v.15, n.5, p.896-896, 1972.
- DILLON, R.C.; HILER, E.A.; VITTETOE, G. Center-pivot sprinkler design based on intake characteristics. Transactions of the ASAE, v.15, n.5, p.996-1001, 1972.
- HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. Transactions of the ASAE, v.11, n.1, p.11-15, 1968.
- JAMES, L.G. Principles of farm irrigation system design. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.180-259.
- PRESS, W.H.; FLANNERY, B.P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. Numerical recipes in C: the art of computing. Cambridge: University Press, 1988. 735p.

APÊNDICE A. Distribuição da pressão e da vazão ao longo da lateral de um pivô-central de 10 torres.

Distância (m)	Vazão (l/s)		Cálculo analítico		Cálculo numérico	
	Linha	Aspersor	Pressão (m)	Varição (m)	Pressão (m)	Varição (m)
0,0	53,449	-	49,591	-	49,692	-
3,2	53,445	0,004	49,365	0,2265	49,469	0,2230
6,4	53,435	0,010	49,138	0,2264	49,246	0,2230
9,6	53,417	0,018	48,912	0,2264	49,023	0,2229
12,8	53,393	0,024	48,686	0,2263	48,800	0,2228
16,0	53,361	0,032	48,460	0,2261	48,578	0,2227
19,2	53,323	0,038	48,234	0,2260	48,355	0,2226
22,4	53,277	0,046	48,008	0,2257	48,133	0,2224
25,6	53,225	0,052	47,782	0,2255	47,910	0,2222
28,8	53,165	0,060	47,557	0,2252	47,688	0,2220
32,0	53,098	0,067	47,332	0,2249	47,467	0,2217
35,2	53,025	0,073	47,108	0,2246	47,245	0,2214
38,4	52,944	0,081	46,883	0,2242	47,024	0,2211
41,6	52,857	0,087	46,660	0,2238	46,803	0,2208
44,8	52,762	0,095	46,436	0,2234	46,583	0,2204
48,0	52,660	0,102	46,213	0,2229	46,363	0,2200
51,2	52,552	0,108	45,991	0,2224	46,143	0,2195
54,4	52,436	0,116	45,769	0,2218	45,924	0,2191
57,6	52,313	0,123	45,548	0,2212	45,706	0,2186
60,8	52,184	0,129	45,327	0,2206	45,488	0,2180
64,0	52,047	0,137	45,107	0,2200	45,270	0,2175
67,2	51,903	0,144	44,888	0,2193	45,053	0,2169
70,4	51,753	0,150	44,669	0,2186	44,837	0,2163
73,6	51,595	0,158	44,451	0,2179	44,621	0,2156
76,8	51,430	0,165	44,234	0,2171	44,406	0,2149
80,0	51,259	0,171	44,018	0,2163	44,192	0,2142
83,2	51,080	0,179	43,803	0,2155	43,979	0,2135
86,4	50,894	0,186	43,588	0,2146	43,766	0,2128
89,6	50,702	0,192	43,374	0,2138	43,554	0,2120

Apêndice A. Continuação.

Distância (m)	Vazão (l/s)		Cálculo analítico		Cálculo numérico	
	Linha	Aspersor	Pressão (m)	Varição (m)	Pressão (m)	Varição (m)
92,8	50,502	0,200	43,161	0,2128	43,343	0,2112
96,0	50,295	0,207	42,949	0,2119	43,132	0,2103
99,2	50,081	0,214	42,738	0,2109	42,923	0,2095
102,4	49,860	0,221	42,529	0,2099	42,714	0,2086
105,6	49,633	0,227	42,320	0,2089	42,507	0,2076
108,8	49,398	0,235	42,112	0,2078	42,300	0,2067
112,0	49,156	0,242	41,905	0,2068	42,094	0,2057
115,2	48,907	0,249	41,699	0,2056	41,890	0,2047
118,4	48,651	0,256	41,495	0,2045	41,686	0,2037
121,6	48,389	0,262	41,292	0,2033	41,483	0,2027
124,8	48,119	0,270	41,089	0,2022	41,282	0,2016
128,0	47,842	0,277	40,888	0,2010	41,081	0,2005
131,2	47,558	0,284	40,689	0,1997	40,882	0,1994
134,4	47,267	0,291	40,490	0,1985	40,683	0,1983
137,6	46,969	0,298	40,293	0,1972	40,486	0,1971
140,8	46,665	0,304	40,097	0,1959	40,290	0,1960
144,0	46,353	0,312	39,903	0,1946	40,096	0,1948
147,2	46,034	0,319	39,709	0,1932	39,902	0,1935
150,4	45,708	0,326	39,518	0,1918	39,710	0,1923
153,6	45,375	0,333	39,327	0,1905	39,519	0,1910
156,8	45,035	0,340	39,138	0,1891	39,329	0,1898
160,0	44,688	0,347	38,950	0,1876	39,140	0,1885
163,2	44,334	0,354	38,764	0,1862	38,953	0,1872
166,4	43,973	0,361	38,580	0,1847	38,767	0,1858
169,6	43,605	0,368	38,396	0,1833	38,583	0,1845
172,8	43,230	0,375	38,214	0,1818	38,400	0,1831
176,0	42,848	0,382	38,034	0,1803	38,218	0,1817
179,2	42,459	0,389	37,855	0,1788	38,038	0,1803
182,4	42,063	0,396	37,678	0,1772	37,859	0,1789
185,6	41,660	0,403	37,503	0,1757	37,681	0,1775
188,8	41,250	0,410	37,328	0,1741	37,505	0,1760

Apêndice A. Continuação.

Distância (m)	Vazão (l/s)		Cálculo analítico		Cálculo numérico	
	Linha	Aspersor	Pressão (m)	Varição (m)	Pressão (m)	Varição (m)
192,0	40,833	0,417	37,156	0,1726	37,331	0,1746
195,2	40,409	0,424	36,985	0,1710	37,158	0,1731
198,4	39,978	0,431	36,815	0,1694	36,986	0,1716
201,6	39,540	0,438	36,648	0,1678	36,816	0,1702
204,8	39,095	0,445	36,481	0,1662	36,647	0,1687
208,0	38,643	0,452	36,317	0,1646	36,480	0,1672
211,2	38,184	0,459	36,154	0,1630	36,314	0,1656
214,4	37,718	0,466	35,993	0,1613	36,150	0,1641
217,6	37,245	0,473	35,833	0,1597	35,988	0,1626
220,8	36,765	0,480	35,675	0,1581	35,827	0,1610
224,0	36,278	0,487	35,518	0,1565	35,667	0,1595
227,2	35,784	0,494	35,363	0,1548	35,509	0,1580
230,4	35,282	0,502	35,210	0,1532	35,353	0,1564
233,6	34,774	0,508	35,059	0,1516	35,198	0,1548
236,8	34,259	0,515	34,909	0,1499	35,045	0,1533
240,0	33,737	0,522	34,760	0,1483	34,893	0,1517
243,2	33,208	0,529	34,614	0,1467	34,743	0,1502
246,4	32,672	0,536	34,469	0,1451	34,594	0,1486
249,6	32,129	0,543	34,325	0,1434	34,447	0,1470
252,8	31,578	0,551	34,183	0,1418	34,302	0,1455
256,0	31,021	0,557	34,043	0,1402	34,158	0,1439
259,2	30,457	0,564	33,905	0,1386	34,015	0,1424
262,4	29,886	0,571	33,768	0,1371	33,875	0,1408
265,6	29,308	0,578	33,632	0,1355	33,735	0,1393
268,8	28,722	0,586	33,498	0,1339	33,598	0,1377
272,0	28,130	0,592	33,366	0,1324	33,461	0,1362
275,2	27,531	0,599	33,235	0,1308	33,327	0,1347
278,4	26,925	0,606	33,106	0,1293	33,194	0,1332
281,6	26,311	0,614	32,978	0,1278	33,062	0,1317
284,8	25,691	0,620	32,851	0,1264	32,932	0,1302
288,0	25,064	0,627	32,726	0,1249	32,803	0,1287
291,2	24,430	0,634	32,603	0,1234	32,676	0,1272

Apêndice A. Continuação.

Distância (m)	Vazão (l/s)		Cálculo analítico		Cálculo numérico	
	Linha	Aspersor	Pressão (m)	Varição (m)	Pressão (m)	Varição (m)
294,4	23,788	0,642	32,481	0,1220	32,550	0,1258
297,6	23,140	0,648	32,360	0,1206	32,426	0,1244
300,8	22,485	0,655	32,241	0,1193	32,303	0,1229
304,0	21,822	0,663	32,123	0,1179	32,181	0,1215
307,2	21,153	0,669	32,007	0,1166	32,061	0,1202
310,4	20,477	0,676	31,891	0,1153	31,942	0,1188
313,6	19,793	0,684	31,777	0,1140	31,825	0,1175
316,8	19,103	0,690	31,665	0,1128	31,708	0,1162
320,0	18,406	0,697	31,553	0,1116	31,594	0,1149
323,2	17,701	0,705	31,443	0,1104	31,480	0,1136
326,4	16,990	0,711	31,333	0,1093	31,368	0,1124
329,6	16,271	0,719	31,225	0,1082	31,256	0,1112
332,8	15,546	0,725	31,118	0,1071	31,146	0,1100
336,0	14,814	0,732	31,012	0,1061	31,037	0,1089
339,2	14,074	0,740	30,907	0,1051	30,930	0,1078
342,4	13,328	0,746	30,803	0,1042	30,823	0,1067
345,6	12,574	0,754	30,699	0,1033	30,717	0,1057
348,8	11,814	0,760	30,597	0,1024	30,613	0,1047
352,0	11,047	0,767	30,495	0,1016	30,509	0,1038
355,2	10,272	0,775	30,394	0,1009	30,406	0,1029
358,4	9,491	0,781	30,294	0,1001	30,304	0,1020
361,6	8,702	0,789	30,195	0,0995	30,203	0,1012
364,8	7,907	0,795	30,096	0,0989	30,102	0,1004
368,0	7,104	0,803	29,998	0,0983	30,003	0,0997
371,2	6,295	0,809	29,900	0,0978	29,904	0,0990
374,4	5,478	0,817	29,802	0,0974	29,805	0,0984
377,6	4,655	0,823	29,705	0,0970	29,707	0,0979
380,8	3,824	0,831	29,609	0,0967	29,610	0,0974
384,0	2,987	0,837	29,512	0,0964	29,513	0,0970
387,2	2,142	0,845	29,416	0,0962	29,416	0,0966
390,4	1,290	0,852	29,320	0,0961	29,320	0,0963
393,6	0,432	0,858	29,224	0,0960	29,224	0,0961