AVALIAÇÃO DE ASPERSORES PARA OPERAÇÃO EM BAIXA PRESSÃO

FLÁVIO RENE BRÉA VICTORIA
Engenheiro Agrícola

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo
Dezembro - 1992

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Victoria, Flávio Rene Bréa

V645a Avaliação de aspersores para operação em baixa pressão
Piracicaba, 1992.

130p. ilus.

Diss.(Mestre) - ESALQ

Bibliografia.

1. Aspersor - Avaliação 2. Aspersor - Ensaio 3. Irriga-
ção por aspersão - Viabilidade I. Escola Superior de
Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CDD 631.7

AVALIAÇÃO DE ASPERSORES PARA OPERAÇÃO EM BAIXA PRESSÃO

FLÁVIO RENE BR&A VICTORIA

Aprovada em: 21.12.1992

Comissão julgadora:

Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

ESALQ/USP

Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO L. OLITTA

ESALQ/USP

Prof. Dr. DIRCEU BRASIL VIEIRA

UNICAMP

Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

Orientador

*Ofereço a minha esposa Mariângela,
a meus pais Manoel e Carmen, e a
meus irmãos.*

AGRADECIMENTOS

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Difusão de Tecnologia de Santa Catarina S.A., por ter propiciado a realização deste curso de pós-graduação.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária pelo apoio concedido na realização do curso.

Ao professor Dr. Tarlei Arriel Botrel, pela orientação e apoio concedidos na elaboração desse trabalho.

À ESALQ e Capes pela oportunidade de efetivação deste curso.

Aos fabricantes dos aspersores ensaiados, pelo fornecimento das unidades e fundamental apoio.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, pela receptividade, respeito, amizade e apoio, e em especial ao técnico José Figueiredo pela competência, seriedade e amizade.

Aos colegas do curso de pós-graduação em irrigação e drenagem, cuja amizade, consideração e respeito valorizaram as nossas conquistas neste período.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvii
SUMMARY	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Irrigação por aspersão	4
2.1.1. Caracterização do sistema	4
2.1.2. Aspersores	6
2.1.2.1. Aspectos gerais	6
2.1.2.2. Classificação dos aspersores	12
2.1.2.3. Seleção de aspersores	14
2.1.2.4. Possibilidades técnicas em baixa pressão	17
2.2. Energia na irrigação	19
2.2.1. Tendências e necessidades	19
2.2.2. Sistemas de baixo custo e economia de energia	21
2.2.2.1. Operação em baixa pressão	21
2.2.2.2. Perspectivas de uso da energia gravitacional para acionamento	23

2.3. Avaliação de sistemas de aspersão	25
2.3.1. Coeficientes de uniformidade	25
2.3.2. Valores mínimos recomendados	27
2.3.3. Limitações de uso dos coeficientes	28
2.3.4. Ensaio de aspersores	32
2.3.4.1. Ensaio de distribuição	32
2.3.4.2. Coletores: espaçamento, repre- sentatividade	38
2.3.5. Durabilidade dos aspersores	39
2.3.6. Importância dos ensaios e normatização	42
3. MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1. Local	46
3.2. Seleção da pressão da operação, marcas, modelos e bocais	46
3.2.1. Critérios utilizados	46
3.2.2. Marcas, modelos e bocais ensaiados	47
3.2.3. Pressões ensaiadas	48
3.3. Procedimento estatístico	48
3.4. Ensaio de vazão	49
3.4.1. Equipamento, material e procedimento utilizado	50
3.4.2. Processamento dos dados	53
3.5. Ensaio radial de distribuição de água	54
3.5.1. Equipamento, material e procedimento utilizado	54
3.5.2. Processamento dos dados	60

3.6. Ensaio de velocidade de rotação	62
3.6.1. Material e procedimento utilizado	62
3.6.2. Processamento dos dados	62
3.7. Ensaio de durabilidade	63
3.7.1. Equipamento e material utilizado	63
3.7.2. Procedimento utilizado	65
3.7.3. Processamento dos dados	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1. Análise preliminar	70
4.2. Ensaio de vazão	72
4.3. Ensaio de distribuição	73
4.3.1. Perfis de precipitação médios	73
4.3.2. Raio de alcance	91
4.3.3. Coeficiente de uniformidade (CUC)	92
4.3.4. Velocidade de rotação dos aspersores.	102
4.4. Ensaio de durabilidade	104
5. CONCLUSÕES	109
6. RECOMENDAÇÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
APÊNDICE 1	126
APÊNDICE 2	128

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Esquema do ensaio de vazão	51
Figura 2 - Vista geral do ensaio de vazão	52
Figura 3 - Esquema do ensaio de distribuição radial . .	55
Figura 4 - Vista do equipamento utilizado no ensaio radial	57
Figura 5 - Disposição dos coletores e do equipamento utilizado no ensaio	58
Figura 6 - Detalhes da cúpula de vidro-madeira	59
Figura 7 - Esquema do ensaio de durabilidade.	64
Figura 8 - Vista geral das campânulas	66
Figura 9 - Vista do registrador de tempo	67

	x
Figura 10 - Vista interna da campânula	68
Figura 11 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
Biehl sem pino	82
Figura 12 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
Biehl com pino	84
Figura 13 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
A1823 3,2 x 2,4 mm	85
Figura 14 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
A1823 3,2 x 3,0 mm	87
Figura 15 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
A1823 3,2 x 3,6 mm	88
Figura 16 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
5022/91 2,5 x 2,5 mm	89
Figura 17 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
5022/91 3,5 x 2,5 mm	90
Figura 18 - Perfis de precipitação médios do aspersor	
5022/91 3,5 x 3,5 mm	91

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Classificação dos aspersores quanto à pressão de serviço (BERNARDO, 1989)	13
Tabela 2 - Tipos de gota, de cultivos e de solos em função do Índice de Pulverização (Ip), proposto por Tanda	15
Tabela 3 - Marcas, modelos e bocais ensaiados	48
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de vazão	72
Tabela 5 - Diâmetros, áreas e coef. de descarga médios	73
Tabela 6 - Coeficientes de ajuste e de correlação da equação de vazão	73
Tabela 7 - Perfis médios de precipitação (ml) - Biehl - 4mm sem pino	74

Tabela 8 - Perfis médios de precipitação (ml) - Biehl -	
4 mm com pino	75
Tabela 9 - Perfis médios de precipitação (ml) - A1823 -	
3,2 x 2,4 mm	76
Tabela 10 - Perfis médios de precipitação (ml) - A1823 -	
3,2 x 3,0 mm	77
Tabela 11 - Perfis médios de precipitação (ml) - A1823 -	
3,2 x 3,6 mm	78
Tabela 12 - Perfis médios de precipitação (ml) - 5022/91 -	
2,5 x 2,5 mm	79
Tabela 13 - Perfis médios de precipitação (ml) - 5022/91 -	
3,5 x 2,5 mm	80
Tabela 14 - Perfis médios de precipitação (ml) - 5022/91 -	
3,5 x 3,5 mm	81
Tabela 15 - Raio de alcance dos aspersores	92
Tabela 16 - Análise de variância do aspersor Biehl . . .	94
Tabela 17 - Análise de variância do aspersor A1823 . . .	95

Tabela 18 - Análise de variância do aspersor 5022/91 . . .	95
Tabela 19 - Comparação de médias de CUC para o aspersor Biehl, em função do espaçamento e bocal . . .	96
Tabela 20 - Comparação de médias de CUC para o aspersor Biehl, em função do espaçamento e pressão . . .	97
Tabela 21 - Comparação de médias de CUC para o aspersor A1823, em função do espaçamento e bocal . . .	97
Tabela 22 - Comparação de médias de CUC para o aspersor 5022/91. Desdobramento da interação para bocais dentro de pressão B(P)	98
Tabela 23 - Comparação de médias de CUC para o aspersor 5022/91. Desdobramento da interação para pressões dentro de bocais P(B)	99
Tabela 24 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em função da pressão, bocal e espaçamento, para o aspersor Biehl	100
Tabela 25 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em função da pressão, bocal e espaçamento, para o aspersor A1823	101

Tabela 26 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em função da pressão, bocal e espaçamento, para o aspersor 5022/91	102
Tabela 27 - Velocidade de rotação (RPM) dos aspersores, em função da pressão e do bocal	103
Tabela 28 - Resultados dos ensaios de vazão	104
Tabela 29 - Tempos de rotação/quadrante e desvios, do aspersor Biehl	105
Tabela 30 - Tempos de rotação/quadrante e desvios, do aspersor A1823	106
Tabela 31 - Tempos de rotação/quadrante e desvios, do aspersor 5022/91	106
Tabela 32 - Valores de CUC e desvios, antes e depois das 1200 horas	107
Tabelas 33 - Dados técnicos de catálogo (dos fabricantes), disponíveis no mercado	127
Tabelas 34 a 36 - Intensidade de precipitação (mm/h), em função da pressão e do espaçamento	129 e 130

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área de fluxo no bocal (L^2)
$B_i (i=1 \text{ a } 3)$	- níveis do fator bocal
C_d	- coeficiente de descarga (adimensional)
CUC	- coeficiente de uniformidade de Christiansen %
CV	- coeficiente de variação (%)
CWS	- coeficiente de Wilcox e Swailes (%)
d	- diâmetro do bocal (L)
F	- razão de variâncias
g	- aceleração da gravidade ($L T^{-2}$)
GL	- graus de liberdade
H	- maior valor de lâmina ou volume coletado (L^3)
I_p	- índice de pulverização ($L L^{-1}$)
k e x	- coeficientes de ajuste da equação de vazão
L	- menor valor de lâmina ou volume coletado (L^3)
n	- número total de coletores no padrão de ensaio
P	- pressão no bocal (L)
$P_j (j=1 \text{ a } 5)$	- níveis do fator pressão
Q	- vazão ($L^3 T^{-1}$)
QM	- quadrado médio
$R_k (k=1 \text{ a } 3)$	- níveis de repetição
s	- desvio padrão das lâminas ou volumes coletados

-
- X - lâmina ou volume médio coletado (L^3)
- Xi - lâmina ou volume coletado no i-ésimo coletor
(L^3)

AVALIAÇÃO DE ASPERSORES PARA OPERAÇÃO EM BAIXA PRESSÃO

Autor: FLÁVIO RENE BRÉA VICTORIA

Orientador: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

RESUMO

Com o objetivo de viabilizar o uso de sistemas de irrigação por aspersão de baixo custo e economia de energia, foram avaliadas as características hidráulicas e de desempenho de 4 modelos de aspersores do mercado, nas pressões de operação de 98, 123, 147, 172 e 196 KPa.

Os modelos de aspersores selecionados para os ensaios foram : A1823 da Fabrimar S.A, Biehl da Biehl Metalúrgica, ZA-30 da Asbrasil e 5022/91 da Naan Irrigation Systems. As unidades foram retiradas aleatoriamente da linha de produção, sendo ensaiados 3 níveis de bocal de cada modelo (2 no Biehl), em 5 níveis de pressão e 3 repetições, totalizando 165 ensaios.

Foram realizados ensaios de vazão, de distribuição de água, de velocidade de rotação e de durabilidade, sendo determinadas vazões, perfis de precipitação, raios de alcance, CUCs e velocidades de rotação. Para analisar a distribuição de água foi utilizado

o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), sendo feita análise estatística num esquema de fatorial, para os espaçamentos de interesse.

Os resultados desse trabalho permitem concluir que é possível utilizar pequenos sistemas de irrigação por aspersão em pressão reduzida (98 a 196 KPa) com uniformidades aceitáveis, e desta forma viabilizar a irrigação com sistemas de baixo custo e economia de energia. Os aspersores Biehl, A1823 e 5022/91 podem ser utilizados nesta faixa de pressão, em projetos de irrigação tecnicamente elaborados e manejados. O aspersor ZA-30 não operou adequadamente nas pressões desse estudo.

Pode-se verificar que o uso de pino dispersor em bocal circular mostrou-se eficiente na elevação dos valores de CUC, na faixa de pressão estudada. O uso de bocal elíptico também apresentou efeito significativo na obtenção de valores de CUC mais elevados, nesta faixa de pressão.

Verificou-se também que as pressões maiores proporcionaram a obtenção de índices mais altos de CUC.

Os resultados mostraram ainda que os aspersores Biehl, A1823 e 5022/91 não apresentaram alteração substancial nas suas características de operação e de distribuição, após operação por um tempo de 1200 horas na pressão de 196 KPa, segundo os critérios de norma da ABNT.

EVALUATION OF SPRINKLERS FOR OPERATION IN LOW PRESSURE

Author: FLÁVIO RENE BRÉA VICTORIA

Adviser: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

SUMMARY

With the aim of make viable the use of irrigation systems by low cost aspersion and save energy, hidraulic and performance features of 4 models of sprinklers in the market were evaluated, in the operation pressures of 98, 124, 147, 172 e 196 KPa.

The models of sprinklers selected for the essays were: A1823 from FABRIMAR S.A., Biehl from BIEHL METALÚRGICA, ZA-30 from ASBRASIL and 5022/91 from NAAN IRRIGATION SYSTEMS. The unities were taken off at random from the production line, being tested 3 levels of nozzle from each model (2 in the Biehl), 5 levels of pressure and 3 replications, totalizing 165 essays.

Flow, water distribution, rotation velocity and durability essays were carried out, being determined flows, precipitation profiles, range, CUCs and rotation velocities. The Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) was used in order to analyse the water distribution, being done statistical analysis in a factorial design, for the spacing

of interest.

The results allowed to conclude that it is possible to use of small irrigation systems by aspersion in low pressure (98 a 196 KPa) with acceptable uniformities and thus make viable the irrigation with systems of low cost and saving energy. The Biehl, A1823 e 5022/91 sprinklers can be used in this range of pressure, in irrigation projects technically developed and managed. The ZA-30 sprinkler didn't operate properly in the pressures studied.

It can be verified that the use of spreader pin in circular nozzle was efficient in the increase of the CUC values, in the range of pressure studied. The use of elliptical nozzle also showed a significant effect in the obtention of higher CUC values, in this range of pressure.

It was also verified that higher pressures provide the obtention of higher CUC values.

The results also showed that Biehl, A1823 and 5022/91 sprinklers did not present important alteration in their characteristics of operation and distribution, after operating for a period of 1200 hours in the pressure of 196 KPa, according to the ABNT standard criterious.

1. INTRODUÇÃO

Os principais métodos de irrigação foram desenvolvidos em épocas nas quais os recursos hídricos e a energia disponível não eram fatores limitantes. Atualmente, em função da elevação dos custos de energia, o desenvolvimento tecnológico volta-se para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Grandes avanços tem sido observados, sendo que a principal tendência verificada na modernização da irrigação por aspersão, é a de redução da pressão de operação dos aspersores. Desta forma, pretende-se diminuir o consumo de energia e buscar o uso mais eficiente da irrigação nas condições atuais e futuras.

Ao mesmo tempo, observa-se que os produtores de menor renda tem ficado à margem do uso da irrigação, sendo relativamente poucas as iniciativas no sentido de viabilizá-la nas condições específicas de propriedades pequenas. Nesse ponto, torna-se interessante salientar que as restrições em termos de energia (sentidas hoje de forma geral), sempre fizeram parte da realidade dessas propriedades, onde a eletricidade muitas vezes não está disponível ou então visa

apenas a iluminação. Esse tipo de produtor, que em alguns estados é responsável por elevados percentuais da produção, necessita de uma tecnologia acessível e mais adequada à sua realidade, pois as limitações de crédito e capacidade de pagamento tornam difícil os investimentos nos avanços tecnológicos hoje disponíveis.

A utilização de pequenos sistemas de irrigação que operem sob baixa pressão, aproveitando a energia gravitacional de reservatórios situados em cota superior à da lavoura, ou acionados por bombas de pressão reduzida, pode ser um caminho interessante para viabilizar a tecnologia e até mesmo o sistema de produção nestas propriedades.

Os aspersores com potencial para uso em baixa pressão, existentes no mercado, são fabricados por firmas que não fornecem as características hidráulicas de desempenho dos mesmos nesta faixa de pressão. Dessa forma, a sua utilização em projetos fica bastante prejudicada. A verificação das características hidráulicas e de desempenho real desses aspersores, nesta faixa de pressão tão pouco explorada, é importante para que se possa concretizar projetos tecnicamente elaborados e sistemas adequadamente manejados.

Com este projeto de pesquisa, pretende-se avaliar modelos de aspersores que tenham potencial para operar em baixa pressão, determinando suas características hidráulicas, para uso em pequenos projetos de irrigação acionados por energia gravitacional ou por bombas de pressão

reduzida. Com isso, objetiva-se a viabilização de irrigação em pequenas propriedades, com sistemas de baixo custo e economia de energia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por aspersão

2.1.1. Caracterização do sistema

A irrigação por aspersão destaca-se como um dos métodos de maior potencial de expansão, devido à sua adaptabilidade às mais diversas condições de solos, declives e culturas. Nesse sistema, a água é aplicada à superfície por meio de dispositivos mecânicos, onde o fluxo passa sob pressão através de furos ou bocais, provocando a quebra do jato e distribuição da água em forma de precipitação ao redor do aspersor. Segundo *Irrigation Journal*¹, citado por KINCAID (1991), os sistemas de irrigação por aspersão são utilizados em aproximadamente 3,24 milhões de hectares nos EUA. No Brasil, o uso da irrigação tem crescido muito nos últimos anos, sendo que em 1990, o país apresenta uma área total irrigada de 3 milhões de hectares (6% da área cultivada), que representam 17% da produção nacional. As metas governamentais são de irrigar mais 1,7 milhão de hectares até 1995, o que demonstra a importância de se buscar sistemas e manejo

¹ *Irrigation Journal*, 40(1):23-34, 1990

adequados às diversas regiões atingidas pelos programas de irrigação. Hoje, estima-se que aproximadamente 25% das nossas áreas irrigadas utilizam sistemas de aspersão. A aspersão convencional é o mais comum dos sistemas em uso, sendo os portáteis aqueles que tem a preferência dos agricultores devido ao menor custo dos investimentos iniciais em equipamento (GUIA RURAL ESPECIAL, 1990).

Os fatores que interferem na distribuição de água de sistemas de aspersão pode ser divididos em grupos: de construção do aspersor, de distribuição do sistema, do clima e do manejo do sistema. Os fatores de construção incluem diâmetro e ângulo do bocal, velocidade de rotação, pressão no bocal, tipo e número de bocais. Os fatores do sistema são os espaçamentos (de aspersores e laterais), altura de elevação do aspersor, estabilidade do tubo de elevação e variações de pressão no sistema. Os climáticos são velocidade e direção do vento. Os fatores de manejo incluem tempo de irrigação, velocidade de deslocamento das laterais, e o alinhamento das laterais e do tubo de elevação (PAIR, 1968; SOLOMON, 1979). BRANSHEID & HART (1968) acrescentam a temperatura e umidade relativa, e os fatores aerodinâmicos, que envolvem a interação das gotas de água dos aspersores adjacentes e as massas de ar movimentadas pelos jatos.

KINCAID (1991) afirma que o aspersor tipo impacto é usado predominantemente nos sistemas de aspersão nos EUA devido ao seu baixo custo e confiabilidade, e que o

seu desenho básico tem mudado muito pouco desde que foi introduzido a 50 anos.

Em função de os aspersores cobrirem áreas circulares, não é possível uma aplicação absolutamente uniforme. Logo torna-se necessária a sobreposição dos padrões individuais de cada aspersor, sendo que o grau de uniformidade depende principalmente do tipo de padrão produzido e do espaçamento dos aspersores (CHRISTIANSEN, 1942).

2.1.2. Aspersores

Os aspersores rotativos são os componentes mais importantes em um sistema de irrigação, e seu desempenho determina a eficiência do sistema como um todo.

2.1.2.1. Aspectos gerais

ROUSE et alii (1952) descreveram de maneira detalhada a sequência de quebra do jato de água que deixa um bocal. "Somente após a superfície do jato ter sido suficientemente interrompida para produzir uma apreciável forma de resistência, é que a ação do ar tem início. Tal resistência é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade de água e à área de seção transversal de expansão do jato. Assim, quanto mais as bordas carregam água lateralmente para fora do fluxo central, mais rapidamente eles são retardados em sua trajetória longitudinal pelo ar

circundante, mas continuam se espalhando lateralmente e somente diminuem de forma leve sua velocidade. Embora a parte mais externa do jato imediatamente forme gotas que caem pulverizadas, a porção central aparece simplesmente se desintegrando em pleno ar. Em outras palavras, uma vez que a reação igual e oposta ao retardamento da água é a aceleração do ar circunvizinho, o originalmente intacto mas turbulento jato é transformado ao longo da sua trajetória em uma mistura expansiva de gotas de água dispersa e ar, que percorre em uma velocidade já decrescente mas trazendo um volume crescente de ar em movimento." Portanto, verifica-se que a quebra é originada a partir da turbulência nas laterais do jato. MERRINGTON & RICHARDSON (1947) mostraram que os diâmetros médios de gotas formadas na quebra do jato são inversamente proporcionais à velocidade relativa entre o jato e o ar circunvizinho. Portanto, a água próxima da periferia do jato produzirá pequenas gotas, enquanto a água próxima ao núcleo do jato, com menor velocidade relativa em relação ao ar, produzirá maiores gotas. No centro do jato, existe mistura de água e ar, os quais se deslocam com velocidades bastante próximas.

No caso dos aspersores de impacto, além da quebra das gotas devido à turbulência dos limites do fluxo, ocorre a ação do braço oscilante, que se choca com o jato. Nesse último, as gotas formam-se pela energia do choque do braço com o jato e pelo conseqüente movimento repentino do

jato (BERNUTH & GILLEY, 1984). Em iguais condições de operação de um bocal, um jato de menor diâmetro tende a se separar, e o ar penetrará no seu interior mais rapidamente do que em um bocal maior. Devido a isso, ocorrerá maior diferencial de velocidade entre água e ar, maior espalhamento do jato e portanto a formação de gotas menores (KOLL, 1974).

A rotação do aspersor é causada pelo jato de água e pela força da mola do braço oscilante. Quando o aspersor é operado, o braço oscilante interrompe o jato de água e é forçado para o lado de fora do jato pelo fluxo. Uma vez empurrado o jato, o braço retorna devido à tensão da mola, e interrompe o jato novamente. Ao retornar, entretanto, o braço golpeia o lado do aspersor, causando um leve giro. Esta ação é repetida em movimento de batida contínua, originando a rotação lenta do aspersor. A velocidade de giro é controlada pela tensão da mola do braço oscilante, sendo fundamental que o aspersor gire a uma velocidade adequada e constante para que nenhuma área seja mau irrigada (KAY, 1984).

Os fabricantes dispõem de diversos modelos e tamanhos de aspersores. Geralmente eles podem receber bocais de diversos diâmetros, os quais, em função da pressão de serviço, fornecerão a vazão, o alcance de jato, o tipo de precipitação e distribuição característicos (KELLER & BLIESNER, 1990). Segundo OLIVEIRA (1991), cada tipo de aspersor existente no mercado apresenta uma diferente faixa

de pressão de trabalho, na qual o padrão de distribuição pode ser considerado adequado.

O volume e a taxa de aplicação de água sob o aspersor normalmente varia com a distância em relação a ele. O padrão dessa variação é chamado de padrão de distribuição, sendo característico para uma dada pressão e geometria de bocal. Bocais operando em baixas pressões apresentam padrão não uniforme (mais água é depositada no anel próximo e na borda externa do padrão) (JAMES, 1988). SOLOMON & BEZDEK (1980) afirmam que o padrão de distribuição pode ser controlado pela geometria do bocais (tamanho, forma e ângulo), combinação de bocais e pressão de operação. Para caracterizá-lo adequadamente, são necessários 3 índices: taxa de aplicação, alcance e forma do padrão.

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985) define o raio padrão como a distância medida na linha de coletores, do centro do aspersor até o ponto mais afastado que recebe uma taxa igual ou maior a 0,25 mm/h. O raio padrão dos aspersores é uma característica fundamental, pois os parâmetros importantes para irrigação, e a própria área molhada pela lateral de aspersão, podem ser determinados a partir dele. Do ponto de vista econômico, o raio padrão determina o máximo espaçamento de aspersor, necessário para obter uniformidade aceitável. Desta forma, indica o custo do equipamento e/ou necessidade de mão de obra (KINCAID, 1982).

Segundo CHRISTIANSEN (1942) a uniformidade de aplicação do aspersor é fortemente influenciada pela forma do perfil de distribuição. O autor caracterizou os tipos de perfis em pressões baixa, alta e normal, e afirma que o perfil triangular produz a distribuição mais uniforme sobre uma grande área, quando o espaçamento e a pressão são adequados.

Conforme WILCOX & McDOUGLAS (1955), não é seguro analisar a uniformidade de distribuição somente pelo tipo de perfil de distribuição, concluindo que os perfis irregulares podem apresentar uma distribuição de água mais uniforme em determinados espaçamentos. Recomendam que sejam também verificados os coeficientes de uniformidade de distribuição e o coeficiente de amplitude. Segundo KINCAID (1991), um padrão desejável do perfil deve ter taxas de aplicação decrescendo continuamente a partir do aspersor, podendo apresentar a forma triangular clássica ou a forma retangular.

As condições econômicas dos sistemas de irrigação por aspersão são muito afetadas pelos perfis de aplicação de água e pelas características de fluxo das combinações aspersor/bocais. Os perfis de aplicação irregulares podem levar a dois ou mais pontos de lucro equivalente em diferentes valores de espaçamentos de aspersores e laterais (GOHRING & WALLENDER, 1987). ARRUDA (1981) também analisou os perfis e concluiu que estes sofrem

forte influência da combinação de diâmetros dos bocais propulsor e ejetor, alertando para a necessidade de estudos que determinem as melhores relações de diâmetros dos aspersores nacionais.

BILANSKI & KIDDER (1958) salientam a importância da velocidade de rotação dos aspersores, e afirmam que quanto maior a velocidade, maior a superfície de contato entre o ar e a água. Por isso, em rotações mais elevadas, a água que deixa o bocal é mais fragmentada, a resistência oferecida pelo ar será maior e a distância total percorrida será encurtada.

CHRISTANSEN (1942) afirma que a variação da taxa de rotação em cada quadrante foi responsável pela desuniformidade de distribuição em muitos testes realizados. Segundo o autor, essas variações na taxa de rotação geralmente ocorrem devido a variações na fricção das partes móveis quando o aspersor está em diferentes posições. Como a força de movimento é relativamente constante, a variação na velocidade de rotação resulta da variação da resistência friccional. Quando o aspersor opera sob pressão adequada, o desbalanceamento do giro devido à fricção tem pouco efeito na velocidade de rotação.

RAWITZ² citado por OLITTA (1986), afirma que, dependendo do modelo do aspersor utilizado, este deverá realizar uma revolução completa entre 30 e 120 segundos.

2.1.2.2. Classificação dos aspersores

Os aspersores de mercado podem ser do tipo rotativo ou estacionário, sendo os primeiros mais utilizados em irrigação. Podem ter um ou dois bocais, onde o bocal de menor diâmetro tem por função complementar a lâmina nas proximidades do aspersor (BERNARDO, 1989 ; OLITTA, 1986).

Os aspersores rotativos podem ser de dois tipos: de revolução rápida e de revolução lenta. Os de rev. rápida tendem a girar a uma taxa mais constante devido ao momento de suas partes girantes. Os de rev. lenta giram a velocidades de 1 a 2 rot./min ou até menos do que isso, mas nunca devem girar a mais de 3 ou 4 rot./min. (CHRISTIANSEN, 1942).

WITHERS & VIPOND (1977) classificam os aspersores, sendo que os de baixa pressão operam entre 0.7 e 2 Kg/cm² e podem fornecer uniformidade de média a boa. Apresentam tendência a formar gotas grandes quando usando bocais de grande diâmetro, e alcance reduzido quando com bocais de diâmetro pequeno.

² RAWITZ, E. Gravity Irrigation in "arid zone irrigation". Berlin, Ed. Yaron, E. Danfors and Y. Vardia, 1973.

Segundo PAIR³, citado por OLIVEIRA (1991), a pressão de serviço de aspersores varia de 69 a 896 KPa (7 a 92mca). A maior parte dos aspersores usados no campo está na faixa de pressão intermediária desses valores. Entretanto, o aumento crescente nos custos de energia está determinando a escolha de aspersores de baixa pressão.

BERNARDO (1989), classifica os aspersores em função da pressão de operação:

Tabela 1 - Classificação de aspersores quanto à pressão de serviço (BERNARDO, 1989)

TIPO DE ASPERSOR	PRESSÃO (KPa)	RAIO DE ALCANCE (m)
Muito Baixa	40 a 100	Pequeno raio
Baixa	100 a 200	6 a 12
Média	200 a 400	12 a 36
Gigantes - Médio alcance	400 a 800	30 a 60
- Longo alcance	500 a 1000	40 a 80

KELLER & BLIESNER (1990) classificam os aspersores e sua adaptabilidade, onde são definidas características dos aspersores de impacto de pressão moderada (de 105 a 210 KPa): tem bocais simples ou duplos, diâmetro molhado de 18 a 24 m., taxa de aplicação mínima recomendada de 3 mm/h, gotas suficientemente quebradas (com pressão/bocal adequados) e distribuição de água de suficiente a boa nos limites superiores da faixa de pressão.

³ PAIR, C. N.; HINZ W. H.; FROST, K. R.; SNEED, R. E.; SCHILTZ, T. J. *Irrigation*. 5 ed. Silver Spring, The Irrigation Association, 1983. np.

2.1.2.3. Seleção de Aspersores

PAIR⁴, citado por ARRUDA (1981) afirma que somente uma correta seleção, instalação e operação do aspersor é que vai determinar a eficiência do sistema, permitindo uma boa uniformidade na distribuição da água.

Diversos critérios podem ser utilizados para a escolha e seleção dos aspersores de um sistema de irrigação. Entre eles, destaca-se a uniformidade de distribuição que o aspersor apresenta, quando trabalhando em determinado espaçamento. Esse valor numérico retrata a qualidade de distribuição de água do aspersor, sendo interessante valores elevados para se ter maior eficiência de irrigação do sistema (MATSURA, 1987).

JAMES (1988) afirma que os aspersores são normalmente selecionados com base no custo, necessidade de pressão para operação e habilidade de propiciar os requerimentos do sistema, com uniformidade aceitável e sem escoamento superficial. Aspersores que produzam gotas relativamente grandes são recomendados para condições de vento, uma vez que seus padrões de distribuição são menos afetados por este fator.

Na literatura existem diversos critérios para se avaliar o grau de pulverização dos jatos em bocais de

⁴ PAIR, C. H.; HINZ, W. W.; REID, C.; FROST, K.R. **Sprinkler irrigation**. 3 ed. Washington, Sprinkler Irrigation Association, 1969.

aspersores. Entre eles, destaca-se o Índice de Pulverização (I_p), proposto por Tanda, citado por GARCIA (1986):

$$I_p = \frac{d}{P} \dots \dots \dots (1)$$

onde,

I_p - Índice de Pulverização, mm.m^{-1}

d - Diâmetro do bocal, mm

P - Pressão de operação, m

Tabela 2 - Tipos de gota, de cultivos e de solos em função do Índice de Pulverização (I_p), proposto por Tanda

I_p (mm/m)	TIPO DE GOTA	CULTIVOS	SOLO
< 0,3	Pequena ou muito pequena	Flores, hortaliças, fumo, algodão, etc.	Argiloso
0,3 - 0,5	Média	Fruteiras e herbáceas	Médio
> 0,5	Grande	Pastagens, capineiras	Arenoso

Segundo KELLER & BLIESNER (1990), os fabricantes de aspersores especificam o diâmetro molhado para todas as combinações de diâmetro de bocal e pressão, para cada tipo de aspersor da sua linha de fabricação. Com isso, é comum as recomendações de espaçamento serem feitas com base neste diâmetro, que pode facilmente ser considerado pelos projetistas. O perfil de precipitação é também importante para se fazer recomendações de espaçamento.

A velocidade de rotação é um importante fator a ser considerado na seleção do aspersor, principalmente com relação à textura e estrutura do solo. Velocidade de rotação baixa e vazão elevada, em solo de baixa infiltração, podem provocar empocamento e escoamento superficial. Para uma boa uniformidade de distribuição, o giro deve ser uniforme nos quatro quadrantes (RIBEIRO, 1982).

Segundo JAMES (1988), a taxa de aplicação é um parâmetro extremamente importante para a seleção do aspersor adequado ao solo, à cultura e ao terreno em que opera. Se a taxa de aplicação é elevada, pode ocorrer empocamento, escoamento e erosão.

Segundo KELLER & BLIESNER (1990), a taxa de aplicação prática mínima para se obter distribuição razoavelmente boa e alta eficiência sob condições climáticas favoráveis, é de 3 mm/h. O critério básico recomendado para a escolha da taxa de aplicação de um aspersor, em determinado solo, é de que esta seja menor ou igual à infiltração básica determinada pelo teste de infiltração (HAISE⁵, citado por LEME, 1987). LEME (1987) ressalta que a seleção com base neste critério fornece boa margem de segurança na prevenção do escoamento superficial, mas não

⁵ HAISE, H.R.; DONNAN, W. W.; PHELAN, J.T.; LAWHON, L.F.; SHOCKLEY, D.G. **The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils.** Washington, Agriculture Research Service/Soil Conservation Service, 1965. 10p.

considera o intervalo de tempo em que o solo teria condições de receber um volume adicional de água.

2.1.2.4. Possibilidades técnicas em baixa pressão

Alternativas técnicas viáveis para o uso de pressões mais baixas, mantendo-se o jato adequadamente quebrado e uma distribuição aceitável, tem sido estudadas e aperfeiçoadas por diversos pesquisadores.

O padrão de aplicação de aspersores de impacto pode ser variado pelo ajuste da pressão no bocal, ou pelo uso de defletores, múltiplos bocais e bocais difusores. Quando se utiliza pressões reduzidas, o padrão assume forma indefinida, sendo interessante quebrar mecanicamente ou difundir o jato para produzir padrão mais adequado (KINCAID, 1991).

BILANSKI & KIDDER (1958) analisaram diversos formatos de bocais e verificaram que bocais triangulares e retangulares, nesta ordem, apresentaram maior quebra do jato e melhor padrão de distribuição do que os circulares. Conforme os autores, a orientação vertical do maior eixo do bocal retangular mostrou-se mais adequada, pois esse tipo de dispersão resultou em perfil de distribuição mais uniforme do que a orientação horizontal. DADIÃO & WALLENDER (1985) também mostraram que, devido à turbulência induzida, bocais não circulares podem ser efetivos em baixa pressões de operação, produzindo padrões de distribuição aceitáveis.

KELLER & BLIESNER (1990) afirmam que o diâmetro de gotas pode ser reduzido com o aumento da pressão ou através do uso de bocal menor. Para provocar a quebra do jato e reduzir o tamanho de gotas, sem o uso de altas pressões, pode-se utilizar mecanismos como agulhas que penetram o jato, orifícios ovais, triangulares e retangulares ou outras formas de alteração física do fluxo.

Os fabricantes tem desenvolvido bocais com orifícios não circulares que produzem jatos difusos e melhoram os padrões em baixas pressões. A desvantagem dos bocais com jato difuso é que o jato apresenta maior seção transversal, menor raio de alcance e é facilmente desviado pelo vento. Além disso, o jato difuso não opera o braço oscilante tão eficientemente quanto o jato normal, podendo resultar em problemas de rotação. Um bocal secundário também pode ser usado para preencher porções do padrão (KINCAID, 1991). Em seu trabalho, o autor analisou o uso do defletor intermitente, e concluiu ser este um mecanismo eficiente para modificar o padrão de distribuição e obter CUC elevado em pressões mais baixas. Os ensaios externos mostraram que o clássico padrão de distribuição triangular não é necessariamente ótimo, sendo que um padrão mais retangular, com maior raio de alcance, parece ser mais vantajoso em condições de vento.

2.2. Energia na irrigação

2.2.1. Tendências e necessidades

A crescente elevação dos custos de energia tem se refletido de forma acentuada na agricultura irrigada, notadamente em sistemas de irrigação por aspersão, em função das necessidades de bombeamento inerentes dos mesmos. Diversos pesquisadores tem se dedicado a esse tema, que tende a assumir grande importância na viabilização e no desenvolvimento de sistemas e técnicas de manejo.

BATTY et alii (1975) e GILLEY & WATTS (1977) analisam o grande impacto da energia usada em irrigação, afirmando que elevada economia pode ser alcançada quando se opera os sistemas em baixa pressão. Sugerem que isso seja considerado nas previsões de desenvolvimento da indústria de irrigação, devido à tendência de escassez de energia e aumento dos custos. Salientam que o projeto de novos equipamentos e a melhoria no manejo dos sistemas de irrigação é fundamental para o uso mais adequado dos recursos disponíveis. Segundo ALLEN & BROCKWAY (1984), a crescente elevação dos custos de energia deve conduzir à discussão dos conceitos de projeto e manejo de sistemas de irrigação. Entre as opções para reduzir o consumo de energia em sistemas de aspersão, os autores colocam o uso de aspersores de pressão mais baixa, uso de laterais de compensação ("off-set"), uso de bocais adequados para baixa pressão e reforma de sistemas para operar em pressão menor.

MARQUETTI et alii (1986) salientam que as limitações provocadas pelo custo da energia, ocorridas na última década, levaram ao surgimento de inovações e evolução dos sistemas de aspersão. Assim, a indústria tem introduzido avanços, como por exemplo, o uso de aspersores com dupla saída e bocais diferentes, permitindo aos mesmos trabalharem satisfatoriamente em baixas pressões (1,4 a 1,8 Kg/cm²).

SCALOPPI (1986) e GILLEY (1983) enfatizam que a redução de pressão de operação dos aspersores constitui alternativa bastante viável e eficiente a ser considerada nos programas destinados à redução de consumo de energia em sistemas pressurizados. Em seu estudo, SCALOPPI (1986) conclui que os maiores índices de redução de energia consumida estão ligados a menores alturas geométricas de recalque; e que, com altura de recalque nula, a redução de consumo pode atingir 44%, quando aspersores tipo canhão são substituídos por aspersores pequenos.

HEERMAN (1983) afirma que os custos de energia triplicaram entre 1975 e 1980, nos EUA.

O aumento no custo da energia tem provocado grandes limitações no uso da irrigação por aspersão. Uma das alternativas com boa perspectiva é a utilização de sistemas de pressão mais baixa (SDARES et alii, 1991).

KINCAID (1991) alerta que, em função do panorama energético verificado, existe a necessidade de se descobrir maneiras de operar sistemas de aspersão a pressões

reduzidas, sem a redução de espaçamentos e mantendo-se boa uniformidade de aplicação.

2.2.2. Sistemas de baixo custo e economia de energia

2.2.2.1. Operação em baixa pressão

Segundo HILLS & GU (1989), os sistemas de aspersão operando em baixas pressões tem despertado muito interesse nos últimos anos, devido a crescente elevação dos custos de energia. CHRISTIANSEN (1942) afirma que para um desempenho adequado, todos os aspersores necessitam de uma certa pressão mínima. Alguns são projetados e operam melhor sob pressões altas (mais de 21 mca), enquanto outros operam satisfatoriamente em pressões de 7 a 14 mca. As necessidades de energia e o custo de bombeamento são proporcionais à pressão, logo o custo mínimo de bombeamento resulta do uso de menores pressões. O autor salienta que, naquela época, as investigações mostravam que o custo de energia para bombeamento era somente uma pequena parte do custo total de operação de sistemas de irrigação.

Entretanto, em um trabalho bem mais recente, GILLEY (1983) afirma que em muitos locais dos EUA, os custos de operação de sistemas de irrigação (principalmente custos de energia) muitas vezes se igualam ou excedem os custos fixos dos equipamentos de irrigação. Conforme o autor, a relativamente grande demanda de energia dos sistemas de irrigação, junto com a rápida elevação do custo dos

combustíveis, tem proporcionado impulso para que se faça um melhor uso de energia nos sistemas de irrigação atuais, devendo também ser considerado no projeto de novos sistemas. IPT (1989) também realizou análise dos custos de irrigação de terras altas, em tres importantes regiões do estado de São Paulo. O estudo concluiu que os custos operacionais são os que mais pesam no custo da irrigação, e nestes, o maior peso recai no custo da energia elétrica. Na aspersão convencional, a participação da energia elétrica no custo da irrigação situou-se, em média, em 50,2 %, com amplitude de 38,10 a 60,64 %. A participação da energia elétrica no custo total é, em média de 15,3 %, com amplitude de 8,43 a 25,48 %. Segundo este estudo, o custo operacional deve ser melhor considerado na decisão sobre o equipamento a usar, tornando-se fundamental para a redução dos custos de irrigação.

CHRISTIANSEN (1942) salienta que a baixa pressão permite que sistemas de maior capacidade sejam usados com uma dada unidade de energia. Portanto, os custos por unidade de água aplicada podem ser significativamente reduzidos. A busca de caracterizações tem levado ao desenvolvimento de vários tipos de sistemas de baixa pressão, onde aspersores operando a 10 mca podem ser espaçados de 12 a 15 m. Sistemas de baixa pressão desse tipo assemelham-se em muitos aspectos a sistemas de maior pressão.

Conforme NATIONAL RAIN BIRD SALES & ENGINEERING CORPORATION (1952), o fabricante desenvolveu aspersor de

baixa pressão utilizando um mesmo modelo já existente, tendo como única diferença os bocais usados em combinação e a colocação de pino dispersor para melhorar o padrão de distribuição. Com isso, foi obtido padrão de distribuição uniforme para a faixa de pressão desejada (10 a 14 mca), mostrando-se apto para uso em espaçamentos de 12 x 12 m.

2.2.2.2. Perspectivas de Uso da Energia Gravitacional para Acionamento

KELLER & BLIESNER (1990) afirmam que as recentes preocupações com disponibilidade e custo de energia, realimentam o interesse por sistemas de irrigação por aspersão que operam em pressões mais baixas (35 a 210 KPa). Muitas vezes a pressão gravitacional, produzida pela diferença de elevação entre a fonte de água e a área irrigada, é suficiente para operar os sistemas sem a necessidade de bombeamento. Nesse caso, o custo reduzido dos tubos de baixa pressão (concreto não reforçado, plástico de parede estreita ou cimento amianto), pode ser útil no barateamento da distribuição de água para os aspersores. Esses sistemas tem a desvantagem do maior requerimento de mão de obra para o deslocamento periódico das laterais, pois estas estarão espaçadas de somente 6 a 9 m. Salientam que as pressões utilizadas devem ser suficientes para girar os aspersores e proporcionar adequada quebra do jato. Os autores citam o uso de aspersores alimentados por mangueiras, e

operando individualmente em pressões reduzidas. Esses sistemas podem produzir umedecimento relativamente uniforme, desde que os aspersores sejam movidos em uma malha sistemática com suficiente sobreposição. PEROLD (1974) relata metodologia para o cálculo econômico de tubulações, em sistemas de aspersão acionados por energia gravitacional, considerando o aproveitamento otimizado dos desníveis.

CHRISTIANSEN (1942) afirma que, às vezes pressões de 7 a 14 m podem ser desenvolvidas por gravidade, enquanto pressões maiores requerem bombeamento. Portanto, conforme a situação, sistemas que possam operar nessas pressões baixas tornam-se viáveis enquanto os outros não. Apesar da distribuição de água ser menos uniforme, estes sistemas podem ser melhores do que os de irrigação superficial.

ALFRED & GRAY (1952) e BERNARDO (1989) salientam que, em alguns casos, a fonte de água situada em cota superior apresenta diferença de elevação que iguala ou excede a pressão requerida no sistema de aspersão. Onde isso ocorre, o sistema pode operar por gravidade sendo desnecessário o bombeamento.

SOARES et alii (1991), afirmam que a flexibilidade da irrigação por aspersão faz com que este método seja muito importante no desenvolvimento das regiões, principalmente naquelas montanhosas onde fontes, depósitos e

rios situados em locais elevados, podem proporcionar pressão gravitacional ao sistema.

2.3. Avaliação de sistemas de aspersão

2.3.1. Coeficientes de Uniformidade

As recomendações de aspersão, geralmente são realizadas com base na análise da uniformidade de distribuição, dentro de um padrão de aspersores sobrepostos. Os padrões de distribuição da aspersão são então comparados com outros, através de coeficientes calculados por meio dos valores de precipitação em coletores.

Técnicas para avaliar esta uniformidade, tais como medidas do volume de água em coletores distribuídos no padrão do aspersor, tem sido desenvolvidas e extensivamente utilizadas. A uniformidade tem sido caracterizada, usando os valores precipitados nos coletores para o cálculo do CUC, Coeficiente de Variação, Uniformidade de Distribuição no Quarto Menor e vários outros parâmetros. Estas técnicas proporcionam bases quantitativas para comparar o desempenho relativo dos diferentes sistemas (SOLOMON, 1985).

Muitos coeficientes tem sido sugeridos para quantificar a distribuição horizontal da lâminas de água, com medidas de superfície. O mais conhecido e largamente usado em irrigação por aspersão é Coeficiente de Uniformidade proposto por CHRISTIANSEN (1942).

$$CUC = \left(1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}}\right) 100 \quad \dots \quad (2)$$

onde,

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

$\bar{X}$ - Lâmina ou volume médio coletado

x_i - Lâmina ou volume coletado no i-ésimo coletor

Outro coeficiente que tem se tornado crescentemente popular é o Coeficiente de WILCOX & SWAILES (1947), que tem como base o Desvio Padrão e a Média dos volumes de água coletados.

$$CWS = \left(1,0 - \frac{s}{\bar{X}}\right) 100 \quad \dots \quad (3)$$

onde,

CWS - Coeficiente de Wilcox e Swailes

s - desvio padrão das lâminas ou volumes coletados

$\bar{X}$ - lâmina ou volume médio precipitado no coletor

WILCOX & McDUGLAS (1955) utilizaram 3 índices para caracterizar o desempenho de aspersores: Coeficiente de Wilcox e Swailes(CWS); Coeficiente de Christiansen(CUC) e Coeficiente de Amplitude(R).

$$R = 200 \frac{H-L}{H+L} \quad \dots \quad (4)$$

onde:

H = maior valor coletado

L = menor valor coletado

Se $R = 200$ --- o menor valor é zero

Se $R = 0$ --- existe perfeita uniformidade de distribuição

Os autores concluem que estes 3 índices são suficientes para avaliar adequadamente a uniformidade da distribuição.

2.3.2. Valores mínimos recomendados

WILCOX & SWAILES (1947) sugerem um valor mínimo de 70% para o Coeficiente de Wilcox e Swailes.

Em seu trabalho, WILCOX & McDOUGLAS (1955) questionam o valor mínimo aceitável de CWS = 70%, proposto anteriormente. Então, relacionam os coeficientes de uniformidade a um razoável Coeficiente de Amplitude(R) dos valores coletados. Após análise de muitos dados de distribuição, concluíram ser necessário visar um coeficiente de uniformidade (CWS), de no mínimo 75 a 80 %, os quais devem levar a Coeficiente de Amplitude(R) de cerca de 93 a 77.

CORRY⁶, citado por OLLITA (1986) salienta que o valor do coeficiente de uniformidade é o processo estatístico mais comum para avaliação de sistemas de irrigação por aspersão. Por convenção, o valor de 80 % é o mínimo aceitável para o desempenho normal do aspersor.

KERR et alii (1980) realizaram estudo de padrões de distribuição de diversos tipos de aspersores de jardim, e utilizaram o CUC para comparar os padrões e

⁶ CORRY, J.A. Sprinkler system evaluation. Davis, University of California, 1958.

determinar como os vários espaçamentos afetam as características da distribuição. Os autores consideraram um CUC mínimo aceitável de 70 %, seguindo a prática comum citada por HART & HEERMAN⁷.

KELLER & BLIESNER (1990) afirmam que, embora o conceito de valor baixo seja relativo, valores de CUC < 75 % são geralmente considerados baixos, mesmo para campos gerais e forrageiras. Para culturas de elevado valor, um CUC > 84 % é recomendado.

LETEY et alii (1990) afirmam que o CUC mais elevado que se pode esperar de sistemas com movimentação manual, é de 80%. Em condições de vento e projeto inadequado, o CUC pode ser consideravelmente menor. O valor de CUC de 80 % foi selecionado para representar um nível elevado de performance dos aspersores com movimentação manual. Entretanto, é reconhecido que valores típicos de campo podem ser mais baixos.

2.3.3. Limitações de uso dos coeficientes

Segundo BENAMI & HORE (1964) tem sido observado que duas distribuições efetivamente diferentes, podem produzir iguais valores de CUC. Acrescentam o fato de que o CUC não dá ênfase aos desvios abaixo da média, que são mais críticos na prática. Quanto ao coeficiente de Wilcox e

⁷ HART, W.E. & HEERMAN, D.F. **Evaluating water distribution of sprinkler irrigation systems**. Fort Collins, Colorado State Univ., 1976. 38p. (Bulletin, 128).

Swailles, os autores afirmam que o quadrado dos desvios acrescenta peso às medidas extremas, mas não diferencia adequadamente os padrões de distribuição satisfatórios dos não satisfatórios. Os autores sugerem um novo coeficiente que considera os desvios das médias de grupos de leituras abaixo e acima da média geral.

COELHO (1990) também concluiu que um único valor de CUC pode representar duas ou mais distribuições espaciais diferentes de água, resultando em distintas produtividades de uma cultura.

CHRISTIANSEN (1965) salienta que o CUC é um coeficiente de cálculo simples, mas que fornece apenas uma informação relativa da distribuição. Portanto, não pode ser utilizado diretamente como eficiência de aplicação pois existem outros fatores que influenciam na sua determinação.

CULVER & SINKER (1966) comentam que o CUC não é sensível para a representação de variações nos padrões de distribuição, sugerindo o uso do Coeficiente de Variação (CV).

DAVIS (1966) afirma que o Coeficiente de Wilcoxon e Swailles é de limitada aplicação devido a dificuldade de determinar sua validade por métodos estatísticos. Apesar disso, tem sido muito utilizado nas análises de distribuição de aspersão.

Segundo HEERMAN (1983), o CUC tem sido muito usado pela indústria de irrigação, para avaliar e comparar sistemas de irrigação por aspersão. O autor salienta que os

índices estatísticos (média e desvio padrão) são suficientes para caracterizar de uma forma bastante precisa a distribuição de água.

Conforme SEGINER (1987), uma retrospectiva nos estudos de coeficientes de uniformidade dos últimos 40 anos mostra a desnecessária procura do coeficiente ideal, quando na verdade os índices estatísticos tem estado disponível para uso imediato. O autor recomenda o emprego do Coef. de Wilcox e Swailes, que é baseado no desvio padrão como medida de dispersão, e o uso do Coeficiente Christiansen somente para estudos analíticos especiais.

SOARES et alii (1991) afirmam a grande utilidade do CUC para a comparação das uniformidades de diferentes equipamentos e condições de operação.

Apesar das limitações verificadas no uso de cada coeficiente, o CUC tem sido eleito na maior parte dos trabalhos científicos e nos estudos de desenvolvimento de equipamentos das indústrias, tendo por isso se tornado bastante popular ao longo da história da aspersão.

O aprofundamento das pesquisas tem levado a estudos mais detalhados dos processos de movimento da água no solo a partir da superfície, e dos fatores que interferem nesse deslocamento. Assim, pesquisadores tem estudado o fenômeno de redistribuição da água no solo, na tentativa de otimizar o uso de sistemas de irrigação.

O uso dos coeficientes de uniformidade atuais (CUC, CWS, etc.), assume que a infiltração é um processo unidimensional, e portanto que a distribuição da água no perfil é igual à distribuição na superfície. Entretanto, a uniformidade dentro do solo é modificada devido à redistribuição lateral, à ação das raízes e à topografia, sendo esta distribuição dentro do solo a que tem real influência no rendimento das culturas. É necessário o estudo e a definição de um coeficiente de uniformidade efetivo, que reflita a água disponível para as culturas, considerando a redistribuição e os parâmetros do solo. A interação desses fatores pode conduzir a projeto e manejo mais otimizado dos sistemas de irrigação (LETEY, 1985; WALLACH, 1990).

Devido aos gradientes de potencial existentes no solo desigualmente umedecido, a umidade move-se verticalmente e lateralmente dentro do perfil, causando uma melhor uniformidade da água dentro do solo do que indicado inicialmente pelas medidas superficiais. Esse fenômeno de redistribuição depende de muitas variáveis como: umidade inicial, taxa de aplicação, distribuição na superfície, tipo de solo e total de água aplicada. Portanto, os critérios usuais parecem ser inadequados, se o projetista pretende alcançar o sistema mais econômico possível (COHEN & BRESLER, 1967; HART, 1972).

PAIVA (1980) e STERN & BRESLER (1983) concluíram que existe um processo de redistribuição da água

aplicada ao solo, de tal forma que ocorre um sensível acréscimo na uniformidade de umidade dentro do perfil. Esta redistribuição tende a equilibrar as diferenças de umidade no solo.

PERRENS (1984) quantificou esta variação e concluiu que a intensidade de redistribuição de água no solo está relacionada com a textura. Durante o processo de infiltração, a uniformidade aumentou de 60% para 73% em um solo areno-siltoso e de 60% para 67% em um solo arenoso.

2.3.4. Ensaios de aspersores

2.3.4.1. Ensaios de distribuição

SOLOMON (1979) conduziu estudo para analisar a variabilidade dos resultados de ensaios de uniformidade de aspersores. Segundo o autor, os resultados são alterados por medições imprecisas dos volumes de água coletados, da velocidade e direção dos ventos e da pressão; além das diferenças físicas de aspersores de um mesmo modelo (bocais, mecanismos de rotação, etc.) O autor afirma que pequenas diferenças de fabricação, podem afetar significativamente as características do jato que deixa o aspersor, atuando na distribuição de água e nos CUCs. O autor recomenda que, devido às incertezas na determinação do CUC, este índice seja expresso por um valor inteiro, sendo que podem ser esperadas variações de ± 1 no último dígito. Após muitos ensaios o autor concluiu que são necessárias 3 repetições, considerando

um intervalo de confiança de 95% e uma tolerância no CUC de $80 \pm 5\%$.

HART (1961) cita os dois tipos básicos de ensaios de distribuição espacial de água a partir de aspersores: ensaio com vários aspersores operando simultaneamente, para cada espaçamento a ser estudado (simulando lateral em operação); e ensaio de campo com um único aspersor, para obtenção das lâminas através de sobreposição simulada, segundo a lógica matricial. Enquanto o primeiro é limitado a uma condição de operação, o último tipo é mais versátil e econômico, podendo-se simular as diversas condições operacionais de projeto com a realização de um único ensaio.

BRANSCHIED & HART (1968) compararam os dois tipos de ensaio em condições climáticas semelhantes. O padrão individual foi sobreposto, simulando a operação da lateral. Os resultados demonstraram a validade desse procedimento, uma vez que as diferenças verificadas foram muito pequenas.

WILCOX & McDOUGLAS (1955) realizaram seus estudos com testes individuais de cada aspersor, com coletores distribuídos numa malha de $1,524 \times 1,524$ m. Após, foi realizada sobreposição dos padrões individuais para obter a distribuição em cada espaçamento desejado.

KINCAID (1991) também realizou testes externos com um único aspersor, utilizando espaçamento de coletores de 2 m, altura do bocal de 0,6 m e duração de 1 a 2 hrs. Um

programa de computador foi usado para calcular a uniformidade em diferentes combinações de espaçamentos.

Uma verificação dos trabalhos científicos realizados sob condições de campo, mostra que algumas análises ficam prejudicadas devido a condições ambientais variáveis (principalmente o vento). Estas diferenciações climáticas dificultam consideravelmente a comparação de ensaios, tornando proibitiva uma maior generalização dos trabalhos científicos e dos ensaios de fabricantes.

O efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição tem sido bastante estudado, havendo recomendações técnicas para a locação de tubulações, e de percentuais de sobreposição dos perfis dos aspersores para diversos intervalos de velocidade de vento. A caracterização de componentes, que visa fornecer subsídios técnicos para projetistas, não deve estar atrelada a valores aleatórios do fator vento, pois este é variável e característico de uma dada localidade ou região. Essa adequação deve ser feita no local, conforme as condições atmosféricas e recomendações técnicas já existentes.

Ensaio de laboratório, realizados em ambiente fechado permitem melhor controle das variáveis de teste, tornando mais precisas as determinações e mais confiáveis as relações obtidas. Desta forma, os resultados apresentarão maior universalidade e será possível melhor comparação entre os parâmetros de interesse para projetos. Além disso, esse

tipo de ensaio reduz o tempo e o espaço físico necessários à sua realização. Por essas razões, verifica-se a tendência entre pesquisadores e fabricantes, de uso de ensaios radiais em ambiente fechado para caracterização de equipamento.

COELHO et alii (1992) afirmam que a disposição retangular de coletores, prevista na norma da ABNT para ensaio de aspersores, leva a uma trabalhosa e cansativa mensuração de volumes coletados, dificultando bastante a realização dos mesmos. Os autores realizaram estudo visando comparar os tipos de ensaio, com coletores em disposição retangular e radial, analisando valores de CUC dos testes. Concluíram que existe elevada correlação entre os resultados obtidos através das duas metodologias, o que credencia os ensaios radiais para testes em laboratório, pela facilidade de instalação e operacionalização, economicidade e possibilidade de extrapolar resultados.

Considerando um único aspersor trabalhando em condições sem vento, e sendo mantidas uniformes a vazão e a velocidade de rotação, a lâmina de água em algum ponto é função da sua distância em relação aspersor, independente da sua orientação. Também, a lâmina de água distribuída por uma rede de aspersores é a combinação das lâminas distribuídas pelo aspersor individualmente (CHRISTIANSEN, 1942; CHU & ALRED, 1968).

A distribuição real de água de um aspersor é alcançada sob condições sem vento, pois nestas condições a

distribuição dependerá somente do padrão característico do aspersor e do espaçamento adotado. Assim, tornam-se interessantes os estudos em ambiente protegido, eliminando as variáveis do tempo (BILANSKI & KIDDER, 1958). Os autores utilizaram ensaio radial com coletores espaçados de 0,60 m, em testes de 1 hora de duração, para avaliar como os vários componentes do aspersor afetam a sua distribuição de água.

GRIFFIN (1978) simulou ensaio de campo, usando perfil de distribuição de água de um único aspersor, obtido com coletores dispostos radialmente. O autor determinou a malha de coletores mediante a rotação do perfil em torno do eixo do aspersor. Foi feita a interpolação linear em pontos da malha que não coincidiram com a distância ao longo do eixo radial. A partir da simulação das precipitações da malha, foram geradas as sobreposições para os espaçamentos de interesse. Esse procedimento demonstrou a grande economia de tempo, trabalho e recursos que podem ser conseguidos com o uso adequado dos recursos de informática, simplificando os testes e mantendo a representatividade.

Os perfis de aplicação de água são importantes para estudos de uniformidade em diversas condições operacionais (pressões, bocais, modelos, espaçamentos, etc.). Esse perfil pode ser determinado através de ensaio com um braço radial de coletores, em local coberto. Com o giro do perfil, é produzida a malha espacial, para ser sobreposta nos espaçamentos de interesse e usada no cálculo dos CUCs

respectivos (CHEN & WALLENDER, 1984; e SEGINER et alii, 1991).

KINCAID (1982) conduziu séries de testes de aspersores em local fechado, utilizando ensaio radial com coletores espaçados de 0,5 m. A altura de bocal adotada foi de $\pm 0,8$ m, que é aproximadamente a altura usada pela maioria dos fabricantes (altura mais comum no campo, em laterais móveis, varia de 0 a 1 m).

KINCAID (1991) trabalhou no desenvolvimento de aspersores, utilizando ensaios radiais padrão, internos, com linha única de coletores. Os testes radiais foram conduzidos para estudar padrões de distribuição, em condição sem vento, com coletores espaçados de 0,5 m e altura de bocais de cerca de 0,6 m acima dos coletores.

A facilidade de instalação e a economicidade alcançada com os ensaios de distribuição radial, indicam o potencial e a viabilidade de uso desses ensaios de uniformidade em locais fechados, na ausência de vento. (COELHO et alii, 1992).

Os padrões de distribuição são necessários na pesquisa, no desenvolvimento de novos protótipos, no controle de qualidade de fabricantes e na avaliação feita por organizações de usuários, requerendo rotina de testes com um grande número de combinações aspersor-bocal-pressão. SEGINER et alii (1992) confirmam a tendência de utilização de ensaios radiais para a determinação desses padrões em aspersores. Os

autores desenvolveram e testaram um equipamento computadorizado, para determinação automática dos volumes precipitados em um perfil, a partir de ensaios com coletores dispostos radialmente.

2.3.4.2. Coletores : espaçamento, representatividade

A seleção do número de pontos de amostragem dentro de uma malha, visando caracterizar o padrão de distribuição, está relacionada à precisão, à economicidade e à operacionalização do ensaio. A uniformidade de distribuição do padrão determina os espaçamentos necessários a uma caracterização adequada. Em uma distribuição uniforme, um menor número de coletores pode dar a precisão desejada. Entretanto, no caso de um padrão desuniforme, a seleção da densidade de amostragem adequada torna-se ainda mais crítica (DAVIS, 1966). Em seu estudo, o autor afirma que um espaçamento de coletores de 0,61 m (cada coletor = 0,27% do padrão) representa com precisão a distribuição, sendo por isso utilizado como padrão de comparação.

Os resultados de DAVIS (1966) mostraram que uma baixa densidade de amostragem pode resultar em valores enganosos dos parâmetros da distribuição, particularmente se a distribuição é desuniforme. Recomenda que, em padrões desuniformes, cada coletor deve representar no máximo 2,5% da área de ensaio.

COLOMBO et alii (1983) realizaram ensaios de campo com um aspersor e concluíram que, para valores de CUC de 70%, 40% e 19%, devem ser adotados coletores que representem áreas máximas de 6%, 4% e 3%, respectivamente.

Apesar da grande validade dos estudos de CHRISTIANSEN (1942), deve-se considerar a área de abrangência dos coletores usada em seus ensaios ($3 \times 3\text{m}$ 1coletor = $9,29\text{ m}^2$ em 70% dos ensaios; e $2,15 \times 2,15\text{m}$ 1col. = $4,64\text{ m}^2$ em 30% dos ensaios) , para realizar inferências a perfis que apresentam grande desuniformidade de lâminas ao longo do raio (caso de ensaios com pressão reduzida). Conforme demonstrado por DAVIS (1966), no caso de perfis desuniformes, coletores mais afastados, provavelmente não conseguem detectar as variações de lâmina que ocorrem ao longo do raio, levando a CUCs não reais.

MAREK et alii (1985) realizaram estudo sobre o uso de três tipos de coletores em ensaios de aspersores. Concluíram que a lata de óleo apresenta aceitável exatidão, o que, associado ao seu baixíssimo custo, permite indicação para uso em larga escala nos ensaios.

2.3.5. Durabilidade dos aspersores

Os aspersores de baixa revolução apresentam maior durabilidade devido ao menor desgaste, e por isso são mais indicados para os sistemas portáteis. No sistema portátil, os aspersores operam continuamente e portanto são

muito mais exigidos do que nos sistemas fixos. Alguns sistemas portáteis exigem 2000 horas de operação ou mais em uma única temporada, enquanto nos sistemas fixos os aspersores raramente operam mais do que 100 horas por temporada. No início da utilização de sistemas portáteis, pouquíssimos dos aspersores antes usados em sistemas fixos, mostraram-se apropriados. Alguns desgastaram-se em menos de uma temporada. Por essa razão, o processo de fabricação de aspersores para esse tipo de sistema deve ser mais rigoroso (CHRISTIANSEN, 1942). Observações de campo desse autor indicam que aspersores usados variam mais sua velocidade de rotação do que os novos, havendo grande diferença de desempenho dos aspersores de uma mesma marca, numa mesma linha lateral. A vida útil de diferentes tipos de aspersores varia, sendo que informações específicas de durabilidade deve ser considerada, podendo ser obtida de outros usuários, do fabricante ou do vendedor

NAVARRO et alii (1991) realizaram estudo para determinar a vida útil de um aspersor do mercado cubano, visando verificar as consequências da exploração intensiva sobre alguns de seus índices técnicos. Concluíram que aspersor MAR-90Z apresenta durabilidade aceitável.

PERI & KARMELI⁶, citados por KARMELI et alii (1982), conduziram testes de campo em grande amostragem de

⁶PERI, G. & KARMELI, D. A study of sprinkler longevity. In: IRRIGATION TECHNICAL CONFERENCE OF THE IRRIGATION ASSOCIATION, San Francisco, 1979. Paper.

diferentes tipos de aspersores. Estes haviam operado por períodos de 400 a 15.000 horas, sob diferentes qualidades de água. Os resultados mostraram excesso de vazão médio em torno de 20%, devido ao desgaste nos bocais. Segundo os autores, valores percentuais de acréscimo de diâmetro/horas de operação podem variar de 0,2%/1000h a 5%/1000h. Quando a água contém elevados teores de sais, este índice pode chegar a 2%/100h.

KARMELI et alii (1982) desenvolveram um modelo de decisão para analisar economicamente o tempo ótimo para substituição do bocal, durante a vida útil do aspersor. O desgaste dos bocais e a consequente variação na vazão, resulta em redução na uniformidade de distribuição e excessiva aplicação de água. Concluem que o tempo ótimo de troca depende dos parâmetros de operação do aspersor (vazão, pressão e vida útil do aspersor; e custo e vida útil efetiva do bocal). Em condições de médio ou elevado desgaste, os bocais devem ser substituídos frequentemente, isto é, entre 7 a 12 vezes durante a vida do aspersor (aproximadamente a cada temporada de irrigação). Com o uso de bocais de alta qualidade, o desgaste é reduzido, e a troca deve ser feita uma ou duas vezes durante a vida útil. Também salientam que, quanto maior a vida útil do aspersor, mais vantajoso o controle da reposição regular dos bocais.

SANTOS & SOARES (1992) analisaram aspersores e outros componentes de sistemas de aspersão, e concluíram que

a vida útil de alguns aspersores nacionais está bem abaixo da recomendada pela literatura. Salientam a necessidade de avaliações técnicas de durabilidade que possam subsidiar a seleção de aspersores nacionais.

2.3.6. Importância dos ensaios e normatização

CHRISTIANSEN (1942) alerta que no início, muitos sistemas de irrigação por aspersão foram instalados nos EUA devido à propaganda excessiva feita pelos interessados em fabricar ou vender equipamentos. A quebra das expectativas inicialmente geradas, determinou o abandono de alguns sistemas e a retomada da irrigação por sulcos. Segundo estudo do IPT (1989), o crédito subsidiado e o "marketing" das indústrias fabricantes tem sido determinante no tipo de equipamento escolhido pelo agricultor.

Conforme relatório do IPT (1987), no Brasil foram cadastrados 43 fabricantes de equipamentos de irrigação por aspersão, sendo que apenas 3% mantêm um nível de controle de qualidade confiável. Poucos mantêm uma área de desenvolvimento de produto, de controle mais sofisticado de qualidade ou campos de teste de desempenho. Portanto salienta-se a necessidade de realização de ensaios de equipamentos e componentes, visando verificar a qualidade dos mesmos e proporcionar ao usuário o real desempenho do material adquirido.

Segundo SCALOPPI (1987) a maioria dos equipamentos de irrigação fabricados no Brasil baseia-se na simples reprodução de equipamentos similares produzidos nos países desenvolvidos. Entretanto, nem sempre conseguem reproduzir os elevados níveis de qualidade industrial verificados naqueles países. Torna-se evidente a importância de um programa eficiente de normatização e controle de qualidade industrial, principalmente quando se verifica rápida expansão de unidades industriais fabricantes de equipamentos de irrigação.

Por tudo isso, é fundamental a elaboração de normas técnicas para o setor, a adequação dos órgãos credenciados para desenvolver ensaios, a divulgação geral de normas e critérios técnicos mínimos, e estudos para a liberação de crédito mediante especificação de desempenho idônea.

SAAD et alii (1988) alertam para o risco da falta de ensaios de desempenho nos equipamentos nacionais. Citam ensaios de desempenho nos sistemas pivo-central instalados em Guaira (SP), onde se verificou que as lâminas aplicadas pelo equipamento nas velocidades respectivas, não corresponderam às indicadas pelos fabricantes. Concluem que um programa racional de manejo não pode ser efetuado com base nos dados do fabricante, e recomendam ensaios de campo para os ajustes adequados. Portanto, vemos que um dos sistemas mais modernos de irrigação apresenta falhas alarmantes, que

somente podem ser sanadas pelo desenvolvimento criterioso e sério de ensaios de desempenho.

SANTOS & SOARES (1992) analisaram o estado de conservação dos aspersores e de sistemas de irrigação, visando subsidiar a seleção, manutenção e conservação desses equipamentos. Constataram que diversos aspersores do mercado nacional apresentam graves deficiências de operação, devido à falhas de montagem na fábrica, problemas de qualidade e falta de manutenção. Os autores sugerem avaliações técnicas rigorosas do equipamento produzido no país.

Essa carência, verificada ao nível dos fabricantes e dos projetos já instalados, reflete uma realidade preocupante que pode levar ao mau uso, descrédito e até ao abandono da tecnologia de irrigação. A necessidade de controle de qualidade dos produtos e da avaliação de equipamentos, conduz ao grave problema de falta de apoio às instituições responsáveis, tanto na capacitação de pessoal quanto na área de infraestrutura e de equipamentos.

Torna-se importante frisar o esforço desenvolvido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e por técnicos ligados a ela, no sentido de normatizar métodos e procedimentos de ensaio de equipamentos de irrigação. Entretanto, infelizmente, as normas técnicas nacionais e internacionais ainda são divulgadas de uma maneira deficiente, com custos que por vezes inviabilizam o acesso às mesmas. Procedimentos de padronização de ensaios e

critérios mínimos de sistemas deviam ser divulgados ao máximo e talvez até cedidos a instituições, pesquisadores e técnicos interessados. Assim, as informações ficariam menos restritas a poucas pessoas e a desejada massificação de critérios, exigência de padrões técnicos constantes em norma e sua real adoção, poderia tornar-se uma realidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

Os experimentos foram realizados em dois locais nas dependências do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP. Para a realização dos ensaios de distribuição de água foi utilizado um prédio com dimensões de 20 x 40 m, compatível com as necessidades dos mesmos, enquanto os demais ensaios foram conduzidos no laboratório de hidráulica do departamento.

3.2. Seleção da pressão de operação, marcas, modelos e bocais

3.2.1. Critérios utilizados

A seleção da faixa de pressão (10 a 20 mca⁹) para os ensaios, visou preencher a "lacuna técnica" existente no mercado, onde não existem especificações, nem interesse pela operação de aspersores nas pressões inferiores a 20 mca. O limite inferior (10 mca) baseou-se em experiências pessoais

⁹ 1 mca = 9,8 KPa

anteriores, onde foi verificada pressão mínima de giro para alguns aspersores.

As marcas/modelos de aspersores foram selecionadas segundo o seu potencial para operar em baixa pressão, apresentando alcance de jato mínimo e uma certa qualidade de fabricação (conhecido no mercado, catálogos, origem do "design", etc.). Foram mantidos contatos com os fabricantes visando subsidiar esta escolha.

A escolha dos bocais seguiu o critério de procurar obter melhor pulverização do jato na faixa de pressão de interesse. Assim, escolheu-se bocais de no máximo 3,5 a 4,0 mm, buscando-se Índice de Pulverização (I_p) aceitável, e com isso a produção de gotas teóricas de tamanho médio e pequeno, dentro de certa margem de segurança, nas pressões a serem estudadas. Torna-se importante salientar que a adoção desse critério conduziu à escolha de algumas combinações de bocais que não são especificadas nos catálogos dos fabricantes, mas que podem ser solicitadas aos mesmos. No Anexo 1, Tabela 33, encontram-se as especificações técnicas de catálogo, disponíveis no mercado, nas pressões estudadas.

3.2.2. Marcas, modelos e bocais ensaiados

Foram utilizadas 4 marcas/modelo de aspersores: o ZA-30 fabricado pela Asbrasil, de metal, com 1 bocal e ângulo de inclinação do jato de 30°; o BIEHL setorial fabricado pela Biehl S/A Metalúrgica, de plástico, com 1

bocal e ângulo de inclinação de 30°; o A1823 fabricado pela Fabrimar S.A Indústria e Comércio, de metal forjado, com 2 bocais, tendo o principal (acionador) um ângulo de inclinação de 18° e o secundário um ângulo de 23°; e o NAAN 5022/91 fabricado pela Naan Irrigation Systems, de plástico, com dois bocais, tendo o principal um ângulo de inclinação de 23° e o secundário um ângulo de 18°.

As marcas, modelos e bocais selecionados são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Marcas, modelos e bocais ensaiados

MARCAS / MODELOS				
	ASBRASIL ZA-30	BIEHL Setorial	FABRIMAR A1823	NAAN 5022/91
DIAMETRO DO BOCAL (mm)	2,8	4,0	3,2 x 2,4	2,5* x 2,5*
	3,2	Sem Pino	3,2 x 3,0	3,5 x 2,5*
		4,0		
	3,8	Com Pino	3,2 x 3,6	3,5 x 3,5

* Bocal elíptico

3.2.3. Pressões ensaiadas

Foram selecionadas 5 pressões de operação para os ensaios: 10,0; 12,5; 15,0; 17,5 e 20,0 mca (1mca = 9,8KPa).

3.3. Procedimento estatístico

Dez unidades dos modelos da ASBRASIL, FABRIMAR e NAAN, e seis unidades do modelo da BIEHL foram retiradas aleatoriamente da linha de produção. O bocal usado no aspersor BIEHL foi de 4,0 mm por ser o único produzido, e os

demaís foram escolhidos de cada empresa, segundo os critérios anteriormente expostos. De cada marca foram sorteados e separados 3 grupos de aspersores para compor os 3 grupos de bocais a ensaiar. Da BIEHL foram sorteados 2 grupos de aspersores para compor os bocais com e sem pino (utilizando ou não o pino interceptor de jato).

A seguir foram sorteados os bocais dentro de cada grupo para estabelecer as três repetições (três unidades) de cada grupo de bocais.

Desta forma, foram ensaiados 3 grupos de bocais (B_i), $i = 1$ a 3 de cada marca, em 5 níveis de pressão (P_j) $j = 1$ a 5, e 3 repetições (R_k) $k = 1$ a 3. No caso do BIEHL foi ensaiado o aspersor com bocal de 4 mm, com e sem pino dispersor (B_1) $i = 1$ a 2, nos 5 níveis de pressão (P_j) e 3 repetições (R_k). Portanto foram realizados 165 ensaios no total.

O experimento foi realizado num esquema de Fatorial, em delineamento inteiramente casualizado. Os fatores foram Diâmetro e Pressão. A análise estatística foi feita separadamente para cada marca e espaçamento de interesse.

3.4. Ensaio de vazão

Este ensaio foi realizado para determinar a relação Pressão x Vazão de cada modelo de aspersor, nas diferentes combinações de bocal previstos pelos objetivos

desse trabalho. Com isso, foi também estabelecido o Coeficiente de Descarga para cada aspersor. Foram efetuadas três repetições (3 unidades) de cada combinação modelo/bocal/pressão.

3.4.1. Equipamento, material e procedimento utilizado

O equipamento e material utilizado constou de:

- Reservatório
- Conjunto moto-bomba
- Filtro de areia e tela
- Medidor de vazão magnético indutivo, precisão de 0,1%
- Válvula reguladora de pressão
- Registro de fechamento rápido
- Aspersor ensaiado
- Campânula de fibra de vidro ($d = 1,0 \text{ m}$ $h = 0,60 \text{ m}$)
- Transdutor de pressão, precisão de 0,5%
- Microcomputador
- Mangueira de nylon p/ tomada de pressão
- Fios de conexão
- Diskete
- Retro-projetor
- Planímetro de precisão
- Micrômetro interno (2,0 - 3,0mm), precisão de 0,001mm
- Micrômetro interno (3,0 - 6,0mm), precisão de 0,001mm

O esquema de ensaio é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema do Ensaio de Vazão

onde,

- 1 - Reservatório
- 2 - Conjunto moto-bomba
- 3 - Filtro de areia e tela
- 4 - Medidor de vazão magnético indutivo, precisão 0,1%
- 5 - Válvula reguladora de pressão
- 6 - Registro de fechamento rápido
- 7 - Tubo de drenagem
- 8 - Aspersor ensaiado
- 9 - Campânula de fibra de vidro ($d = 1,0 \text{ m}$; $h = 0,60 \text{ m}$)
- 10 - Transdutor de pressão, precisão de 0,5%
- 11 - Microcomputador
- 12 - Mangueira de nylon p/ tomada de pressão
- 13 - Fios de conexão

Na Figura 2 tem-se uma vista geral do ensaio de vazão.

Figura 2 - Vista geral do ensaio de vazão

O procedimento adotado foi iniciado com o zeramento dos equipamentos de medida de pressão e vazão, sendo comunicado ao programa do computador. O conjunto moto-bomba foi acionado e a pressão desejada foi estabelecida e estabilizada através da válvula reguladora de pressão. Então, cada par de valores pressão x vazão era registrado de forma automática utilizando um sistema de aquisição de dados computadorizado, mediante a leitura em sensores de pressão e de vazão. Desta forma, os conjuntos de valores relativos à

curva pressão x vazão de cada ensaio, eram armazenados num arquivo em diskete.

3.4.2. Processamento dos dados

Em cada combinação modelo/bocal foram determinados 5 pares de valores de pressão (P) x vazão (Q), originando uma curva característica do aspersor. Cada ensaio foi realizado com 3 repetições. Através desses valores, obteve-se a equação de vazão em função da pressão de cada aspersor, ajustando-se os dados pelo seguinte modelo:

$$Q = kP^x \quad \dots \dots \dots (5)$$

onde,

Q - vazão (m³/s)

k e x - coeficientes de ajuste

P - pressão no bocal (mca)

O Coeficiente de Descarga (Cd) do aspersor foi determinado pela equação:

$$C_d = \frac{Q}{A\sqrt{2gP}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

onde,

Cd - coeficiente de descarga

Q - vazão (m³/s)

A - área de fluxo (m²)

g - aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

P - pressão no bocal (mca)

A vazão (Q) e a pressão (P) foram determinadas pelo sistema de aquisição de dados, utilizando um microcomputador conectado a sensores de pressão e vazão, com leitura automática dos instrumentos. A área de fluxo (A) dos bocais circulares foi determinada através da medição dos seus diâmetros com o uso de micrômetros internos. A área de fluxo dos bocais em forma de elipse foi determinada através de ampliação e projeção do perfil do bocal em papel vegetal (com o uso de retroprojektor), e medição desta seção com planímetro.

3.5. Ensaio de distribuição de água do aspersor

Este ensaio foi realizado para caracterizar o padrão de distribuição de água em cada combinação modelo/bocal/pressão. Como local foi utilizado um prédio de aproximadamente 20 x 45 m, com piso nivelado e pé direito de 4 m. Logo, o ensaio radial foi conduzido em ambiente fechado, sem a influência do vento (ISO,1990). O ensaio foi conduzido para cada combinação modelo/bocal/pressão, com 3 repetições.

3.5.1. Equipamentos, material e procedimento utilizados

O equipamento e material utilizado constou de:

- Reservatório de 1000 l
- Conjunto moto-bomba
- Registro de gaveta

- Válvula reguladora de pressão
- Transdutor de pressão, precisão 0,5%
- Mangueira de nylon p/ tomada de pressão
- Aspersor ensaiado
- Cúpula de madeira/vidro
- Coletores de alumínio ($d = 10,4 \text{ cm}$; $h = 11,8 \text{ cm}$)
- Tubo de pitot acoplado ao transdutor
- Fonte regulável de voltagem
- Proveta de 100 ml, precisão de 1 ml
- Funil
- Termômetro
- Cronômetro, precisão de 1/100 seg.

Na Figura 3 é mostrado o esquema do ensaio.

Figura 3 - Esquema do Ensaio de Distribuição Radial

onde,

- 1 - Reservatório de 1000 l
- 2 - Conjunto moto-bomba
- 3 - Registro de gaveta
- 4 - Válvula reguladora de pressão
- 5 - Transdutor de pressão, precisão 0,5%
- 6 - Mangueira de nylon p/ tomada de pressão
- 7 - Aspersor ensaiado
- 8 - Cúpula de madeira/vidro
- 9 - Drenagem da cúpula
- 10 - Coletores de alumínio (d = 10,4 cm; h = 11,8 cm)

Na Figura 4 pode-se visualizar parte da linha de coletores, o conjunto motobomba, o reservatório de nível constante, a cúpula de ensaio, a célula do transdutor e as válvulas reguladoras.

Na Figura 5 é mostrada a disposição (vista superior) dos coletores e do instrumental utilizado, onde,

- 1 - Reservatório (1000 l)
- 2 - Conjunto moto-bomba
- 3 - Transdutor de pressão
- 4 - Cúpula e aspersor
- 5 - Coletores

Os modelos a serem ensaiados foram submetidos a testes prévios para se determinar a melhor e mais eficiente configuração física de disposição dos coletores para uso nesses aspersores. Assim, verificou-se que para conseguir

Figura 4 - Vista do equipamento utilizado no ensaio radial

coletar simultaneamente os volumes de água precipitados direto do bocal e os oriundos do desvio do braço oscilante, torna-se conveniente colocar os coletores dispostos em ângulo de 17° com relação à direção perpendicular à face frontal da cúpula (ver Figura 5).

Figura 5 - Disposição dos coletores e do equipamento utilizado no ensaio

A Figura 6 mostra detalhes da cúpula utilizada,

Figura 6 - Detalhes da cúpula de vidro-madeira

onde,

- 1 - Aspersor ensaiado
- 2 - Dissipador de energia
- 3 - Direcionador de fluxo
- 4 - Drenagem da cúpula

O procedimento adotado no ensaio é descrito a seguir. O conjunto moto-bomba foi acionado, mantendo-se o registro fechado para se efetuar o zeramento do medidor de pressão. Após, o registro era aberto, sendo estabelecida a pressão de interesse através da válvula reguladora de pressão. Fechou-se o registro, colocando-se os coletores em posição de ensaio, e adicionou-se volume conhecido de água a um coletor idêntico visando a determinação da evaporação no ambiente. Abriu-se o registro e acionou-se simultaneamente o cronômetro. A pressão foi monitorada durante todo o ensaio, com regulagens quando necessário, e a temperatura ambiente

foi determinada no início, no meio e no fim do mesmo. O ensaio foi conduzido por 3600 segundos e no final, os volumes precipitados nos coletores da linha radial foram medidos e anotados em planilha adequada.

3.5.2. Processamento do dados

Os ensaios foram realizados em cada combinação modelo/bocal/pressão, com 3 repetições (3 unidades de cada aspersor). Os coletores foram dispostos radialmente em espaçamento de 0,6 m, estando o primeiro a 0,3 m do aspersor. Foram utilizados 25 coletores ao longo da linha radial, totalizando um raio de avaliação possível de 14,70 m (figura 3). Esse raio permitiu uma boa margem de segurança em relação ao alcance previsto dos aspersores (ISO, 1990). Ensaios prévios com os aspersores indicaram a disposição de coletores que propiciava a melhor coleta possível das precipitações. Entretanto, verificou-se também que o primeiro coletor, situado bem próximo ao aspersor e ao reservatório (0,3 m), recebia precipitação adicional proveniente de respingos originados na cúpula e borda do reservatório. Portanto, optou-se por desconsiderar o valor medido nesse primeiro coletor, e substituí-lo por outro representativo da tendência da curva de precipitação no trecho inicial (pontos próximos ao aspersor).

O raio de alcance dos aspersores foi especificado segundo a ABNT (1985), onde o volume mínimo que

o define deve ser correspondente a uma intensidade de precipitação de 0,25 mm/h, podendo ser obtido por interpolação.

Um programa de computação foi utilizado para realizar a simulação da distribuição de água do aspersor a partir do raio; e da distribuição de água nos diversos espaçamentos de interesse. Com isso, foi determinado o Coeficiente de Uniformidade (CUC) em cada um dos espaçamentos, utilizando-se a seguinte equação:

$$CUC = \left(1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}}\right) 100 (\%) \quad (7)$$

O perfil de precipitação determinado no ensaio foi rotacionado para a simulação de toda a malha de coletores ao redor do aspersor, composta por quadriculas de 0,6 x 0,6m. Assim foi gerada matriz de 40 x 40 (até 1600 coletores simulados), utilizada conforme o alcance dos aspersores em cada ensaio. A simulação de coletores não coincidentes com a distância radial foi feita por interpolação linear, considerando valores de pontos adjacentes (no raio). A distribuição de água ao redor do aspersor, assim obtida, foi sobreposta em cada espaçamento desejado, determinando-se a distribuição resultante entre 4 aspersores idênticos e igualmente espaçados. Com estes últimos valores, que simulam uma linha lateral operando no campo, em condições sem vento, foram calculados os CUCs (ISO, 1990).

3.6. Ensaio de velocidade de rotação

Este ensaio foi realizado para determinar a velocidade de rotação completa do aspersor, e a velocidade de rotação em cada quadrante, durante o ensaio de distribuição de água.

3.6.1. Material e procedimento utilizado

O material utilizado constou de um cronômetro digital, com precisão de 1/100 seg.

A velocidade de rotação completa foi determinada medindo-se o tempo total necessário para o aspersor percorrer um giro completo. Esta determinação foi feita em 3 repetições ao longo do tempo do ensaio de distribuição. A velocidade de rotação por quadrante foi determinada medindo-se o tempo necessário para o aspersor percorrer cada um dos quadrantes. Em cada quadrante foram feitas 3 repetições, ao longo do tempo do ensaio de distribuição.

3.6.2. Processamento dos dados

Os tempos transcorridos para uma revolução completa sofreram transformação de unidades para caracterização em unidade usual (rot/min).

Os tempos transcorridos em cada quadrante foram analisados para se verificar a uniformidade de rotação dos aspersores. Utilizou-se o critério da norma ISO (1986) para

teste de uniformidade de rotação, que permite desvios extremos de $\pm 12\%$ em relação à média das determinações. Se as variações de rotação estiverem dentro do permitido pela norma, o raio de coletores será representativo e assim poder-se-á efetuar a rotação do raio para obter a malha simulada.

3.7. Ensaio de durabilidade

Este ensaio foi realizado para verificar as mudanças nas características de operação e distribuição dos aspersores, quando operando por um tempo de 1200 horas (ABNT, 1984).

Em função de não existir registro de realização desse tipo de ensaio, foi proposta metodologia, esquema de ensaio e mecanismos de controle necessários à sua concretização, para que outros trabalhos nesta linha partam de um embasamento metodológico já melhor definido e especificado.

3.7.1. Equipamento e material utilizado

O equipamento e material utilizados foram:

- Reservatório de água
- Filtro de tela
- Conjunto moto-bomba
- Registrador contínuo de tempo de operação, precisão de 1 minuto
- Registro de gaveta

- Válvula reguladora de pressão
- Manômetro de glicerina, precisão de 0,01 Kg/cm²
- Tubulação de alimentação do sistema
- Transdutor de pressão, precisão de 0,5%
- Campânula de fibra de vidro, (d = 1,0 m; h = 0,60 m)
- Aspersor ensaiado
- Tubulação de drenagem do sistema
- Cronômetro digital, precisão de 1/100 seg.

O esquema do ensaio é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema do ensaio de durabilidade

onde,

- 1 - Reservatório de água
- 2 - Filtro de tela
- 3 - Conjunto moto-bomba
- 4 - Registrador contínuo de tempo de operação, precisão de 1 minuto
- 5 - Registro de gaveta
- 6 - Válvula reguladora de pressão
- 7 - Manômetro de glicerina, precisão de 0,01 Kg/cm²
- 8 - Tubulação de alimentação do sistema
- 9 - Transdutor de pressão, precisão de 0,5%
- 10 - Campânula de fibra de vidro, (d = 1,0 m; h = 0,6 m)
- 11 - Aspersor ensaiado
- 12 - Tubulação de drenagem do sistema

Na Figura 8 tem-se uma vista geral das 3 campânulas utilizadas no ensaio.

3.7.2. Procedimento utilizado

O ensaio foi conduzido de forma a propiciar operação dos aspersores em intervalos contínuos de 120 horas, seguidas de 24 horas de repouso, até completar 1200 horas (ABNT, 1984).

Os aspersores de cada modelo a serem ensaiados, foram aqueles com maior diâmetro de bocal pois o fluxo tende a ser mais crítico para os aspectos de desgaste. As unidades foram operadas na maior pressão efetiva de trabalho (20 mca),

Figura 8 - Vista geral das campânulas

relativa aos objetivos e interesse deste trabalho de pesquisa. Foram utilizadas 2 repetições de cada modelo de aspersor, seguindo a norma ISO 3951¹, citada por ISO (1986).

O controle contínuo do tempo de operação foi feito pela utilização de um aparelho registrador de tempo, ligado em série ao sistema elétrico de alimentação da bomba. Desta forma, qualquer falha no bombeamento, com consequente paralisação na operação, foi salientada no papel do aparelho registrador, possibilitando futura compensação. Na Figura 9, pode-se observar o aparelho registrador contínuo de tempo.

¹ ISO 3951, Sampling procedures and charts for inspection by variables for percent defective

Figura 9 - Vista do registrador de tempo

O procedimento de ensaio é descrito a seguir. Após o zeramento da leitura no medidor de pressão, o conjunto moto-bomba foi acionado, fazendo-se a regulagem e estabilização da pressão de ensaio por meio da válvula reguladora de pressão. Simultaneamente o cronômetro e o aparelho registrador foram acionados, permitindo-se a operação contínua do sistema por 120 horas, quando então era interrompida por 24 horas. O papel do registrador foi trocado a cada 24 horas, anotando-se os tempos de operação contínua e de eventuais interrupções, permitindo compensações futuras. Essa rotina foi repetida sucessivamente até serem

completadas as 1200 horas de operação, totalizando aproximadamente 2 meses de ensaio.

Após a operação por 1200 horas, os aspersores foram novamente submetidos aos seguintes ensaios: Ensaio de vazão (item 3.4), Ensaio radial de distribuição (item 3.5) e Ensaio de velocidade de rotação (item 3.6).

Na Figura 10 pode ser visualizada uma das campânulas, com 3 dos aspersores ensaiados.

Figura 10 - Vista interna da campânula

Assim, foram determinados novamente os índices de cada ensaio, visando compará-los com os índices anteriores ao ensaio de 1200 horas, e desta forma, verificar os

critérios de aceitação propostos pelo projeto de norma da ABNT.

3.7.3. Processamento dos dados

Foram comparados os resultados dos ensaios de vazão, de uniformidade de rotação e de distribuição de água realizados antes e depois das 1200 horas de operação, sendo permitidas variações conforme os critérios de aceitação do projeto de norma ABNT (1984).

Os critérios de aceitação previstos no projeto de norma são:

- 1 - A vazão à pressão nominal de ensaio não deve variar mais do que 8% da vazão determinada antes do ensaio de durabilidade;
- 2 - No ensaio de uniformidade de rotação, os desvios não devem exceder $\pm 20\%$ do tempo médio de rotação.
- 3 - Em aspersores com vazão superior a $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) não deve ser inferior àquele determinado anteriormente, menos 10%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise preliminar

Conforme já foi citado, este trabalho reflete uma proposta de realizar e estimular os estudos relacionados ao uso de baixa pressão (10 a 20 mca). Deve ficar clara a avaliação desses aspersores em pressões para as quais eles não foram projetados, apresentando assim apenas possibilidade de operação nas mesmas.

Em função dos objetivos desse trabalho e do tipo de ensaio de distribuição de água (radial) utilizado, foi necessário estabelecer critério de operação, baseado na determinação da uniformidade de rotação dos aspersores nos 4 quadrantes. Tal critério foi de permitir variações máximas de velocidade de rotação/quadrante de $\pm 12\%$ em relação à velocidade de rotação média por quadrante, para que se considerasse a velocidade de rotação como sendo uniforme (ISO, 1986). Os tempos de rotação por quadrante e os respectivos desvios em relação à média, dos aspersores ensaiados e repetições, foram anotados, calculados e analisados, tornando possível a verificação desse critério.

Analisando-se os valores de desvios, relativos ao aspersor ZA-30 da Asbrasil nos diversos bocais e repetições, verificou-se que ocorreram desvios superiores aos

12 % em grande parte das combinações bocal x pressão x repetição testadas. Portanto, este modelo apresentou grandes variações de velocidade por quadrante, quando trabalhando na faixa de pressões ensaiada, sendo considerado inadequado para os objetivos desse trabalho, conforme os critérios antes expostos. Nos modelos Biehl, A1823 da Fabrimar e 5022/91 da Naan, verificou-se que os desvios por quadrante foram menores que o máximo permitido, havendo amplitudes diferenciadas de desvios conforme marca e modelo de aspersor ensaiado. Logo, conclui-se que a rotação dos mesmos é relativamente uniforme na faixa de pressão ensaiada, e que o raio coletado no ensaio pode ser considerado como sendo representativo da distribuição de água do aspersor, conforme a metodologia adotada.

Portanto, o modelo ZA-30 foi considerado como sendo inadequado para operação nesta faixa de pressão (10 a 20 mca), devido à suas consideráveis variações de velocidade de rotação, sendo por isso afastado das análises. Os modelos Biehl, A1823 e 5022/91 foram considerados aptos para operação nesta faixa por este critério. Logo, os resultados obtidos com esses modelos e marcas de aspersores foram submetidos ao processamento de dados previstos na metodologia antes descrita.

4.2. Ensaio de Vazão

Os resultados dos ensaios de vazão dos aspersores (média de três repetições), podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de vazão

MODELO	BOCAIS (mm)	VAZÃO (m ³ /h)				
		PRESSÃO (mca)				
		10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Biehl	4 C/PINO	0,578	0,646	0,707	0,764	0,816
	4 S/PINO	0,572	0,641	0,703	0,761	0,814
A1823	3,2 X 2,4	0,597	0,669	0,735	0,796	0,853
	3,2 X 3,0	0,728	0,818	0,900	0,975	1,046
	3,2 X 3,6	0,853	0,958	1,054	1,141	1,223
5022/91	2,5 X 2,5	0,440	0,490	0,536	0,577	0,616
	3,5 X 2,5	0,660	0,738	0,809	0,874	0,935
	3,5 X 3,5	0,891	0,996	1,091	1,179	1,260

Na Tabela 5 estão relacionados os diâmetros médios medidos, áreas de fluxo médias e coeficientes de descarga médios, característicos de cada modelo ensaiado. O Cd obtido nos ensaios está de acordo com o esperado de 0,8 a 0,98 em aspersores rotativos (CHRISTIANSEN, 1942).

Os coeficientes de ajuste médio da equação de pressão em função da vazão, k e x , e os coeficientes de correlação médios r^2 respectivos são mostrados na Tabela 6. O coeficiente x que expressa a relação entre pressão e vazão é normalmente esperado com valor em torno de 0,5 (KELLER e BLIESNER, 1990). Os valores de r^2 mostram o elevado grau de correlação entre os valores de pressão e vazão. Logo, os resultados obtidos refletem a adequação dos ensaios realizados, e do instrumental utilizado.

Tabela 5 - Diâmetros, Áreas e coeficientes de descarga médios

MODELO	BOCAIS (mm)	DIAMETRO MEDIDO (mm)		ÁREA DE FLUXO (mm ²)	COEFICIENTE DE DESCARGA
		Principal	Secundário		
Biehl	4 C/PINO	3,95	-	12,254	0,93
	4 S/PINO	3,96	-	12,316	0,92
A1823	3,2 X 2,4	3,22	2,47	12,935	0,92
	3,2 X 3,0	3,25	3,08	15,729	0,93
	3,2 X 3,6	3,25	3,59	18,453	0,92
5022/91	2,5 X 2,5	2,44	2,46	9,416	0,92
	3,5 X 2,5	3,55	2,43	14,530	0,89
	3,5 X 3,5	3,55	3,52	19,629	0,90

Tabela 6 - Coeficientes de ajuste e de correlação da equação de vazão

MODELO	BOCAIS (mm)	COEFICIENTES DA EQUAÇÃO ($Q = k P^x$)		
		k	x	r ²
Biehl	4 C/PINO	0,5776	0,4989	0,9993
	4 S/PINO	0,5720	0,5093	0,9999
A1823	3,2 X 2,4	0,5966	0,5158	0,9994
	3,2 X 3,0	0,7284	0,5215	0,9997
	3,2 X 3,6	0,8534	0,5195	0,9997
5022/91	2,5 X 2,5	0,4400	0,4850	0,9991
	3,5 X 2,5	0,6601	0,5017	0,9996
	3,5 X 3,5	0,8911	0,4995	0,9987

4.3. Ensaio de distribuição

4.3.1. Perfis de precipitação médios

Os perfis médios de cada modelo, nas 5 pressões de ensaio, relativos à média de 3 repetições, são mostrados nas Tabelas 7 a 14.

Tabela 7 - Perfis médios de precipitação (ml) - Biehl - 4mm
Sem pino

DISTANCIA DO COLETOR (m)	Biehl - 4 mm SEM PINO				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NOS COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	31,3	30,3	30,8	33,0	34,3
0,9	26,3	25,0	25,3	26,5	27,0
1,5	21,3	19,7	19,8	20,0	19,7
2,1	20,7	18,7	18,2	18,2	18,5
2,7	19,3	18,0	17,5	17,3	17,5
3,3	18,5	17,0	16,8	16,2	16,8
3,9	16,0	15,3	15,8	15,3	16,3
4,5	13,0	13,3	13,8	14,3	15,0
5,1	9,7	11,0	11,7	12,8	13,8
5,7	8,3	9,3	9,8	11,2	12,8
6,3	7,8	9,0	9,5	10,7	12,0
6,9	7,7	8,2	8,8	9,5	11,0
7,5	9,3	8,8	9,3	10,0	11,2
8,1	13,8	11,0	10,2	10,0	11,0
8,7	19,8	14,2	12,5	10,8	11,5
9,3	28,2	19,5	15,7	13,2	13,8
9,9	26,7	25,2	20,8	16,7	15,7
10,5	5,0	25,0	24,0	19,7	16,3
11,1	0,0	6,7	19,8	17,7	16,5
11,7	0,0	0,0	7,0	10,2	13,7
12,3	0,0	0,0	0,3	3,0	6,7
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 8 - Perfis médios de precipitação (ml) - Biehl - 4mm
Com Pino

DISTANCIA DO COLETOR (m)	Biehl - 4 mm COM PINO				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	36,3	41,3	42,5	46,7	47,3
0,9	31,7	34,8	37,7	40,7	42,7
1,5	24,5	25,0	26,7	28,8	29,7
2,1	22,8	21,8	22,5	24,0	24,3
2,7	20,8	19,8	20,0	21,5	21,8
3,3	19,5	17,8	18,2	19,5	20,2
3,9	17,0	16,2	16,3	18,0	19,0
4,5	13,0	13,3	14,3	16,2	17,2
5,1	9,3	10,3	12,7	14,3	15,2
5,7	8,2	8,8	11,0	13,0	14,2
6,3	8,5	8,5	9,8	12,2	13,3
6,9	8,7	8,8	10,0	11,8	12,7
7,5	9,5	9,7	10,5	12,2	12,7
8,1	11,3	11,3	11,3	12,8	13,0
8,7	19,8	13,7	12,3	14,0	13,2
9,3	24,2	18,7	14,7	15,5	13,8
9,9	21,3	23,8	18,5	18,0	14,3
10,5	3,8	20,5	18,7	19,2	15,0
11,1	0,0	5,0	11,8	16,7	14,0
11,7	0,0	0,0	2,0	8,5	9,7
12,3	0,0	0,0	0,0	1,3	3,8
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 9 - Perfis de precipitação médios (ml) - A1823 - 3,2x2,4 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	A1823 - 3,2 X 2,4 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	33,7	33,7	38,3	41,2	52,7
0,9	31,7	32,7	35,3	36,8	44,0
1,5	32,3	31,7	32,3	32,5	35,3
2,1	25,3	25,3	26,0	26,3	28,7
2,7	20,0	20,2	21,7	23,0	26,0
3,3	17,3	17,7	19,0	20,2	23,7
3,9	13,8	14,8	17,3	18,7	22,0
4,5	10,0	12,0	14,7	17,3	20,7
5,1	7,8	10,7	13,5	15,7	19,5
5,7	8,5	10,8	13,5	15,7	19,3
6,3	10,7	12,5	14,8	17,0	20,0
6,9	16,7	15,8	17,0	18,2	20,7
7,5	20,0	20,8	21,0	20,8	23,3
8,1	21,3	23,7	22,7	22,7	25,0
8,7	25,5	23,8	22,3	22,3	24,3
9,3	17,3	24,0	23,7	21,8	23,5
9,9	1,2	12,8	20,3	18,2	19,5
10,5	0,0	1,2	8,7	10,2	11,3
11,1	0,0	0,0	1,2	1,7	3,3
11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 10 - Perfis de precipitação médios (ml) - A1823 -
3,2x3,0 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	A1823 - 3,2 x 3,0 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	31,0	34,0	39,7	47,0	48,5
0,9	28,8	31,2	34,8	38,3	40,2
1,5	27,7	28,3	30,0	29,5	31,8
2,1	23,2	23,8	25,2	24,7	28,3
2,7	19,0	20,0	22,3	23,0	27,5
3,3	17,2	17,8	20,2	21,7	26,7
3,9	14,5	16,0	19,2	20,7	25,7
4,5	12,7	14,3	17,5	19,3	24,5
5,1	11,3	14,0	17,2	19,0	24,3
5,7	13,0	14,8	17,8	19,8	25,2
6,3	17,0	17,2	19,3	20,3	26,2
6,9	26,0	22,2	22,5	22,2	27,3
7,5	34,0	30,0	28,0	25,8	29,7
8,1	32,7	34,5	33,0	29,7	32,7
8,7	29,5	31,0	33,5	31,5	32,8
9,3	29,2	27,8	31,0	30,8	30,7
9,9	17,0	21,7	23,0	25,5	23,8
10,5	2,0	5,0	10,2	14,5	12,5
11,1	0,5	0,3	1,5	4,8	5,3
11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 11 - Perfis de precipitação médios (ml) - A1823 - 3,2x3,6 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	A1823 - 3,2 X 3,6 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	45,2	45,3	47,2	55,2	57,3
0,9	40,7	41,7	43,7	46,7	48,7
1,5	44,5	42,0	43,2	40,8	44,7
2,1	36,5	34,7	35,8	33,5	36,5
2,7	29,7	29,2	31,8	31,0	35,2
3,3	25,7	25,7	28,7	29,7	34,8
3,9	20,8	22,8	26,3	29,0	34,7
4,5	16,7	20,0	24,7	27,8	33,3
5,1	14,2	18,5	23,5	26,5	32,7
5,7	14,3	19,7	24,3	27,3	33,7
6,3	17,2	22,3	26,5	28,8	34,7
6,9	24,5	29,0	29,7	30,3	35,8
7,5	30,3	32,7	34,7	33,0	37,3
8,1	33,0	34,0	36,8	35,3	37,8
8,7	30,7	31,0	36,7	35,5	36,7
9,3	29,3	27,3	32,8	33,5	32,7
9,9	12,0	22,5	22,5	24,0	24,5
10,5	1,0	9,8	14,2	15,0	14,5
11,1	0,0	1,2	4,3	6,2	7,7
11,7	0,0	0,0	0,0	0,7	1,7
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 12 - Perfis de precipitação médios (ml) - 5022/91 -
2,5x2,5 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	5022/91 - 2,5 X 2,5 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	0,0	39,3	36,3	33,8	34,3
0,9	0,0	29,3	28,8	24,5	25,5
1,5	0,0	20,3	21,3	18,2	19,5
2,1	0,0	17,5	19,0	16,3	18,0
2,7	0,0	15,8	17,7	16,0	18,5
3,3	0,0	14,3	17,0	15,5	18,7
3,9	0,0	13,2	16,0	15,8	18,7
4,5	0,0	12,2	15,3	15,5	18,0
5,1	0,0	11,7	15,5	15,5	18,0
5,7	0,0	11,8	16,2	16,0	18,0
6,3	0,0	10,3	15,3	15,7	17,5
6,9	0,0	8,5	12,7	13,7	15,3
7,5	0,0	8,2	11,8	12,0	12,8
8,1	0,0	10,0	11,8	11,2	11,3
8,7	0,0	10,3	13,2	11,3	12,0
9,3	0,0	5,0	8,0	9,3	10,0
9,9	0,0	0,0	0,3	1,5	3,2
10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 13 - Perfis de precipitação médios (ml) - 5022/91 -
3,5 x 2,5 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	5022/91 - 3,5 x 2,5 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	35,0	35,3	38,0	37,8	51,8
0,9	27,0	27,7	30,2	31,0	39,7
1,5	19,0	20,0	22,3	24,2	27,5
2,1	17,7	18,8	21,7	23,7	27,3
2,7	17,5	18,7	21,8	24,0	28,3
3,3	18,0	19,2	21,7	24,3	28,3
3,9	18,5	19,8	22,5	25,2	28,3
4,5	19,7	20,0	22,7	24,8	28,0
5,1	19,7	20,3	22,3	24,5	27,2
5,7	19,8	20,8	22,3	24,2	27,0
6,3	17,5	19,8	22,0	23,8	25,7
6,9	20,8	18,7	19,7	21,3	23,3
7,5	17,3	18,5	18,5	19,8	21,0
8,1	14,8	14,3	16,0	17,2	18,7
8,7	17,3	13,7	14,3	14,5	15,0
9,3	21,5	18,0	15,7	15,2	14,3
9,9	10,7	20,7	17,7	16,0	14,0
10,5	0,0	10,8	15,0	15,5	13,7
11,1	0,0	0,0	4,0	8,7	9,3
11,7	0,0	0,0	0,0	1,3	3,2
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 14 - Perfis de precipitação médios (ml) - 5022/91 -
3,5x3,5 mm

DISTANCIA DO COLETOR (m)	5022/91 - 3,5 X 3,5 mm				
	VOLUME MÉDIO PRECIPITADO NO COLETORES (ml)				
	PRESSÃO (mca)				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
0,3	35,0	38,7	44,0	46,7	55,5
0,9	26,5	28,3	31,7	34,0	39,7
1,5	17,7	18,0	19,3	21,3	23,8
2,1	15,5	16,0	17,2	18,7	20,8
2,7	15,2	15,2	15,8	17,7	20,3
3,3	14,3	14,8	16,0	17,5	20,8
3,9	13,7	14,3	16,0	17,7	21,3
4,5	15,5	14,5	15,8	18,0	22,0
5,1	16,0	15,8	17,0	18,7	23,0
5,7	15,3	16,7	18,3	20,3	24,0
6,3	11,7	15,3	18,2	20,7	24,8
6,9	14,5	14,7	17,3	20,0	24,0
7,5	23,2	19,3	19,7	20,7	24,5
8,1	37,7	26,8	24,3	24,3	26,2
8,7	67,0	41,7	32,5	29,0	30,0
9,3	48,2	62,7	44,7	38,0	35,0
9,9	14,0	51,7	52,3	44,3	40,3
10,5	1,3	17,7	37,3	41,0	38,2
11,1	0,0	1,2	10,2	22,0	24,7
11,7	0,0	0,0	0,0	2,0	5,0
12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Os perfis médios de cada modelo, nas 5 pressões de ensaio, relativos à média de 3 repetições, são mostrados nas Figuras 11 a 18.

Figura 11 - Perfis de precipitação médios do aspersor Biehl sem pino

No aspersor Biehl sem pino (Figura 11) observa-se um perfil com aplicação elevada próximo ao aspersor, decrescendo até a porção intermediária, de onde eleva-se formando depósito excessivo próximo ao final do raio, e decrescendo a partir daí. Esse tipo de perfil é citado por CHRISTIANSEN (1942), BILANSKI & KIDDER (1958) e KINCAID (1991) como sendo característico de bocais circulares trabalhando em baixas pressões.

Nesse perfil do aspersor sem pino (figura 11), verifica-se que praticamente não houve efeito da pressão até a distância de 4 m. Dos 4 aos 7,5 m ocorre maior queda da precipitação (maior declive da curva) na pressão de 10 mca, enquanto na curva de 20 mca a diminuição é menor e relativamente uniforme. Esse efeito se repete na porção seguinte do perfil, mas com maiores taxas de elevação de precipitação na pressão de 10 mca, enquanto a elevação de precipitação na pressão de 20 mca é menor e relativamente constante. No trecho final das curvas observa-se que a taxa de decréscimo é maior na pressão de 10 mca, e menor na de 20 mca. Na pressão de 10 mca observamos que o ponto de máximo acúmulo na porção final do raio é mais pronunciado, e que a diferença entre os pontos de máximo e mínimo ao longo do perfil também é maior, resultando em um perfil mais desuniforme. Com o aumento da pressão, pode-se ver que esse ponto de máxima precipitação tende a tornar-se menor, ao mesmo tempo em que é deslocado para uma distância maior do aspersor, resultando em uma tendência de uniformização da precipitação ao longo do raio. As relações verificadas coincidem com as tendências observadas por BILANSKI & KIDDER (1958) e SEGNER et alii (1992).

Na figura 12 verifica-se o efeito do pino difusor sobre o perfil de precipitação do aspersor Biehl. Vemos que o pino provoca maior acúmulo de água nas proximidades do aspersor (0 a 4 m), principalmente nas

pressões maiores, concordando com o afirmado por KOLL (1974). Na porção intermediária (4 a 8 m), praticamente não existe efeito do uso do pino. No trecho final (8 a 13 m), verifica-se a mesma tendência da curva do Biehl sem pino (figura 11), somente com diminuição nos picos de precipitação em todas as pressões.

Figura 12 - Perfis de precipitação médios do aspersor Biehl com pino

O pino provocou maior fracionamento do jato e produção de gotas menores, que caem mais próximas ao aspersor (KOLL, 1974). Esta diminuição no valor máximo foi mais acentuada na pressão de 20 mca, resultando em perfil relativamente uniforme.

No aspersor A1823 - 3,2 x 2,4 mm (Figura 13), pode-se ver que a precipitação é mais elevada próximo ao aspersor e próximo ao anel externo do raio. CARVALHO (1991) trabalhou com este aspersor (Fabrimar A1823) em diversas pressões (200, 300, 400 e 500 KPa) e verificou que ele apresenta perfil com elevada precipitação próximo ao aspersor, mas não uniforme ao longo do raio de alcance, com precipitações altas e baixas, independente da pressão.

Figura 13 - Perfis de precipitação médios do aspersor A1823 3,2x2,4 mm

O efeito da pressão sobre a precipitação é maior junto ao aspersor e vai diminuindo até a distância de 1,5 m. A partir daí esse efeito volta a se pronunciar, tornando-se

mais evidente até a distância de 5 m. Nesse trecho (1,5 a 5 m), a declividade da curva de 10 mca é maior, provocando um menor valor mínimo de precipitação. Na distância de 8,7 m, as precipitações tem praticamente o mesmo valor em todas as pressões, diminuindo a partir daí de forma diferenciada. Observa-se que o ponto de máximo acúmulo ao longo do raio é semelhante em todas as pressões, e que o ponto de precipitação mínima é menor nas pressões mais baixas. Com isso, as pressões maiores tendem a formar perfis mais uniformes.

No aspersor A1823 - 3,2 x 3,0 mm (Figura 14), verifica-se que a tendência geral da curva praticamente não sofreu alteração com o aumento do diâmetro do bocal secundário. Observa-se uma maior concentração de água a partir da distância de 2,7 m, e uma maior diferença entre os pontos de máximo e mínimo acúmulo ao longo do raio, em todas as pressões.

No aspersor A1823 - 3,2 x 3,6 mm (Figura 15), observa-se que a colocação do bocal maior no secundário provocou elevação das precipitações ao longo de todo o raio. Verifica-se também que ocorre diminuição da diferença entre os pontos de máxima e mínima precipitação ao longo do raio, em cada uma das pressões, tendendo a uma maior uniformização, principalmente na pressão mais alta (20 mca).

Conforme pode ser observado na Figura 16, o aspersor 5022/91 - 2,5 x 2,5 mm não apresentou giro quando

Figura 14 - Perfis de precipitação médios do aspersor A1823 3,2x3,0 mm

trabalhando na pressão de 10 mca. Por isso, este modelo foi ensaiado somente nas demais pressões.

No aspersor 5022/91 - 2,5 x 2,5 mm (Figura 16), observa-se um perfil com precipitações elevadas próximo ao aspersor, e decrescentes até atingir o alcance máximo. Segundo KINCAID (1991), essa forma do perfil é desejável pois conduz a melhores uniformidades.

Torna-se interessante salientar que os bocais de 2,5 mm são elípticos. A maior turbulência provocada pela passagem do jato nesse tipo de bocal, tende a originar um jato mais fragmentado, e portanto uma melhor distribuição da

Figura 15 - Perfis de precipitação médios do aspersor A1823 3,2x3,6 mm

precipitação sobre o raio, quando trabalhando em baixas pressões. BILANSKI & KIDDER (1958), DADIÃO & WALLENDER (1985) e KINCAID (1991) afirmam que o uso de bocais não circulares pode ser efetivo em baixas pressões, produzindo padrões de distribuição aceitáveis.

Na figura 16 verifica-se que existe pouca influência da pressão sobre a precipitação ao longo do raio. Somente na pressão de 12,5 mca a curva sai um pouco da tendência das demais, no trecho de 2,7 a 8,1 m.

Figura 16 - Perfis de precipitação médios do aspersor 5022/91 2,5x2,5 mm

No aspersor 5022/91 - 3,5 x 2,5 mm (Figura 17), verifica-se que a colocação do bocal circular de 3,5 mm no principal provocou elevação das precipitações ao longo do raio, em todas as pressões. Observa-se maior efeito da pressão no trecho de 1,5 a 6,9 m, principalmente nas pressões maiores (15, 17,5 e 20 mca). Nesse trecho (1,5 a 6,9), verifica-se um patamar com valores de precipitação relativamente constantes, em cada uma das pressões.

No aspersor 5022/91 - 3,5 x 3,5 mm (Figura 18), verifica-se que o uso de dois bocais circulares, nesta faixa de pressão, originou perfil muito desuniforme. Ocorrem altos

Figura 17 - Perfis de precipitação médios do aspersor 5022/91 3,5x2,5 mm

valores próximo ao aspersor, e precipitações muito elevadas próximo ao anel externo, principalmente nas pressões menores. O efeito da pressão é relativamente pequeno até a distância de 5,7 m, e a partir daí ocorre acúmulo excessivo que torna o padrão bastante desuniforme. O aumento da pressão reduz esses valores máximos de precipitação, e desloca os picos para uma distância maior no raio.

Figura 18 - Perfis de precipitação médios do aspersor 5022/91 3,5x3,5 mm

4.3.2. Raio de alcance

O raio de alcance dos aspersores nas pressões de ensaio, é mostrado na Tabela 15. Verifica-se que o raio de alcance cresce à medida em que a pressão de operação é aumentada, sendo as taxas desse crescimento variáveis conforme os modelos e as combinações de bocais.

No aspersor 5022/91 - 2,5 x 2,5 mm pode-se verificar que o aumento da pressão praticamente não alterou o raio de alcance.

Observa-se que no Biehl, a colocação do pino dispensor provocou redução no alcance em todas as pressões. Verifica-se também que o aumento do diâmetro do bocal propicia um maior raio de alcance. Observa-se o aumento considerável do raio quando o bocal elíptico do acionador é trocado pelo maior bocal circular, principalmente nas pressões maiores. Essas tendências dos resultados coincidem com as afirmações de CRHISTIANSEN (1942), BILANSKI & KIDDER (1958), JAMES (1980) e OLIVEIRA (1991).

Tabela 15 - Raio de alcance dos aspersores

MODELO	BOCAIS (mm)	RAIO DE ALCANCE (m)				
		PRESSÃO (mca)				
		10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Biehl	4 C/PINO	10,77	11,45	11,69	12,23	12,59
	4 S/PINO	10,85	11,51	12,14	12,48	12,77
A1823	3,2 X 2,4	9,87	10,45	11,03	11,07	11,32
	3,2 X 3,0	10,50	10,87	11,05	11,44	11,52
	3,2 X 3,6	10,43	11,04	11,40	11,55	11,66
5022/91	2,5 X 2,5	-	9,77	9,76	9,85	10,10
	3,5 X 2,5	10,38	10,98	11,38	11,61	11,90
	3,5 X 3,5	10,46	11,07	11,58	11,70	11,98

4.3.3. Coeficiente de uniformidade (CUC)

A partir dos valores de volumes coletados no raio de ensaio de 3 marcas, 3 bocais (2 no Biehl), 5 pressões

e 3 repetições (totalizando 117 ensaios), foram gerados os padrões de distribuição e a distribuição de água nos espaçamentos de interesse (6 x 6, 6 x 12 e 12 x 12m), conforme metodologia anteriormente descrita. O coeficiente de uniformidade de CHRISTIANSEN (CUC) foi utilizado como expressão numérica da uniformidade dos volumes de água, nos diversos espaçamentos.

Os valores de CUC foram submetidos à análise estatística, em esquema fatorial, para cada modelo e espaçamento.

A soma de quadrados, valores de F observados, médias e coeficientes de variação da análise são apresentados na Tabelas 16, 17 e 18.

Na Tabela 16 pode-se ver a análise de variância do aspersor Biehl, nos espaçamentos 6x6, 6x12 e 12x12 m. No espaçamento de 6x6 m verifica-se que existe efeito do fator Bocal(B) sobre o CUC, mostrando que os bocais diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

Também existe efeito do fator Pressão(P), isto é, pelo menos duas pressões diferem entre si a 5% de probabilidade. No espaçamento de 6x12 m observa-se que existe efeito altamente significativo (1%) dos fatores Bocal e Pressão sobre o CUC. No espaçamento de 12x12 m verifica-se que existe efeito significativo (5%) do fator Bocal e altamente significativo (1%) do fator Pressão sobre o CUC.

Verificou-se que não existe efeito significativo da interação Bocal x Pressão em nenhum dos espaçamentos.

Tabela 16 - Análise de variância do aspersor Biehl

FONTE	GL	Biehl					
		ESPAÇAMENTO (m)					
		6 x 6		6 x 12		12 x 12	
		QM	F	QM	F	QM	F
BICAL-B	1	89,44	7,44 *	174,24	11,66 **	98,65	5,30 *
PRESSÃO-P	4	45,36	3,77 *	104,08	6,97 **	415,66	22,33 **
B x P	4	8,46	0,70 ns	4,49	0,33 ns	6,42	0,35 ns
Resíduo	20	12,03		14,94		18,61	
Média		88,71		85,34		72,43	
CV (%)		3,91		4,53		5,96	

** Significativo a 1% * Significativo a 5% ns Não significativo

Na Tabela 17 tem-se a análise de variância aspersor A1823 nos espaçamentos de 6x6, 6x12 e 12x12 m. Verifica-se que só o fator Bocal apresentou efeito significativo sobre o CUC, e somente no espaçamento de 6x12m.

Na Tabela 18 pode-se ver a análise de variância do aspersor 5022/91, nos espaçamentos de 6x6, 6x12 e 12x12 m. Observa-se que a interação Bocal x Pressão apresentou efeito altamente significativo sobre o CUC, em todos os espaçamentos, mostrando que os fatores interagem quanto ao seu efeito sobre o CUC.

Analisando-se as Tabelas 16, 17 e 18, pode-se verificar que a variabilidade dos valores de CUC dos aspersores nacionais (Biehl e Fabrimar) mostrou-se bem maior do que a do aspersor importado (Naan). Os Coeficientes de

variação (CV) apresentam valores que variam de 2,59% a 7,16% para os nacionais, e de 0,75% a 2,17% para o importado.

Tabela 17 - Análise de variância do aspersor A1823

FONTE	GL	A1823					
		ESPAÇAMENTO (m)					
		6 x 6		6 x 12		12 x 12	
		QM	F	QM	F	QM	F
BOCAL-B	2	15,90	2,68 ns	50,53	3,57 *	57,54	2,02 ns
PRESSÃO-P	4	13,27	2,23 ns	31,55	2,23 ns	53,95	1,89 ns
B x P	8	1,60	0,27 ns	3,77	0,27 ns	7,06	0,25 ns
Resíduo	30	5,94		14,17		28,52	
Média		94,00		82,70		74,63	
CV (%)		2,59		4,55		7,16	

* Significativo a 5% ns Não significativo

Tabela 18 - Análise de variância do aspersor 5022/91

FONTE	GL	5022/91					
		ESPAÇAMENTO (m)					
		6 x 6		6 x 12		12 x 12	
		QM	F	QM	F	QM	F
BOCAL-B	2	330,40	706,46 **	529,54	447,94 **	2215,82	822,72 **
PRESSÃO-P	4	54,01	115,49 **	246,64	222,61 **	247,05	91,73 **
B x P	7	5,59	11,94 **	48,30	43,59 **	55,08	20,45 **
Resíduo	28	0,47		1,11		2,69	
Média		91,74		82,81		75,48	
CV (%)		0,75		1,27		2,17	

** Significativo a 1%

A comparação de médias de CUC através do teste da DMS é mostrada nas tabelas 19, 20, 21, 22 e 23.

Analisando a Tabela 19, relativa ao aspersor Biehl, verifica-se que o bocal 4 COM PINO mostrou-se

estatisticamente melhor na obtenção de CUCs mais elevados, em todos os espaçamentos. Logo o uso do pino dispersor em bocais circulares, é eficiente para a elevação do CUC.

Na Tabela 20 pode-se ver que a pressão apresentou efeito diferenciado, conforme o espaçamento estudado: nos espaçamentos 6x6 e 12x12 m, as pressões de 20, 17,5 e 15 mca foram melhores, não diferindo estatisticamente entre si; no espaçamento intermediário (6x12), as melhores pressões foram 17,5, 15,0, 20,0 e 12,5 mca. Verifica-se que as pressões mais elevadas apresentaram valores de CUC mais altos, confirmando os estudos existentes na literatura.

Analisando a Tabela 21, relativa ao aspersor A1823, verifica-se que o bocal apresentou efeito diferenciado conforme o espaçamento: nos espaçamentos 6x6 e 12x12 m não houve efeito significativo de Bocal no CUC; no espaçamento intermediário (6x12 m), os bocais 3,2x3,6 mm e 3,2x2,4 mm foram os melhores.

Tabela 19 - Comparação de médias de CUC para o aspersor Biehl, em função do espaçamento e do tipo de bocal

BOCAL (mm)	CUC (%)		
	ESPAÇAMENTO (m)		
	6 x 6	6 x 12	12 x 12
4 COM PINO	90,43 a A	87,75 a A	74,24 a A
4 SEM PINO	86,98 b A	82,93 b B	70,61 b A

Valores dentro de uma coluna, seguidos pela mesma letra, não são significativamente diferentes (letras minúsculas = 5% ; letras maiúsculas = 1%)

Tabela 20 - Comparação de médias de CUC para o aspersor Biehl, em função do espaçamento e da pressão

ESPAÇAMENTO (m)					
6 x 6		6 x 12		12 x 12	
PRESSÃO (mca)	CUC (%)	PRESSÃO (mca)	CUC (%)	PRESSÃO (mca)	CUC (%)
17,5	92,58a A	17,5	88,80a A	20,0	79,50a A
15,0	89,73ab AB	15,0	87,78a A	17,5	78,98a A
20,0	88,77abc AB	20,0	87,27a A	15,0	75,88a A
12,5	87,18 bc AB	12,5	84,37a AB	12,5	67,50 b B
10,0	85,27 c B	10,0	78,50 b B	10,0	60,27 c C

Valores dentro de uma coluna, seguidos pela mesma letra, não são significativamente diferentes (letras minúsculas = 5% ; letras maiúsculas = 1%)

Tabela 21 - Comparação de médias de CUC para o aspersor A1823, em função do espaçamento e do bocal

ESPAÇAMENTO (m)					
6 x 6		6 x 12		12 x 12	
BOCAL (mm)	CUC (%)	BOCAL (mm)	CUC (%)	BOCAL (mm)	CUC (%)
3,2 x 3,6	95,19 a A	3,2 x 3,6	83,83 a A	3,2 x 3,6	76,53 a A
3,2 x 2,4	93,42 a A	3,2 x 2,4	83,69 a A	3,2 x 3,0	74,73 a A
3,2 x 3,0	93,40 a A	3,2 x 3,0	80,58 b A	3,2 x 2,4	72,62 a A

Valores dentro de uma coluna, seguidos pela mesma letra, não são significativamente diferentes (letras minúsculas = 5% ; letras maiúsculas = 1%)

No aspersor 5022/91, em função do efeito da interação ter sido significativo, foi feito o desdobramento dessa interação. Analisando-se o efeito de Bocais dentro de cada Pressão - B(P) (Tabela 22), observamos efeito diferenciado conforme o espaçamento: nos espaçamentos 6x12 e 12x12 m, o melhor bocal foi o 2,5x2,5 mm; no espaçamento menor (6x6 m) o melhor bocal foi o 3,5x2,5 mm em todas as pressões. O pior bocal foi o 3,5x3,5 mm, em todas as pressões

e espaçamentos estudados. Verifica-se claramente o efeito significativo do bocal elíptico (2,5 mm) na melhora da distribuição de água e conseqüente elevação dos valores de CUC.

Tabela 22 - Comparação de médias de CUC para o aspersor 5022/91. Desdobramento da interação para bocais dentro de pressão B(P_i), em função do espaçamento

ESPAÇAMENTO (m)					
6 x 6		6 x 12		12 x 12	
BOCAIS (mm)	CUC (%)	BOCAIS (mm)	CUC (%)	BOCAIS (mm)	CUC (%)
B(P ₁) 3,5 x 2,5	93,00 a A	B(P ₁) 3,5 x 2,5	81,57 a A	B(P ₁) 3,5 x 2,5	77,23 a A
3,5 x 3,5	82,27 b B	3,5 x 3,5	61,67 b B	3,5 x 3,5	49,67 b B
B(P ₂) 3,5 x 2,5	93,63 a A	B(P ₂) 2,5 x 2,5	88,40 a A	B(P ₂) 2,5 x 2,5	85,03 a A
2,5 x 2,5	92,57 a A	3,5 x 2,5	84,37 b B	3,5 x 2,5	77,93 b B
3,5 x 3,5	82,57 b B	3,5 x 3,5	70,83 c C	3,5 x 3,5	53,20 c C
B(P ₃) 3,5 x 2,5	95,87 a A	B(P ₃) 2,5 x 2,5	87,93 a A	B(P ₃) 2,5 x 2,5	85,90 a A
2,5 x 2,5	94,18 b B	3,5 x 2,5	87,40 a A	3,5 x 2,5	81,63 b B
3,5 x 3,5	86,37 c C	3,5 x 3,5	78,77 b B	3,5 x 3,5	61,40 c C
B(P ₄) 3,5 x 2,5	96,50 a A	B(P ₄) 2,5 x 2,5	89,60 a A	B(P ₄) 2,5 x 2,5	85,27 a A
2,5 x 2,5	94,90 b B	3,5 x 2,5	87,33 b A	3,5 x 2,5	84,40 a A
3,5 x 3,5	89,23 c C	3,5 x 3,5	82,93 c B	3,5 x 3,5	67,93 b B
B(P ₅) 3,5 x 2,5	97,67 a A	B(P ₅) 2,5 x 2,5	91,33 a A	B(P ₅) 2,5 x 2,5	87,73 a A
2,5 x 2,5	95,63 b B	3,5 x 2,5	88,43 b B	3,5 x 2,5	86,30 a A
3,5 x 3,5	91,37 c C	3,5 x 3,5	85,23 c C	3,5 x 3,5	72,90 b B

Valores dentro de uma coluna, seguidos pela mesma letra, não são significativamente diferentes (letras minúsculas = 5% ; letras maiúsculas = 1%)

Analisando o efeito das Pressões dentro de cada Bocal - P(B) (Tabela 23), verifica-se que a pressão de 20 mca foi a melhor em todos os bocais. Nos espaçamentos maiores (6x12 e 12x12 m), os níveis de pressão dentro do bocal 2,5x2,5 mm não apresentaram efeito significativo nos valores

de CUC. A pressão de 10 mca foi a pior em todos os bocais estudados. Verifica-se de maneira bem evidente que as maiores pressões conduzem a valores mais elevados de CUC.

Tabela 23 - Comparação de médias de CUC para o aspersor 5022/91. Desdobramento da interação para pressões dentro de Bocal P(B_i), em função do espaçamento

PRESSÃO (mca)	CUC (%)		
	ESPAÇAMENTO (m)		
	6 x 6	6 x 12	12 x 12
P(B ₁) 20,0	95,63 a A	88,43 a A	86,30 a A
17,5	94,90 ab A	88,40 a A	85,90 a A
15,0	94,17 b A	87,93 a A	85,27 a A
12,5	92,57 c B	87,33 a A	85,03 a A
P(B ₂) 20,0	97,67 a A	91,93 a A	87,73 a A
17,5	96,50 b AB	89,60 b AB	84,40 b AB
15,0	95,87 b B	87,40 c B	81,63 c B
12,5	93,63 c C	84,37 d C	77,93 d C
10,0	93,00 c C	81,57 e D	77,23 d C
P(B ₃) 20,0	91,37 a A	88,53 a A	72,90 a A
17,5	89,23 b B	86,62 b B	67,93 b B
15,0	86,37 c C	84,70 c C	61,40 c C
12,5	82,57 d D	81,20 d D	53,20 d D
10,0	82,27 d D	73,00 e E	49,67 e D

Valores dentro de uma coluna, seguidos pela mesma letra, não são significativamente diferentes (letras minúsculas = 5% ; letras maiúsculas = 1%)

Nas Tabela 24, 25 e 26 são apresentados os CUCs obtidos com os aspersores, em função de bocais, pressão e espaçamentos.

Tabela 24 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), calculado em função da pressão, bocal e espaçamento entre aspersores, para o aspersor Biehl

BOCAIS (mm)	PRESSÃO (mca)	CUC (%)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
4 COM PINO	10,0	87	81	62
	12,5	88	86	69
	15,0	92	90	77
	17,5	93	91	81
	20,0	92	91	83
4 SEM PINO	10,0	84	76	58
	12,5	86	83	66
	15,0	88	86	75
	17,5	92	86	78
	20,0	85	84	76

Valores de CUC à esquerda da linha pontilhada são iguais ou superiores a 80%

Conforme pode ser observado nessas tabelas gerais, é possível a utilização dos aspersores estudados em baixa pressão, em diversos espaçamentos, considerando-se o critério usual de valores de CUC maiores ou iguais a 80%.

Torna-se interessante salientar que este valor prático utilizado como critério em projetos, muitas vezes não é transformado em índice real na operação dos sistemas a campo, uma vez que os aspectos de manejo são pouco considerados. LETEY et alii (1970) afirmam ser reconhecido que aspersores com laterais móveis apresentam valores típicos de campo menores do que 80%.

Portanto, talvez fosse interessante um maior rigor no manejo dos sistemas de baixa pressão, e o uso de coeficientes para projetos um pouco menores do que 80%, viabilizando de maneira mais ampla a sua utilização.

Tabela 25 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), calculado em função da pressão, bocal e espaçamento entre aspersores, para o aspersor A1823

BOCAL (mm)	PRESSÃO (mca)	CUC (%)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
3,2 x 2,4	10,0	91	80	71
	12,5	93	82	73
	15,0	94	84	74
	17,5	95	86	77
	20,0	95	86	78
3,2 x 3,0	10,0	91	80	73
	12,5	94	78	69
	15,0	94	80	71
	17,5	93	82	73
	20,0	95	83	76
3,2 x 3,6	10,0	94	82	73
	12,5	95	84	76
	15,0	95	84	77
	17,5	95	84	78
	20,0	96	85	80

Valores de CUC à esquerda da linha pontilhada são iguais ou superiores a 80%

Tabela 26 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), calculado em função da pressão, bocal e espaçamento entre aspersores, para o aspersor 5022/91

BOCAL (mm)	PRESSÃO (mca)	CUC (%)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
2,5* x 2,5*	10,0	-	-	-
	12,5	93	88	85
	15,0	94	88	85
	17,5	95	87	86
	20,0	96	88	86
3,5 x 2,5*	10,0	93	82	77
	12,5	94	84	78
	15,0	96	87	82
	17,5	97	90	84
	20,0	98	92	88
3,5 x 3,5	10,0	82	62	50
	12,5	83	71	53
	15,0	86	79	61
	17,5	89	83	68
	20,0	91	85	73

Valores de CUC à esquerda da linha pontilhada são iguais ou superiores a 80%

* Bocal elíptico

Os valores de Intensidade de Precipitação (mm/h) dos aspersores em função da pressão e dos espaçamentos, podem ser visualizados no Apêndice 2, Tabelas 34, 35 e 36.

4.3.4. Velocidade de rotação dos aspersores

Os valores de Velocidade de Rotação (RPM) dos aspersores são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Velocidade de Rotação (RPM) dos aspersores, em função da pressão e do bocal

MODELO	BOCAL (mm)	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)				
		PRESSÃO (mca)				
		10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Biehl	4 COM PINO	8,8	9,0	8,9	8,9	9,0
	4 SEM PINO	8,5	9,0	9,2	9,0	9,1
A1823	3,2 x 2,4	2,6	3,0	3,3	3,5	3,7
	3,2 x 3,0	2,3	2,6	2,3	2,4	2,6
	3,2 x 3,6	2,8	3,2	3,2	3,4	3,4
5022/91	2,5* x 2,5*	-	0,2	0,5	0,7	0,8
	3,5 x 2,5*	3,4	3,8	4,3	4,9	5,1
	3,5 x 3,5	3,3	3,5	4,0	4,0	4,3

* Bocal elíptico

Conforme pode-se observar na Tabela 27, os aspersores A1823 e 5022/91 são de revolução lenta, segundo a classificação de CHRISTIANSEN (1942), enquanto o aspersor Biehl é de revolução rápida.

Verifica-se que o efeito da pressão sobre a velocidade de rotação mostra-se diferenciado conforme o modelo, bocais e até a faixa de pressão analisada.

Pode-se observar que a colocação do pino dispersor no aspersor Biehl afetou muito pouco a velocidade de rotação.

Verifica-se com muita clareza a influência da troca do bocal elíptico no acionador, pelo bocal circular maior, tornando a velocidade de rotação do aspersor bem mais rápida. KINCAID (1991) afirma que bocais difusores colocados no acionador modificam e podem até prejudicar o acionamento do aspersor.

4.4. Ensaio de durabilidade

Segundo o primeiro critério de ABNT (1984), a vazão na pressão de ensaio não deve variar mais do que 8%. Os valores de vazão determinados antes e depois do ensaio de 1200 hs de operação podem ser vistos na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de vazão

MODELO	REPETIÇÃO	PERÍODO	VAZÃO (m ³ /h)	DESVIOS (%)
Biehl	1	Antes	0,8140	0,14
		Depois	0,8151	
	3	Antes	0,8110	1,03
		Depois	0,8194	
A1823	2	Antes	1,2320	-1,19
		Depois	1,2173	
	3	Antes	1,2350	-1,43
		Depois	1,2173	
5022/91	2	Antes	1,2631	-0,93
		Depois	1,2513	
	3	Antes	1,2785	1,80
		Depois	1,3018	

Analisando-se a Tabela 28, vemos que os desvios de vazão podem ser considerados como sendo muito pequenos, estando bem abaixo do máximo de 8% permitido pela norma, em todos os ensaios. Alguns desvios foram negativos, sendo explicável pelas pequenas variações que podem ocorrer devido ao instrumental utilizado.

O segundo critério estabelece que os desvios dos tempos por quadrante, em relação à média de todos os

quadrantes não deve exceder $\pm 20 \%$, no ensaio de uniformidade de rotação.

Nas Tabelas 29, 30 e 31 são mostrados os valores de tempos de rotação e os desvios em cada quadrante, com 2 repetições por aspersor e 3 repetições por quadrante, dos aspersores Biehl, A1832 e 5022/91.

Tabela 29 - Tempos de rotação/quadrante e desvios do aspersor Biehl

QUADRANTE	Biehl							
	TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIO (%)		TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIO (%)	
	REPETIÇÃO 1				REPETIÇÃO 3			
	Repetição por Quadrante				Repetição por Quadrante			
PRIMEIRO	0,0338	0,0340	0,27	0,87	0,0426	0,0420	2,20	0,76
		0,0338		0,27		0,0424		1,72
SEGUNDO	0,0336	0,0338	-0,32	0,27	0,0422	0,0425	1,24	1,96
		0,0335		-0,62		0,0418		0,28
TERCEIRO	0,0337	0,0336	-0,02	-0,32	0,0405	0,0408	-2,84	-2,12
		0,0334		-0,91		0,0417		0,04
QUARTO	0,0338	0,0337	0,27	-0,02	0,0409	0,0412	-1,88	-1,16
		0,0338		0,27		0,0416		-0,20
TEMPO MÉDIO* (minuto)	0,0337				0,0417			

* Média geral dos 4 quadrantes e 3 repetições

Na Tabela 29 pode-se ver que o aspersor Biehl apresentou desvio máximo de $-0,91\%$ na repetição 1 e de $-2,84\%$ na repetição 3. Na Tabela 30 verifica-se que o aspersor A1823 apresentou desvio máximo de $-5,75\%$ na repetição 2 e de $-16,69\%$ na repetição 3. Na Tabela 31 observa-se que o aspersor 5022/91 apresentou desvio máximo de $-2,00\%$ na repetição 2 e de $-2,02\%$ na repetição 3.

Tabela 30 - Tempos de rotação/quadrante e desvios, do aspersor A1823

QUADRANTE	A1823							
	TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIDO (%)		TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIDO (%)	
	REPETIÇÃO 2				REPETIÇÃO 3			
	Repetição por Quadrante				Repetição por Quadrante			
PRIMEIRO	0,1192	0,1167	3,00	1,83	0,1422	0,1518	-1,03	5,65
		0,1165		1,66		0,1513		5,30
SEGUNDO	0,1170	0,1170	3,58	2,09	0,1438	0,1273	0,08	-11,40
		0,1158		1,05		0,1375		-4,30
TERCEIRO	0,1167	0,1092	1,83	-4,71	0,1545	0,1197	7,53	-16,69
		0,1080		-5,76		0,1252		-12,86
QUARTO	0,1080	0,1142	-5,76	-0,35	0,1482	0,1577	3,14	9,76
		0,1152		0,52		0,1650		14,84
TEMPO MÉDIO* (minuto)	0,1146				0,1437			

* Média geral dos 4 quadrantes e 3 repetições

Tabela 31 - Tempos de rotação/quadrante e desvios, do aspersor 5022/91

QUADRANTE	5022/91							
	TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIO (%)		TEMPO DE ROTAÇÃO (minuto)		DESVIO (%)	
	REPETIÇÃO 2				REPETIÇÃO 3			
	Repetição por Quadrante				Repetição por Quadrante			
PRIMEIRO	0,0533	0,0518 0,0525	0,84	-2,00 -0,68	0,0677	0,0697 0,0693	-1,29	1,63 1,04
SEGUNDO	0,0533	0,0532 0,0535	0,84	0,65 1,21	0,0687	0,0682 0,0698	0,17	-0,56 1,77
TERCEIRO	0,0528	0,0523 0,0528	-0,11	-1,06 -0,11	0,0693	0,0683 0,0680	1,04	-0,41 -0,85
QUARTO	0,0528	0,0530 0,0530	-0,11	0,27 0,27	0,0672	0,0675 0,0693	-2,02	-1,58 1,04
TEMPO MÉDIO* (minuto)	0,0529				0,0686			

* Média geral dos 4 quadrantes e 3 repetições

Portanto, pode-se concluir que os aspersores estudados apresentaram desvios máximos de velocidade de rotação/quadrante que ficaram sempre abaixo do máximo permitido pela norma ABNT (1984).

O terceiro critério de norma estabelece a comparação dos CUCs antes e depois das 1200 hs de operação, permitindo variação máxima de -10% no valor do CUC.

Na Tabela 32 pode-se verificar os valores de CUC obtidos antes e depois do ensaio de 1200 horas, em 3 espaçamentos, e os respectivos desvios.

Tabela 32 - Valores de CUC e desvios, antes e depois das 1200 horas

		CUC (%)					
		Biehl		A1823		5022/91	
		Repetição 1	Repetição 3	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 2	Repetição 3
6 x 6	ANTES	94,2	82,5	95,7	95,1	91,2	91,9
	DEPOIS	92,4	90,7	94,8	93,9	94,1	90,0
	DESVIO(%)	-1,91	9,94	-0,94	-1,26	3,18	-2,07
6 x 12	ANTES	92,2	80,2	84,9	84,8	85,1	85,2
	DEPOIS	90,2	87,9	83,5	86,8	85,0	80,4
	DESVIO(%)	-2,17	9,60	-1,65	2,36	-0,12	-5,63
12 x 12	ANTES	84,1	72,8	78,6	77,2	72,7	73,2
	DEPOIS	85,5	80,0	77,1	78,2	76,9	69,9
	DESVIO(%)	1,66	9,89	-1,91	1,30	5,78	-4,51

Analisando a Tabela 32 verifica-se que os desvios de CUC para os diversos aspersores, em todos os espaçamentos estudados, manteve-se abaixo do valor máximo permitido pela norma.

A conclusão do ensaio de durabilidade, a respeito dos aspersores ensaiados, é de que eles não tem suas características de operação e distribuição substancialmente alteradas, quando operando por um tempo de 1200 horas na pressão de 20 mca, segundo os critérios de aprovação estabelecidos pela norma ABNT (1984).

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que:

O aspersor ZA-30 não opera adequadamente na faixa de pressão estudada (10 a 20 mca), com os bocais de 2,8; 3,2 e 3,8 mm, devido a grandes variações verificadas na sua velocidade de rotação por quadrante.

Os aspersores Biehl, A1823 (Fabrimar) e 5022/91 (Naan) podem ser utilizados na faixa de pressão do estudo, em projetos tecnicamente elaborados e manejados.

O uso do pino dispersor em bocal circular mostrou-se eficiente na elevação significativa dos valores de CUC, na faixa de pressão estudada.

O uso do bocal elíptico mostrou-se eficiente na elevação significativa dos valores de CUC, na faixa de pressão desse estudo.

As pressões maiores proporcionaram valores mais elevados de CUC.

Pode-se operar pequenos sistemas de irrigação por aspersão em baixa pressão (10 a 20 mca) obtendo-se uniformidades aceitáveis, viabilizando desta forma a irrigação com sistemas de baixo custo e economia de energia.

Os aspersores Biehl, A1823 (Fabrimar) e 5022/91 (Naan) não apresentam alteração importante nas suas características de operação e de distribuição, após operação por 1200 horas na pressão de 20 mca, segundo os critérios estabelecidos pela ABNT.

6. RECOMENDAÇÕES

Em função da realização desse trabalho e dos resultados obtidos, recomenda-se que:

Sejam incrementadas as pesquisas voltadas às tecnologias de baixo custo que utilizem a baixa pressão ou outras formas de viabilização, visando tornar possível o uso da irrigação aos produtores de menor renda.

Seja estabelecida pela ABNT uma norma para o ensaio de durabilidade, sugerindo-se a elevação do tempo de operação para 1500 horas.

Sejam realizados ensaios de durabilidade nos equipamentos nacionais, visando verificar a sua qualidade e assim contribuir para o aprimoramento dos processos de fabricação e de colocação dos produtos no mercado de irrigação. Sugere-se a verificação do efeito do uso de água com diferentes graus e tipos de impureza, sobre o desgaste do equipamento.

Sejam conduzidos estudos específicos sobre o ensaio radial de distribuição, visando determinar o formato

interno e o tamanho mais adequado para a cúpula de vidro-
madeira, quando trabalhando com aspersores pequenos, médios
ou canhões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFRED, S. & GRAY, C.E. **Sprinkler irrigation handbook.**

3 ed., Glendora, 1952. 40p.

ALLEN, R.G. & BROCKWAY, C.E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, 110(2): 99-106, June 1984.

ARRUDA, N.T. Análise de uniformidade da distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão em linha. Viçosa, 1991. 80p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedure for sprinkler testing and performance reporting; ASAE S398.1. In: HAHN, R.H. & ROSENTERTER, E.E. ed. **ASAE standards**. 34.ed. St. Joseph, ASAE, 1987. p.515-21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aspersores para irrigação - especificação**; Projeto 12:02.08-006. Rio de Janeiro, 1984. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aspersores para irrigação - avaliação de características operacionais;** NBR-9888. Rio de Janeiro, 1985. 9p.

BATTY, J.C.; HAMAD, S.N.; KELLER, J. Energy inputs to irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, 101 (IR4): 293-307, Dec. 1975.

BENAMI, A. & HORE, F.R. A new irrigation-sprinkler distribution coefficient. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 7(2): 157-8, 1964.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa, UFV Impr. Univ., 1989. 596p.

BERNUTH, R.D. von & GILLEY, J.R. Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 27(5): 1435-41, 1984.

BILANSKI, W.K. & KIDDER, E.H. Factors that affect the distribution of water from a medium-pressure rotary irrigation sprinkler. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 1(1): 19-28, 1958.

BRANSHEID, V.D. & HART, W.E. Predicting field distributions of sprinkler systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 11(6): 801-3, 808, 1968.

CARVALHO, J.A. Tamanho de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão. Viçosa, 1991. 73p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

CHEN, D. & WALLENDER, W.W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 27(3): 737-43, 1984.

CHRISTIANSEN, J. E. *Irrigation by sprinkling*. Berkeley, University of California, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

CHRISTIANSEN, J.E. Discussion of "Nonuniformity and sprinkler application efficiency" of David T. Howell. *Journal of the Irrigation and Drainage ASCE*, Ann Arbor, 91(1): 224-6, 1965.

CHU, S.T.; ALLRED, E.R. An analytic approach to determine irrigation sprinkler spacing. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 11(4): 540-5, 1968.

COELHO, R.D. Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas. Piracicaba, 1990. 141p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

COELHO, R.D.; BOTREL, T.A.; OLITTA, A.F.L. Ensaio de uniformidade de aplicação de água de aspersores, com disposição radial de coletores na área. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, Santa Maria, 1992. *Anais*. Santa Maria, SBEA, 1992. v.2b, p. 901-13.

COLOMBO, A.; MARTUCCI FILHO, G.; SCALOPPI, E.J. Espaçamento entre os coletores em estudos de distribuição de água de aspersores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 18, Rio de Janeiro, 1983. *Anais*. Rio de Janeiro, SBEA, 1983. v.1, p.221-6.

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. *Methods for evaluating irrigation systems*. Washington, USDA/Soil Conservation Service, 1956. 24p. (USDA. Agricultural Handbook , 82).

CULVER, R. & SINKER, R.F. Rapid assesment of sprinkler performance. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASAE*, An Arbor, 92(1): 1-17, 1966.

- DADIÃO, C. & WALLENDER, W.W. Droplet size distribution and water application with low pressure sprinklers. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 28(2): 511-6, 1985.
- DAVIS, J.R. Measuring water distribution from sprinklers. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 9(1): 94-7, 1966.
- GARCIA, D.J.L. Riego por aspersion. In: CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA DE REGADIO, 2., Brasília, 1986. Brasília, Programa Nacional de Regadio del Brasil, 1986. 168p.
- GILLEY, J.R. Energy utilization and management in irrigation. In: HILLEL, D., ed. *Advances in irrigation*. Orlando, Academic Press, 1983. v.2, p.31-59.
- GILLEY, J.R. & WATTS, D.G. Possible energy savings in irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, An Arbor, 103(IR4): 445-57, 1977.
- GOHRING, T.R. & WALLENDER, W.W. Economics of sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 30(4): 1083-9, 1987.
- GRIFFIN, S.G. Computer programming solid set systems. St. Joseph, ASAE, 1978. (ASAE Paper, 78-2012).

GUIA RURAL ESPECIAL, Água, São Paulo, fev., 1991. 170p.

HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 42(7): 354-5, 1961.

HEERMAN, D.F. Fluid Dynamics of sprinkler systems. In: JENSEN, M.E., ed. *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, ASAE, 1983. p.583-618. (ASAE Monograph, 3).

HILLS, D. J. & GU Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. *Transactions of the ASE*, St. Joseph, 32(2): 471-6, 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Capacitação da indústria nacional de equipamentos para irrigação. São Paulo, IPT, 1987. (IPT. Relatório, 25307).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Análise dos custos de irrigação em terras altas e seus reflexos sociais, relatório final. São Paulo, IPT, 1989.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Irrigation equipment-rotating sprinklers part 1: design and operational requirements; ISO 7749/1. Geneve, 1986. 7p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Irrigation equipment-rotating sprinklers - part 2: distribution uniformity - test methods; ISO 7749/2. Geneve, 1990. 5p.

JAMES, L.G. Principles of farm irrigation systems design. New York, John Willey, 1988. 543p.

KARMELI, D.; PERI, G.; TODES, M. A model for sprinkler nozzle replacement. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(5): 1284-9, 1982.

KAY, M. Sprinkler irrigation, equipment and practice. London, ELBS. 1983. 120p.

KELLER, J. & BLIESNER, R.D. Sprinkler and trickle irrigation. New York, An Avi Book, 1990. 652p.

KERR, G.L.; POCHOP, L.O.; BORRELLI, J.; ANDERSON, D.A. Distribution patterns of home lawn sprinkler. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 23(2): 387-92, 1980.

KINCAID, D.C. Sprinkler pattern radius. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(6): 1668-72, 1982.

- KINCAID, D.C. Impact sprinkler pattern modification. X
Transactions of the ASAE, St. Joseph, 34(6): 2397-402,
1991.
- KOLL, R.A. Drogh size distribution from medium-size
agricultural sprinklers. Transactions of the ASAE, St.
Joseph, 17(4): 690-3, 1974.
- LEME, E.J.A. Uso da equação de Korstiaikov para seleção e
adequação da intensidade de precipitação de aspersores.
ITEM, Brasília, 31; 37-40, 1987.
- LETEY, J. Irrigation uniformity as related to optimum
crop production-additional research is needed.
Irrigation Science, Ann Arbor, 6: 253-63, 1985.
- LETEY, J.; DINAR, A.; WOODRING, C.; OSTER, J.D. An
economic analysis of irrigation systems. Irrigation
Science, Ann Arbor, 11: 37-43, 1990.
- MAREK, T.H.; SCHENEIDER, A.D.; BRAKER, S.M.; POPHAN, T.N. ✓
Accuracy of three sprinklers collectors. Transactions of
the ASAE, St. Joseph, 28(4): 119-95, 1985.

MARQUETTI, D.; REIS, A.E.G.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Alguns aspectos técnicos e alternativos da irrigação por aspersão. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. **Anais**. Brasília, ABID, 1986. v.2, p.535-44.

MATSURA, E.E. Eficiência de irrigação e uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão. Piracicaba, 1987. 124p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

MERRINGTON, A.C. & RICHARDSON, E.G. The breakup of liquid jets. *Proc. Phy. Soc.*, London, 59(2): 1-13, 1947.

NATIONAL RAIND BIRD SALES & ENGINEERING CORPORATION. **Rain bird**; catalog 16. Azusa, s.d. 20p.

NAVARRO, R.; DOMINGUEZ, M.; SANTANA, R.; ALEMAN, C. Determinacion de la vida util del aspersor de produccion nacional Mar-90z. **Ciencias del Suelo, Riego y Mecanización**, Habana, 1(2/3): 29-37, 1991.

OLITTA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo, ESALQ, 1986. 267p.

OLIVEIRA, R.A. Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo. Viçosa, 1991. 103p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

PAIR, C.H. Water distribution under sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 11(5): 648-51, 1968.

PEROLD, R.P. Economic pipe sizing for gravity sprinkler systems. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, 100(IR2): 107-16, 1974.

RIBEIRO, J.M. Avaliação do sistema da irrigação por aspersão através de modelo linear. Fortaleza, 1982. 89p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).

ROUSE, H.; HOWE, J.E.; METZLER, D.E. Experimental investigation of fire monitors and nozzles. *Am. Soc. Civil Eng.*, New York, 117: 1147-88, 1952.

SAAD, A.M.; ALBINO, J.A.S.; COLOMBO, A. Irrigação: porque avaliar o desempenho dos equipamentos. *ITEM*, Brasília, 32: 32-4, 1988.

SCALOPPI, E.J. Potencial para redução do consumo energético para irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. **Anais.** Brasília, 1986. v.3, p.835-52.

SCALOPPI, E.J. Normalização e desenvolvimento tecnológico em irrigação e drenagem. **ITEM**, Brasília, 28: 19-21, 1987.

SEGINER, I. Spatial water distribution in sprinkle irrigation. In: HILLEL, D., ed. **Advances in irrigation.** Orlando, Academic Press, 1987. v.4., p.119-68.

SEGINER, I.; NIR, D.; BERNUTH, R.D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 117(2): 286-306, 1991.

SEGINER, I.; KANTZ, D.; NIR, D.; BERNUTH, R.D. von. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 35(2): 523-33, 1992.

SANTOS, C. R. & SOARES, J. M. Avaliação técnica do sistema de irrigação por aspersão do perímetro irrigado senador Nilo Coelho. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9, Natal, 1991. **Anais.** Fortaleza, ABID, 1992. v.1, p. 305-31.

SOARES, A.A.; WILLARDSON, L.S.; KELLER, J. Surface-slope effects on sprinkler uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 117(6): 870-9, 1991.

SOLOMON, K. Variability os sprinkler coefficient of uniformity test results. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 22(5): 1078-80, 1086, 1979.

SOLOMON, K. Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrigation Science*, Ann Arbor, 5:161-72, 1984.

SOLOMON, K.; BEZDEK, J.C. Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 23(4): 899-906, 1980.

WALLACH, R. Effective irrigation uniformity as related to root zone deph. *Irrigation Science*, Ann Arbor, 11:15-21, 1990.

WHITTERS, B. & VIPOND, S. *Projeto e prática*. São Paulo, EPU, 1977. 339p.

WILCOX, J. C. & SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. *Scientific Agriculture*, Ottawa, 27(11):563-83, 1947.

WILCOX, J.C. & McDOUGLAS, J.M. Water distribution patterns from rotary sprinklers. *Canadian Journal of Agricultural Science*, Ottawa, 35(2): 217-28, 1955.

APÊNDICE 1

Tabela 33

Tabela 33 - Dados técnicos de catálogo (dos fabricantes),
disponíveis no mercado

MARCA/MODELO	BOCAIS (mm)	PRESSÃO (ATM)	VAZÃO (m ³ /h)	DIAM. DE COBERTURA(m)
ASBRASIL ZA-30	2,8	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-
	3,2	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-
	3,8	1,0	0,520	20,0
		1,5	0,630	21,2
		2,0	0,730	22,6
BIEHL	4,0	1,0	-	-
		1,5	0,640	22,0
		2,0	-	-
FABRIMAR A1823	3,2 x 2,4	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-
	3,2 x 3,0	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-
	3,2 x 3,6	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-
NAAN 5022/91	2,5 x 2,5	1,0	-	-
		1,5	0,540	20,0
		2,0	0,630	20,5
	3,5 x 2,5	1,0	-	-
		1,5	0,820	21,5
		2,0	0,940	22,0
	3,5 x 3,5	1,0	-	-
		1,5	-	-
		2,0	-	-

APÊNDICE 2

Tabelas 34, 35 e 36

Tabela 34 - Intensidade de Precipitação (mm/h), calculada em função da pressão, bocal e do espaçamento entre aspersores, para o aspersor Biehl.

BOCAIS (mm)	PRESSÃO (mca)	INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (mm/h)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
4 COM PINO	10,0	16,06	8,02	4,01
	12,5	17,93	8,97	4,48
	15,0	19,64	9,82	4,91
	17,5	21,21	10,61	5,30
	20,0	22,68	11,34	5,67
4 SEM PINO	10,0	15,89	7,94	3,97
	12,5	17,80	8,90	4,45
	15,0	19,53	9,77	4,88
	17,5	21,13	10,57	5,28
	20,0	22,62	11,31	5,65

Tabela 35 - Intensidade de Precipitação (mm/h), calculada em função da Pressão, Bocal e do espaçamento entre aspersores, para o aspersor A1823

BOCAL (mm)	PRESSÃO (mca)	INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (mm/h)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
3,2 x 2,4	10,0	16,57	8,29	4,14
	12,5	18,59	9,30	4,65
	15,0	20,43	10,21	5,11
	17,5	22,12	11,06	5,53
	20,0	23,69	11,85	5,92
3,2 x 3,0	10,0	20,23	10,12	5,06
	12,5	22,73	11,37	5,68
	15,0	25,00	12,50	6,25
	17,5	27,09	13,54	6,77
	20,0	29,04	14,52	7,26
3,2 x 3,6	10,0	23,71	11,85	5,93
	12,5	26,62	13,31	6,65
	15,0	29,26	14,63	7,32
	17,5	31,71	15,85	7,93
	20,0	33,98	16,99	8,50

Tabela 36 - Intensidade de Precipitação (mm/h), calculada em função da Pressão, Bocal e do espaçamento entre aspersores, para o aspersor 5022/91

BOCAL (mm)	PRESSÃO (mca)	INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (mm/h)		
		ESPAÇAMENTO (m)		
		6 x 6	6 x 12	12 x 12
2,5* x 2,5*	10,0	-	-	-
	12,5	13,62	6,81	3,40
	15,0	14,88	7,44	3,72
	17,5	16,03	8,02	4,01
	20,0	17,11	8,55	4,28
3,5 x 2,5*	10,0	18,34	9,17	4,58
	12,5	20,51	10,25	5,13
	15,0	22,47	11,24	5,62
	17,5	24,28	12,14	6,07
	20,0	25,96	12,98	6,49
3,5 x 3,5	10,0	24,75	12,38	6,19
	12,5	27,67	13,83	6,92
	15,0	30,31	15,15	7,58
	17,5	32,74	16,37	8,18
	20,0	34,99	17,50	8,75

* Bocal elíptico