

**TADAYUKI YANAGI JUNIOR**

**DIMENSIONAMENTO E PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM  
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSORES AUTOPROPELIDOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

**Orientador**

Prof. ELI FERREIRA

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
1995**

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA SEÇÃO DE CATALOGAÇÃO E  
CLASSIFICAÇÃO DA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFLA

Yanagi Junior, Tadayuki

Dimensionamento e predição da distribuição de á  
gua em sistemas de irrigação por aspersores auto-  
propelidos / Tadayuki Yanagi Júnior.--Lavras :  
UFLA, 1995.

79 p. : il.

Orientador: Eli Ferreira

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Aspersor autopropelido - Distribuição de á-  
gua - Dimensionamento. 2. Simulação. 3. Modelo ma-  
temático. 4. Irrigação por aspersão. I. Universi-  
dade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.7

# TADAYUKI YANAGI JUNIOR

## DIMENSIONAMENTO E PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSORES AUTOPROPELIDOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 21 de agosto de 1995



Prof. Alberto Colombo



Prof. Edmar José Scaloppi



Prof. Manoel Alves de Faria



Prof. Eli Ferreira  
(Orientador)

**A Deus**

**Aos meus pais, Tadayuki (in memorian) e Conceição**

**Aos meus tios, Antônio e Maria José**

**Aos meus primos, Carlos e Cintia**

**DEDICO**

**Aos professores e amigos**

**Alberto Colombo**

**Eli Ferreira**

**OFEREÇO**

## **AGRADECIMENTOS**

O autor expressa seus agradecimentos:

À Universidade Federal de Lavras;

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado;

Ao professor Dr. Eli Ferreira pela orientação valiosa durante todo o Curso;

Ao professor MS. Alberto Colombo, pelos ensinamentos e coorientação deste trabalho;

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia da UFLA;

Aos colegas José Antônio Alves Dias, João Carlos Guimarães e Osvaldo José de Oliveira pelo convívio, apoio e especialmente pela amizade;

Aos demais colegas do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, pela amizade, companheirismo e troca de idéias.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
RESUMO .....	xi
SUMMARY .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Hidráulica do sistema .....	3
2.1.1 Bombas centrífugas .....	3
2.1.2 Perda de carga nas linhas de sucção, recalque e linha com hidrantes .....	4
2.1.3 Perda de carga na mangueira .....	6
2.1.4 Perda de carga no carro .....	8
2.2 Modelos de simulação da distribuição de água na faixa irrigada .....	9
2.2.1 Velocidade de deslocamento .....	12
2.2.2 Algoritmo de grupamento “K-means” .....	15
2.3 Uniformidade de distribuição .....	16
3 METODOLOGIA .....	18
3.1 Modelo matemático .....	18
3.2 Critérios adotados para o dimensionamento .....	18
3.2.1 Equações características do aspersor .....	18
3.2.2 Ajuste dos perfis adimensionais do aspersor .....	20
3.2.3 Equações da bomba .....	22
3.2.3.1 Altura manométrica em função da vazão .....	23
3.2.3.2 Rendimento em função da vazão .....	24
3.2.3.3 $NPSH_{requerido}$ em função da vazão .....	26
3.2.4 Determinação da vazão requerida .....	28
3.2.5 Seleção do aspersor e suas características operacionais .....	29

	Página
3.2.6 Largura das faixas irrigadas .....	29
3.2.7 Comprimento efetivo das faixas .....	30
3.2.8 Dimensões da área efetivamente irrigada .....	32
3.2.9 Características operacionais do aspersor .....	33
3.2.10 Manejo do sistema .....	34
3.3 Pressão requerida no hidrante .....	36
3.4 Dimensionamento das linhas de sucção, recalque e principal .....	36
3.5 Moto-bomba .....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
5 CONCLUSÕES .....	54
6 SUGESTÕES PARA O APERFEIÇOAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
APÊNDICE .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
2.1	Constantes de ajuste a e b, usados no cálculo do diâmetro interno da mangueira usada no autopropelido em função da carga hidráulica .....	7
2.2	Diâmetros internos médios e rugosidades absolutas médias, segundo Zaggo et al. (1988) .....	8
3.1	Valores da RMS para o número de grupos indicados .....	21
3.2	Associação dos grupos com as pressões de serviço e diâmetros dos bocais .....	22
3.3	Perfis adimensionais (Lâmina adimensional em função da distância adimensional) gerados pelo algoritmo de agrupamento “K-means” .....	22
3.4	Largura máxima das faixas, em função do tipo de bocal do aspersor e das condições de vento .....	30
3.5	Valores dos termos usados nas equações necessárias ao cálculo da velocidade de deslocamento do autopropelido, que são apresentadas no item 2.3 .....	35
3.6	Acréscimo na potência instalada, em função da potência absorvida pela bomba	38
4.1	Resultados parciais do exemplo de aplicação .....	43
4.2	Resultados parciais do exemplo de aplicação .....	43
4.3	Resultados parciais do exemplo de aplicação .....	44
4.4	Resultados parciais do exemplo de aplicação .....	45
4.5	Coefficientes de Uniformidade de Christiansen para várias características operacionais .....	46



## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Esquema do processo de cálculo adotado no modelo de simulação da distribuição de água proposto por Rolland (1982) .....	11
3.1	Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de Pressão em função da vazão e Raio de alcance do aspersor em função da pressão, sendo que $Y_1$ , $Y_2$ e $Y_3$ podem ser a pressão de serviço ou raio de alcance do aspersor, e $X_1$ , $X_2$ e $X_3$ podem ser a vazão ou a pressão de serviço do aspersor .....	19
3.2	Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva da bomba para que se possa fazer o ajuste cúbico aos dados .....	23
3.3	Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de rendimento da bomba para que se possa fazer o ajuste cúbico aos dados .....	25
3.4	Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de NPSH requerido pela bomba para que se possa fazer o ajuste quadrático aos dados .....	27
3.5	Vista superior de duas faixas adjacentes, ilustrando o acréscimo do comprimento na extremidade inicial da faixa irrigada .....	31
3.6	Vista superior de duas faixas adjacentes, ilustrando o acréscimo do comprimento na extremidade final da faixa irrigada .....	32
4.1	Croqui da área irrigada pelo projeto .....	47
4.2	Coefficientes de Uniformidade de Christiansen para os melhores projetos conseguidos através e 56 simulações .....	51
4.3	Variações da pressão, velocidade e lâmina bruta aplicada em função da variação da vazão, e variação do raio de alcance do jato em função da pressão de serviço do aspersor para o autopropelido "Chuvisco" da ASBRASIL, equipado com o aspersor MEC-21 .....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo formado entre o ponto de interseção do alcance de aspersores operando em faixas adjacentes e a linha perpendicular traçada no ponto final do percurso (graus);
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta do conduto (m);
$\gamma$	Peso específico da água ( $\text{kgf/m}^3$ );
$\lambda$	Lâmina resultante de passagem do aspersor (mm);
$\mu$	Evapotranspiração potencial da cultura no período de maior demanda (mm);
$\eta$	Rendimento (%);
$\pi$	Número, cujo valor é 3.1415927;
$\theta$	Ângulo de operação do aspersor (graus);
$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$	Rendimentos da bomba retirados da curva apresentada pelo fabricante, espaçadas de $\Delta Q$ da origem (%);
$\eta_b$	Rendimento da bomba (fração);
$\Delta H_{ah}$	Perda de carga total do aspersor ao hidrante (mca);
$\Delta H_h$	Perda de carga na linha de hidrantes (mca);
$\Delta H_{loc}$	Perda de carga localizada (mca);
$\Delta H_{mang}$	Perda de carga na mangueira (mca);
$\Delta H_r$	Perda de carga na linha de recalque (mca);
$\Delta H_s$	Perda de carga na tubulação de sucção (mca);
$\eta_m$	Rendimento do motor (fração);
$\Delta Q$	Acréscimo de vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ );
$\Delta Z_h$	Diferença de nível na linha de hidrantes (m);
$A$	Área irrigada ( $\text{m}^2$ );
$A_F$	Área da faixa ( $\text{m}^2$ );
$A_{LOTE}$	Área efetivamente irrigada ( $\text{m}^2$ );
$A_s$	Coefficiente que depende da superfície do solo ( );
$C_{UC}$	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen (%);
$D$	Diâmetro interno da tubulação (m);
$d$	distância do autopropelido ao ponto de início da movimentação (m);
$d_0$	Diâmetro do cabo de aço (m);
$D_h$	Diâmetro da tubulação da linha de hidrantes (m);

$d_{im}$	Diâmetro interno da mangueira (mm);
$D_{mang}$	Diâmetro interno da mangueira (m);
$D_r$	Diâmetro da tubulação da linha de recalque (m);
$D_s$	Diâmetro da tubulação da linha de sucção (m);
$f$	Fator de atrito da Fórmula Universal de perda de carga proposta por Darcy-Weisbach ( );
$F_d$	Esforço de tração no cabo do autopropelido em cada posição (daN);
$F_i$	Resistência ao rolamento do autopropelido (daN);
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
$h$	Carga hidráulica (mca);
$H_1, H_2, H_3, H_4$	Alturas manométricas retiradas da curva da bomba, espaçadas de $\Delta Q$ a partir da origem (mca);
$h_{ah}$	Altura geométrica do aspersor ao hidrante (m);
$H_f$	Perda de carga no comprimento "L" (mca);
$h_h$	desnível geométrico da bomba ao hidrante (m);
$H_{man}$	Altura manométrica (mca);
$h_s$	Altura geométrica de sucção (m);
$J$	Jornada de trabalho (h/dia);
$K$	Coefficiente de perda de carga localizada ( );
$k$	Número de grupos (unid.);
$K_c$	Número de camadas de cabo de aço no tambor (unid.);
$L$	Comprimento da tubulação (m);
$L_d$	Distância percorrida pelo autopropelido
$L_F$	Comprimento da faixa (m);
$L_f$	Acréscimo de comprimento na extremidade final da faixa (m);
$L_h$	Comprimento da tubulação da linha de hidrantes (m);
$L_i$	Acréscimo de comprimento na extremidade final da faixa (m);
$L_{mang}$	Comprimento da mangueira (m);
$L_{mi}$	Comprimento da mangueira sendo tracionada no início da movimentação (m);
$L_r$	Comprimento da tubulação de recalque (m);
$L_s$	Comprimento da tubulação de sucção (m);
$m$	Fração do raio ( $-1,0 \leq m \leq 1,0$ );
$n$	Número de observações (unid.);
$N_{eixo}$	Potência necessária no eixo da bomba (cv);
$N_F$	Número de faixas (unid.);
$N_m$	Potência elétrica necessária ao sistema (cv);
$NPSH_{disp}$	Net Positive Suction Head disponível (mca);
$NPSH_{req}$	Net Positive Suction Head requerido (mca);
$n_{tur}$	Rotação na turbina (rpm);
$p_0$	Equivalente a pressão atmosférica local (mca);
$p_a$	Pressão do aspersor (mca);

$P_h$	Pressão necessária no hidrante (mca);
$P_{ln}$	Peso linear da mangueira cheia de água (daN);
$P_{lm}$	Peso de mangueira sem água por unidade de comprimento (daN/m);
$P_p$	Intensidade de aplicação de água no centro do círculo irrigado (mm/h);
$p_v$	Equivalente à pressão de vapor d'água, à temperatura local (mca);
$\bar{P}$	Taxa média de aplicação de água (mm/h);
$Q$	vazão ( $m^3/h$ );
$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$	Vazões espaçadas de $\Delta Q$ a partir da origem ( $m^3/h$ );
$r$	Raio de alcance do aspersor (m);
$R_0$	Raio do tambor enrolador vazio (m);
$Re$	Número de Reynolds ( );
Reg.	Regime de fluxo;
$R_{et}$	Raio efetivo de enrolamento do tambor (m);
$R_t$	Relação de transmissão ( );
$t$	Tempo gasto para percorrer o carregador (min);
$t_1, t_2, t_3$	Coefficientes de ajuste da equação de rotação da turbina,
$T_b$	Torque no tambor (daN.m);
$t_f$	Tempo de parada no final da faixa (min);
$t_i$	Tempo de parada no início da faixa (min);
$T_t$	Torque na turbina (daN.m);
$V$	Velocidade média de escoamento na tubulação (m/s);
$v$	Velocidade linear do aspersor (m/h);
$V_c$	Velocidade média do vento no sentido contrário ao deslocamento do aspersor (km/h);
$V_d$	Velocidade de deslocamento do autopropelido na posição d (m/h);
$V_h$	Velocidade média da água na tubulação da linha de hidrantes (m/s);
$V_{mang}$	Velocidade média da água na mangueira (m/s);
$V_n$	Velocidade média do vento na direção do deslocamento do aspersor (km/h);
$V_r$	Velocidade média da água na tubulação de recalque (m/s);
$V_s$	Velocidade média da água na tubulação de sucção (m/s);
$V_v$	Velocidade média do vento em qualquer direção (km/h);
$W_F$	Largura da faixa (m);
$W_{LOTE}$	Largura da área efetivamente irrigada (m)
$X_1, X_2, X_3$	Vazão de ensaio ( $m^3/h$ ), ao calcular-se a pressão de serviço interpolada, ou Pressão de serviço de ensaio (m) ao calcular-se o raio de alcance do aspersor interpolado;
$x_i$	Volume de água obtido no pluviômetro de ordem i (ml);
$\bar{x}$	Média aritmética dos volumes coletados nos pluviômetros (ml);
$Y_1, Y_2, Y_3$	Pressão de ensaio (mca), quando for calcular a Pressão de serviço interpolada; ou Raio de alcance obtido no ensaio (m), quando for calcular o raio de alcance interpolado;

## RESUMO

YANAGI JUNIOR, Tadayuki. **Dimensionamento e predição da distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos.** Lavras: UFLA, 1995. 79p. (Dissertação - Mestrado em Irrigação e Drenagem).\*

Um modelo matemático para a simulação da distribuição de água do sistema de irrigação autopropelido, modelo CHUVISCO equipado com aspersor MEC-21, foi desenvolvido para auxiliar o projeto e avaliar o sistema. O modelo fornece uma rápida análise de decisão baseado na uniformidade de distribuição da água sobre a superfície do solo. Diferentes condições de operação podem ser analisadas pelo programa, como ângulo de rotação do aspersor, tempos de parada nas extremidades das faixas e direção de deslocamento ao longo de carregadores sucessivos, que são parâmetros de entradas. Baseado em parâmetros locais, tais como dimensões da área e demanda de água, o modelo calcula a vazão do aspersor e a máxima pressão requerida. Este ponto calculado da curva do sistema permite ao projetista escolher o modelo da bomba. Usando os parâmetros operacionais da bomba selecionada, o modelo determina as curvas de desempenho, por interpolação polinomial, calculando o ponto de operação, para cada carregador, através da intercessão da curva da bomba com a curva do sistema. O modelo calcula a velocidade de deslocamento e a distribuição de água, considerando pressão constante e pressão disponível

---

\* Orientador: Eli Ferreira. Membros da banca: Alberto Colombo, Edmar José Scaloppi e Manoel Alves de Faria.

em cada carreador. Em ambas situações, o modelo exhibe como dados de saída a vazão e a pressão, a eficiência da bomba, o NPSH requerido e disponível, a potência requerida pela bomba, a pressão de funcionamento do aspersor, a velocidade média de deslocamento do equipamento e o tempo de irrigação por carreador. São calculados três coeficientes de uniformidade de distribuição na área central das faixas, nas bordas da área e ao longo de toda a área irrigada, que também são reportados.

## **SUMMARY**

### **DESIGN AND WATER DISTRIBUTION PREDICTION OF THE TRAVELER IRRIGATION SYSTEMS**

A water distribution simulation mathematical model of a traveler irrigation machine, CHUVISCO model equipped with a MEC-21 model gun sprinkler, was developed to help the design and evaluation of irrigation systems using this machine. The mathematical model provides a quick way to analyze the design decision consequences on the water distribution uniformity on soil surface level. Different equipment operation policies can also be analyzed by the mathematical model, since sprinkler rotation angle, standing times at towpaths extremities and traveler direction along successive towpaths are input parameters. Based on local parameters, such as field dimensions and water demand, the mathematical model computes the sprinkler discharge and the maximum pump pressure required. This calculated point of the system curve allows the designer to choose a pump model. By using operational parameters of the selected pump model, the mathematical model determines pump performance curves, by mathematical interpolation, computing the pump operation point, for each towpath such as the intersection of the pump curve with system curve. The mathematical model computes the sprinkler travel speed and the water distribution, considering constant and available pressure for each towpath. In both situations, the mathematical model show includes the pump discharge and pressure, the pump

efficiency, the NPSH, required an available, the pump power requirement, the sprinkler pressure, the average travel speed and irrigation time per towpath. Three distribution uniformity coefficients, which are computed in the central area of the towpaths, in the border area and along the entire irrigated area, are also reported.



## **1 INTRODUÇÃO**

A irrigação por aspersão começou a ser utilizada na agricultura por volta de 1900, com adaptação de pequenos conjuntos fixos instalados em jardins, hortas e viveiros de mudas. No início da década de 30, foram introduzidos tubos mais leves e idealizados os engates rápidos, promovendo grande incremento no uso da aspersão na agricultura. No Brasil, a indústria de equipamentos de irrigação iniciou suas atividades em 1954.

A irrigação por aspersão destaca-se como um dos métodos de maior potencial de expansão, devido à uniformidade de aplicação de água, à elevada eficiência do sistema, ao bom controle do volume de água aplicado na irrigação, à adaptação a diversas condições de topografia e de solos, bem como à possibilidade de seu uso tanto em culturas já estabelecidas como naquelas em plantio. Neste sistema, a água é aplicada à superfície do solo por meio de dispositivos mecânicos, onde o fluxo passa sobre pressão através de furos ou bocais, adquirindo grande velocidade e provocando a quebra do jato e distribuição da água em forma de precipitação ao redor do aspersor.

Dentre os sistemas de irrigação que utilizam aspersores, existem aqueles que trabalham com pressões elevadas, tipo canhão hidráulico, portátil, ou autopropelido, os quais tem sido utilizados freqüentemente em culturas de porte alto (café, citrus, cana-de-açúcar, capineiras, etc.) e baixo (pastagens, amendoim, soja, arroz, trigo, etc.), apresentando as seguintes vantagens além das citadas anteriormente para o sistema de aspersão: baixo custo de implantação em

relação a outros tipos de aspersão mecanizada e uso de pouca mão-de-obra. Segundo Faria e Vieira (1986) os autopropelidos são máquinas que irrigam faixas longas e estreitas e com deslocamento contínuo do aspersor ou do conjunto, girando de tal modo a deixar um ângulo seco, para que seu deslocamento se faça sempre em solo seco. Em geral, são equipados com um único aspersor tipo canhão, com alcance superior a 30 m e setor angular de trabalho superior a 180°. A irrigação com o autopropelido vem conseguindo cada vez mais adeptos, pela facilidade de manejo, de transporte do equipamento e por ser adequada a diferentes culturas, embora exija solos com alta taxa de infiltração e seja muito sensível aos ventos. Outra limitação no uso do autopropelido é que esses equipamentos exigem alta pressão de funcionamento, necessitando de bombas com alta capacidade de recalque.

Apesar do autopropelido apresentar vantagens, nota-se a falta de um mecanismo através do qual se possa dimensionar e simular a distribuição da água deste sistema.

Sendo assim, o presente trabalho tem o seguinte objetivo:

1) Desenvolvimento de um modelo matemático com a finalidade de dimensionar o sistema de irrigação por aspersor autopropelido e simular a distribuição de água sobre a superfície do solo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Hidráulica do sistema**

#### **2.1.1 Bombas centrífugas**

Ao selecionar uma bomba visa-se, especificamente, o recalque de determinada vazão em certa altura manométrica, sendo que o desempenho e o ponto de funcionamento de uma bomba centrífuga relativos a uma tubulação podem ser determinados a partir de sua curva característica ( $H_m \times Q$ ) e da curva característica da tubulação, conforme já foi mostrada por vários autores (Carvalho, 1977, Daker, 1987 e Bernardo, 1989).

James (1984) cita que o desempenho de um sistema de irrigação tipo pivô central é influenciado significativamente pela escolha da bomba. Deve-se salientar que esta observação também é válida para qualquer sistema de aspersão.

Nielsen (1986) expressou matematicamente a curva característica da bomba através de uma parábola e, juntamente com a fórmula que expressa a curva característica da tubulação, obteve o ponto de funcionamento ou ponto de operação do circuito, visto que o método gráfico, apesar de simples, é também bastante trabalhoso, sendo assim, o método analítico torna-se vantajoso para a solução de circuitos hidráulicos simples utilizando-se somente uma bomba.

Arens (1989) afirma que admitindo-se a parábola como função interpoladora, pode-se obter ótimos resultados, principalmente quando se trata de descrever as curvas características de bombas centrífugas.

Logo, a equação que representa a curva da bomba pode ser expressa da seguinte forma:

$$H_{\text{man}} = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 \quad (2.1)$$

sendo que a determinação dos seus coeficientes pode ser feita por vários métodos matemáticos.

### 2.1.2 Perda de carga nas linhas de sucção, recalque e linha com hidrantes

A perda de carga é atribuída ao movimento da água ao longo das tubulações. Ela é considerada uniforme (regime permanente), ao longo de qualquer trecho de uma canalização de diâmetro constante.

Existem várias equações para o cálculo da perda de carga ao longo das tubulações, sendo que a fórmula universal de perda de carga é a que melhor se adapta aos diversos regimes de fluxo, necessitando somente conhecer o regime de fluxo no qual se dá o escoamento, para assim selecionar a fórmula de cálculo do fator de perda de carga ( $f$ ) mais adequada.

Abaixo tem-se a fórmula universal de perda de carga e as fórmulas para o cálculo do fator de perda de carga para os vários regimes de fluxo.

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

- Regime Laminar ( $Re < 2000$ )

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

- Regime Transitório ( $2000 \leq Re \leq 4000$ )

A função  $f$  não é conhecida nesta região, o que impede o cálculo correto do fator de perda de carga. Deve-se, então, evitar esta região modificando-se o diâmetro da tubulação.

- Regime Turbulento Hidraulicamente Liso  $\left( \frac{Re \sqrt{f}}{D/\epsilon} \leq 14 \right)$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2.4)$$

- Regime Turbulento Hidraulicamente Misto  $\left( 14 < \frac{Re \sqrt{f}}{D/\epsilon} < 200 \right)$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{\epsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2.5)$$

- Regime Turbulento Hidraulicamente Rugoso  $\left( \frac{Re \sqrt{f}}{D/\epsilon} \geq 200 \right)$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{\epsilon/D}{3,71} \right) \quad (2.6)$$

Nota-se que nas equações (2.4) e (2.5) a solução deve ser obtida por métodos iterativos, razão pela qual, surgiram equações explícitas para facilitar a forma de cálculo, como a

equação (2.7) proposta por Swamee e Jain (1976). A validade desta equação aplica-se às seguintes condições:  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$  e  $10^3 \leq Re \leq 10^8$ , onde o erro envolvendo o fator de atrito é de aproximadamente 1%, quando comparado ao valor do fator de perda de carga (f) obtido pela equação de Colebrook-White.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.7)$$

Para a determinação da perda de carga localizada ao longo das linhas de sucção, recalque e de hidrantes, pode-se utilizar a equação:

$$\Delta H_{loc} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.8)$$

sendo,

$\Delta H_{loc}$	= perda de carga localizada, (m),
K	= coeficiente de perda localizada, (adm.),
V	= velocidade média na canalização, (m/s),
g	= aceleração da gravidade, (m/s <sup>2</sup> ).

### 2.1.3 Perda de carga na mangueira

O funcionamento de um autopropelido com carretel enrolador envolve o enrolamento da mangueira de suprimento em um carretel durante a irrigação. Este processo de enrolamento causa mudança na perda de carga na mangueira e conseqüentemente mudanças nas características hidráulicas da máquina.

De acordo com Scaloppi [19\_ ], as mangueiras de elastômero reforçadas com fibras têxteis, utilizadas nos autopropelidos tracionados a cabo apresentam algumas particularidades estruturais que devem ser consideradas no dimensionamento hidráulico do sistema. Em primeiro lugar, o material empregado na fabricação é deformável quando submetido à esforços mecânicos, como pressão ou tração. Além disso, a rugosidade absoluta varia ao longo do comprimento.

Zaggo et al. (1988) realizaram ensaios em mangueiras DN 50, 63 e 75 e Folegatti et al. (1986) na mangueira DN 110, mostrando que o diâmetro interno pode ser relacionado à carga hidráulica a que está submetida, por equação linear do tipo:

$$d_{im} = a + b \cdot h \quad (2.9)$$

sendo  $d_{im}$  = diâmetro interno da mangueira (mm),

$h$  = carga hidráulica (m),

e,  $a$  e  $b$  = constantes de ajuste, cujos valores, para cada DN, são mostrados na Tabela 2.1.

Nestes ensaios foram verificados os valores de diâmetro interno médio e rugosidade absoluta média para as mangueiras avaliadas, conforme Tabela 2.2.

TABELA 2.1 - Constantes de ajuste  $a$  e  $b$ , usados no cálculo do diâmetro interno da mangueira usada no autopropelido em função da carga hidráulica.

DN	$a$	$b$	$r^2$	limites de aplicação
50	52,1	0,0164	0,70	$36 < h < 75$ m
63	66,2	0,0135	0,40	$40 < h < 80$ m
75	76,7	0,0155	0,86	$48 < h < 85$ m
100	102,0	0,0150	estimada	$50 < h < 90$ m
110 <sup>(1)</sup>	114,0	0,0374	0,99	$10 < h < 98$ m

<sup>(1)</sup>Diâmetro nominal excluído do texto normativo aprovado pela ABNT.

TABELA 2.2 - Diâmetros internos médios e rugosidades absolutas médias, segundo Zaggo et al. (1988).

Diâmetro Nominal (Polegadas)	Diâmetro interno (mm)	Rugosidade Absoluta (mm)
2	52,95	0,0433
2 ½	67,01	0,0361
3	77,71	0,0070

Rochester et al. (1990) conduziram um experimento para avaliar a perda de carga devido ao enrolamento da mangueira no carretel enrolador de autopropelidos e nesse estudo verificou-se que as diferenças na perda de carga entre duas posições foram atribuídas à efeitos de enrolamento, tais como curvatura e possíveis deformações na área da seção transversal de escoamento.

#### 2.1.4 Perda de carga no carro

Colombo (1991) avaliou a perda de carga no carro do autopropelido “Chuvisco” e chegou a seguinte equação.

$$\Delta H_{\text{car}} = 0,001024 \cdot Q^2 \quad (2.10)$$

sendo,  $\Delta H_{\text{car}}$  = perda de carga no carro (m),

$Q$  = vazão (m<sup>3</sup>/h),



## 2.2 Modelos de simulação da distribuição de água na faixa irrigada

A simulação, em computador, da distribuição da água aplicada apresenta-se como uma ferramenta extremamente útil devido às dificuldades de se medir a distribuição da água aplicada em toda a área irrigada.

Bittinger e Longenbaugh (1962) apresentam um processo analítico para o cálculo do perfil transversal de aplicação de água, utilizando um aspersor com perfil teórico (triangular ou elíptico), com movimento linear, velocidade constante e em giro completo, no qual a lâmina aplicada ( $\lambda$ ) em cada ponto do perfil é dada por:

a) Para aspersores com perfil estacionário de aplicação de água de forma triangular:

$$\lambda = \frac{P_p \cdot r}{v} \cdot \left\{ (1 - m^2)^{\frac{1}{2}} - m^2 \cdot \ln \frac{(1 - m^2)^{\frac{1}{2}} + 1}{m} \right\} \quad (2.11)$$

b) Para aspersores com perfil estacionário de aplicação de água de forma elíptica:

$$\lambda = \frac{P_p \cdot r \cdot \pi \cdot (1 - m^2)}{2 \cdot v} \quad (2.12)$$

sendo,  $\lambda$  = lâmina resultante da passagem do aspersor (mm),

$P_p$  = intensidade de aplicação de água no centro do círculo irrigado (mm/h),

$r$  = raio de alcance do aspersor (m),

$v$  = velocidade linear do aspersor (m/h),

$\pi$  = número, cujo valor é 3,1415927,

$m$  = fração do raio ( $-1,0 \leq m \leq 1,0$ ).

Rolland (1982) descreve os passos usados em um programa de simulação de distribuição de água em autopropelidos, sendo o mesmo baseado no perfil estacionário de água do aspersor, no qual são calculadas as taxas de aplicação em função da distância do aspersor a um ponto qualquer. Com a utilização deste perfil pode-se calcular a lâmina aplicada em toda a faixa irrigada sob diferentes condições operacionais caracterizadas pela combinação bocal x pressão do aspersor, variando o ângulo de giro do aspersor e a distância entre carregadores (Figura 2.1).

Com base na Figura 2.1, tomando-se um ponto M a sucessivas distâncias entre aspersores, a uma velocidade constante, em dois carregadores 1' e 2' e distanciados de um valor E, é possível calcular as sucessivas taxas de precipitação sobre o ponto M, a partir do perfil estacionário de aplicação de água, simulando para vários ângulos de giro do aspersor e várias distâncias entre carregadores, sendo que para se calcular a lâmina aplicada sobre o ponto M basta integrar as sucessivas taxas de aplicação de água em relação ao tempo necessário para o autopropelido deslocar-se de A até A' e de B até B'. Os incrementos de tempo para efetuar-se a integração da taxa de aplicação de água correspondem ao tempo necessário para o autopropelido deslocar-se de A até A1, A1 até A2, e assim sucessivamente.

Rochester (1983a, b) e Grant et al. (1984) utilizaram modelos de simulação da distribuição de água que consideravam os tempos de parada nas extremidades das faixas a fim de avaliar o seu efeito sobre a uniformidade de aplicação na área estudada. Nestas simulações a velocidade de deslocamento do autopropelido foi considerada como constante.

Rochester (1983b) afirma que o uso do tempo de parada na posição inicial de funcionamento do autopropelido tem sido recomendada por vários fabricantes de autopropelidos,

com o propósito de prover uma adequada aplicação de água na posição inicial de funcionamento. Porém, os modelos de simulação de aplicação de água tem mostrado que este tempo de parada pode causar excesso ou déficit de água em algumas regiões da área irrigada.

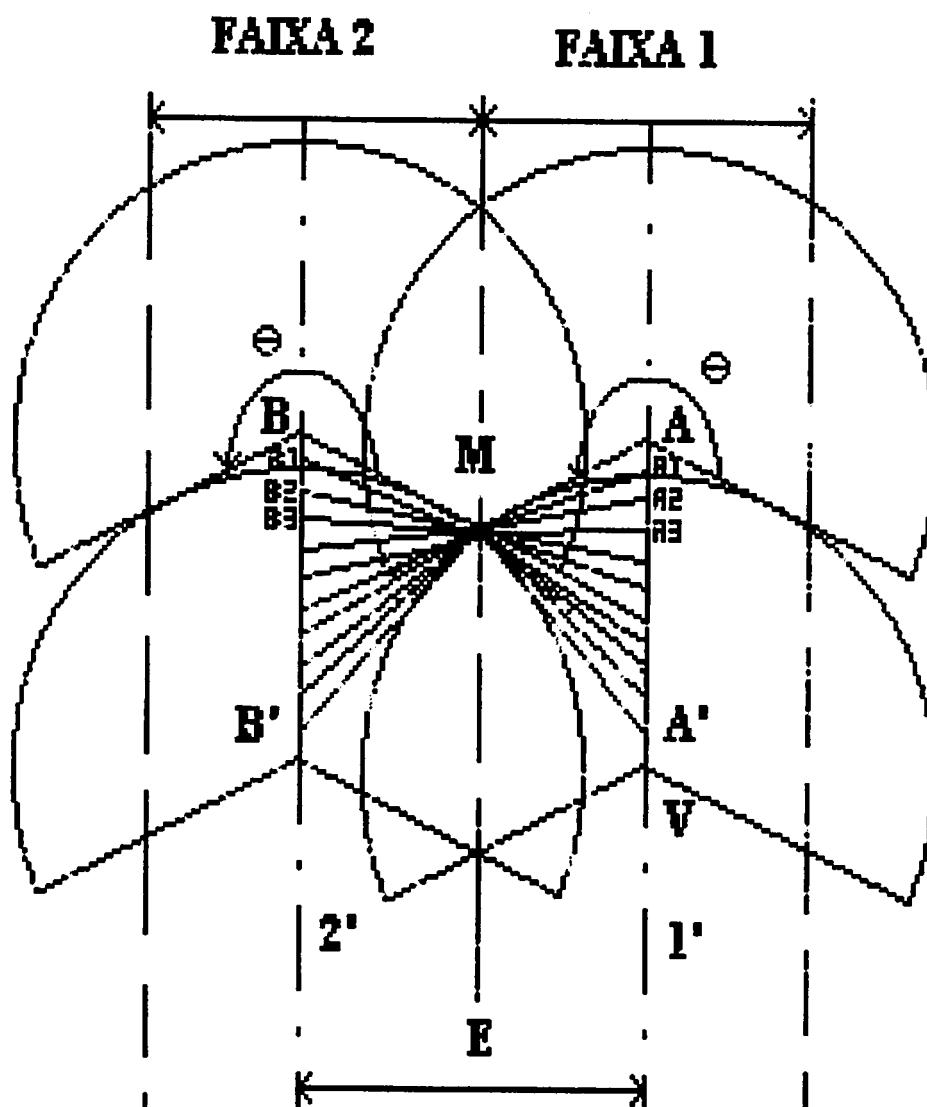


FIGURA 2.1 - Esquema do processo de cálculo adotado no modelo de simulação da distribuição de água proposto por Rolland (1982).

Rochester et al. (1989) consideraram que as variações de velocidade devem ser evitadas por meio de dispositivos acoplados aos autopropelidos, pois esta variação faz com que a simulação se torne complicada. Estas variações são principalmente devidas à perda de carga no enrolamento da mangueira (Rochester et al., 1990) e variações da força de tração (Colombo, 1991).

Colombo (1991) apresenta um programa de simulação de distribuição de água para sistema autopropelido tracionado a cabo, dotado de mecanismo de propulsão tipo turbina de ação e considerando variação de velocidade ao longo do carreador.

### 2.2.1 Velocidade de deslocamento

De acordo com Olitta (1984) e Bernardo (1989) a lâmina aplicada por um autopropelido pode ser relacionada à velocidade média de deslocamento pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{1000 \cdot Q}{W_F \cdot v} \quad (2.13)$$

sendo,  $\lambda$  = lâmina média de aplicação de água (mm),

$Q$  = vazão do aspersor ( $m^3/h$ ),

$W_F$  = Largura da faixa (m),

$v$  = velocidade média de caminhamento (m/h).

Addink et al. (1983), relatam encontrar valores extremos de variação na velocidade de deslocamento de equipamentos autopropelidos de até 60%, sendo que esta variação de velocidade altera o valor do coeficiente de uniformidade de forma inversa. A

variação é atribuída a variações no diâmetro do carretel enrolador do cabo de aço ou da mangueira, e a variações na velocidade de rotação do mecanismo propulsor. De acordo com os autores, para se obter uma boa distribuição de água a variação de velocidade deve ser inferior a 10%.

Colombo (1991) apresenta um modelo para prever a velocidade média e instantânea do autopropelido “Chuvisco” da ASBRASIL, equipado com aspersor MEC-21 e tracionado a cabo. O modelo é mostrado a seguir. O desvio máximo encontrado entre a velocidade média observada e a prevista pelo modelo foi de 1,08 m/h, mostrando a boa representatividade do modelo proposto.

$$F_d = F_i + A_s \cdot \left( \frac{d}{2} + L_{mi} \right) \cdot P_{la} \quad (2.14)$$

sendo,  $F_d$  = esforço de tração no cabo do autopropelido em dada posição (daN),  
 $F_i$  = resistência ao rolamento do autopropelido (daN),  
 $A_s$  = coeficiente que depende da superfície do terreno,  
 $d$  = distância do autopropelido ao ponto de início da movimentação (m),  
 $L_m$  = comprimento da mangueira sendo tracionada no início da movimentação (m),  
 $P_{la}$  = peso linear da mangueira cheia de água (daN/m).

$$F_i = (640 + L_{mi} \cdot P_{la}) \cdot 0,106 \quad (2.15)$$

$$P_{la} = \left( \frac{d_{im}}{1000} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1000 + P_{im} \quad (2.16)$$

sendo,  $d_{im}$  = diâmetro interno da mangueira (mm),  
 $P_{im}$  = peso linear da mangueira sem água (daN),

O torque no tambor enrolador de cabo de aço em qualquer ponto localizado a uma distância do início do ponto de movimentação será:

$$T_b = F_d \cdot R_{et} \quad (2.17)$$

sendo,  $T_b$  = torque no tambor (daN.m),  
 $R_{et}$  = raio efetivo de enrolamento do tambor (m).

$$R_{et} = (K_c - 0,5) \cdot d_0 + R_0 \quad (2.18)$$

sendo,  $K_c$  = número de camadas de cabo de aço no tambor,  
 $d_0$  = diâmetro do cabo de aço (m),  
 $R_0$  = raio do tambor enrolador vazio (m),

O torque na turbina em qualquer ponto do carreador localizado a uma distância do início do ponto de movimentação será:

$$T_t = \frac{T_b}{R_t} \quad (2.19)$$

sendo,  $T_t$  = torque na turbina (daN.m)  
 $R_t$  = relação de transmissão.

$$n_{tur} = t_1 + t_2 \cdot Q + t_3 \cdot \frac{T_t}{Q} \quad (2.20)$$

sendo,  $n_{tur}$  = rotação na turbina (rpm),  
 $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  = coeficientes de ajuste da equação,  
 $Q$  = vazão que passa pela turbina em (m<sup>3</sup>/h).

$$V_d = \frac{n_{tur}}{R_1} \cdot \pi \cdot R_{et} \cdot 60 \quad (2.21)$$

sendo,  $V_d$  = velocidade de deslocamento na posição  $\underline{d}$  (m/h).

### 2.2.2 Algoritmo de grupamento “K-means”

A utilização de um algoritmo de grupamento se faz necessária para a simulação da distribuição de água sobre a superfície do solo, pois o mesmo possibilita a simulação utilizando-se qualquer pressão de serviço ensaiada.

Tou e Gonzales (1974) mostram os passos necessários para o cálculo do centro dos grupos, que é baseado na minimização do índice de desempenho, o qual é definido como o somatório dos quadrados das distâncias de todos os pontos do domínio do grupo e seu centro. Este procedimento é chamado de Algoritmo “K-means”.

Solomon e Bezdek (1980) caracterizaram o modelo de distribuição de um aspersor com o Algoritmo “K-means”. Segundo os autores, os algoritmos de grupamento são procedimentos matemáticos para reunir dados dentro de grupos, e o algoritmo “K-means” foi escolhido para este estudo por ser razoavelmente simples para ser implementado, e por produzir resultados promissores que são condizentes com o contexto da irrigação.

A seguir são mostrados os passos necessários à utilização do Algoritmo de grupamento “K-means”.

passo 1 - Teste dos dados para normalizar o modelo de distribuição;

passo 2 - Processamento do modelo normalizado com o algoritmo de grupamento “K-means”;

passo 3 - Análise dos resultados, relacionando-se perfis gerados com os diâmetros dos bocais.

### 2.3 Uniformidade de distribuição

Na irrigação por aspersão é de fundamental importância o conhecimento da Uniformidade de aplicação de água, pois a mesma está intimamente relacionada ao desempenho do sistema de irrigação.

Christiansen (1942) foi o primeiro pesquisador a medir e a adequar a uniformidade de distribuição de água por um sistema de irrigação por aspersão, sendo que o mesmo foi baseado na soma do módulo dos desvios de cada observação em relação à média, resultando assim a seguinte equação:

$$C_{UC} = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\sum_i^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \right) \quad (2.22)$$

sendo,  $C_{UC}$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%),

$\bar{x}$  = média aritmética dos volumes coletados nos pluviômetros, ( $\text{cm}^3$ ),

$x_i$  = volume de água obtido no pluviômetro de ordem  $i$  representado por áreas idênticas, ( $\text{cm}^3$ ),

$|x_i - \bar{x}|$  = Valor absoluto dos desvios, ( $\text{cm}^3$ ),

$n$  = número de observações.

Keller e Bliesner (1990) afirmam que o parâmetro que é largamente usado para avaliar a uniformidade de irrigação é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.



Rosa (1986) afirma que a uniformidade de distribuição também está relacionada ao perfil de distribuição do aspersor, o qual depende do sentido e da velocidade do vento, da pressão de serviço, da uniformidade de rotação, da altura de elevação, do diâmetro e do tipo de bocal dos aspersores.

No caso específico dos sistemas autopropelidos, o espaçamento entre carreadores e a velocidade de deslocamento também influenciam a uniformidade de distribuição de água.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Modelo matemático**

Foi desenvolvido um modelo matemático com a finalidade de dimensionar os componentes de um sistema de irrigação autopropelido e simular a distribuição de água, objetivando-se a satisfação dos requisitos técnicos e redução do tempo de elaboração de projeto. Para a solução deste modelo, foi elaborado um programa computacional em linguagem Turbo Basic que utiliza banco de dados contendo as informações técnicas que caracterizam o aspersor, tais como: pressão de serviço, vazão e raio de alcance do aspersor, perfil radial de aplicação de água do aspersor MEC-21 da ASBRASIL, para várias pressões e diâmetro de bocais; e características do mecanismo propulsor do autopropelido chuvisco. Este banco de dados é de fácil manipulação, sendo que seus arquivos podem ser modificados e atualizados conforme interesse e necessidade do projetista.

### **3.2 Critérios adotados para o dimensionamento**

#### **3.2.1 Equações características do aspersor**

A fim de possibilitar o dimensionamento do sistema de irrigação e a simulação da distribuição de água, foram utilizados os dados técnicos do equipamento, no caso o

autopropelido “Chuvisco” da ASBRASIL, equipado com o aspersor MEC-21, cuja Tabela com os dados são apresentados no Anexo A. Como na maioria dos projetos trabalha-se com valores de pressão, vazão e raio de alcance do aspersor que não existem no catálogo, optou-se pela utilização de interpolação, sendo que a expressão matemática utilizada para representar a variação da pressão de serviço e do raio de alcance do aspersor em função da vazão foi a parábola, ou seja:

$$Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2 \quad (3.1)$$

Para obter-se os coeficientes da equação acima é necessário a montagem do seguinte esquema:

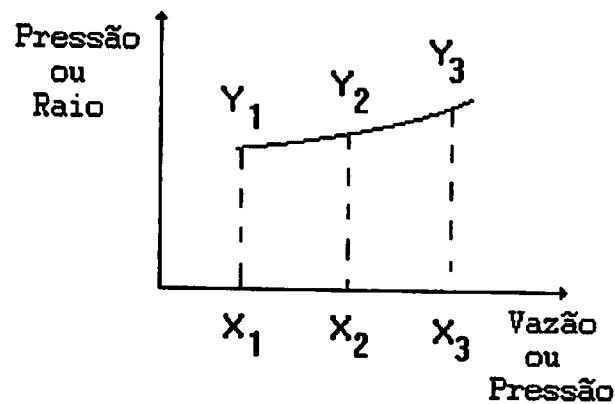


Figura 3.1 - Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de Pressão em função da vazão e Raio de alcance do aspersor em função da pressão, sendo que Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub> e Y<sub>3</sub> podem ser a pressão de serviço ou raio de alcance do aspersor, e X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub> podem ser a vazão ou a pressão de serviço do aspersor.

$$\begin{cases} a + b \cdot X_1 + c \cdot X_1^2 = Y_1 & (3.2) \\ a + b \cdot X_2 + c \cdot X_2^2 = Y_2 & (3.3) \\ a + b \cdot X_3 + c \cdot X_3^2 = Y_3 & (3.4) \end{cases}$$

Resolvendo o sistema tem-se:

$$c = \frac{1}{X_2 - X_3} \cdot \left( \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} - \frac{Y_1 - Y_3}{X_1 - X_3} \right) \quad (3.5)$$

$$b = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} - c \cdot (X_1 + X_2) \quad (3.6)$$

$$a = Y_1 - b \cdot X_1 - c \cdot X_1^2 \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Ajuste dos perfis adimensionais do aspersor

Com a finalidade de simular a distribuição de água foram determinados os perfis adimensionais do aspersor para os seguintes diâmetros de bocais 28x6,3 mm; 30x6,3 mm e 32x6,3 mm; nas pressões 500; 550; 600; 650 e 700 kPa, e para o bocal 34x6,3 mm nas pressões 500; 550 e 700 kPa. Os dados de ensaios usados para gerar os perfis adimensionais foram obtidos no CENEA - Centro Nacional de Engenharia Agrícola e cedidos por Colombo (1991). Os ensaios e os perfis adimensionais obtidos através do processamento dos dados são apresentados no apêndices B e C, respectivamente.

Em seguida caracterizou-se o modelo de distribuição de água do aspersor através de um algoritmo de grupamento denominado “K-means Algorithm” mostrado por Solomon e

Bezdek (1980). A necessidade de se utilizar este processo se dá pelo fato de que os perfis determinados são pontos discretos e em um projeto, na maioria das vezes, tem-se a necessidade de se trabalhar com pressões diferentes daquelas realizadas nos ensaios de laboratório ou de campo.

O método usado consiste em três estágios: teste dos dados para normalizar o modelo de distribuição, processamento do modelo normalizado com o algoritmo de agrupamento “K-means”, e análise dos resultados gerados relacionando os perfis gerados com os diâmetros de bocais.

Na Tabela 3.1 é apresentado o valor da RMS (raiz quadrada do quadrado da distância média entre os pontos), ou seja, este coeficiente representa a distância entre os pontos e o centro do grupo que foi usado.

TABELA 3.1 - Valores da RMS para o número de grupos indicados.

Número de grupos (K)	1	2	3	4	5	6
RMS	0,72	0,51	0,44	0,47	0,39	0,34

Através dos resultados obtidos na Tabela 3.1, verifica-se que a utilização de dois grupos (perfis) é razoável para representação de todos os perfis gerados nos ensaios do aspersor MEC-21 da ASBRASIL.

Na Tabela 3.2 é apresentada a associação dos grupos com os diâmetros dos bocais e pressão de serviço.

TABELA 3.2 - Associação dos grupos com as pressões de serviço e diâmetros dos bocais.

Pressão (kPa)	Diâmetro do Bocal (mm)			
	28 x 6,3	30 x 6,3	32 x 6,3	34 x 6,3
500	II	I	I	I
550	II	II	I	I
600	II	I	I	
650	I	I	I	
700	I	I	I	I

Os perfis adimensionais resultantes do processo de grupamento “K-means” são apresentados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Perfis adimensionais (Lâmina adimensional em função da distância adimensional) gerados pelo algoritmo de grupamento “K-means”.

Perfil	Distância Adimensional																			
	,025	,075	,125	,175	,225	,275	,325	,375	,425	,475	,525	,575	,625	,675	,725	,775	,825	,875	,925	,975
(I)	0,75	1,19	1,05	1,77	1,54	1,46	1,37	1,25	1,20	1,19	1,21	1,24	1,24	1,22	1,20	1,14	0,90	0,76	0,30	0,07
(II)	1,16	1,37	2,11	2,12	1,99	1,81	1,73	1,58	1,47	1,44	1,36	1,41	1,28	1,23	1,11	0,92	0,67	0,41	0,19	0,05

### 3.2.3 Equações da bomba

Foram obtidas as expressões matemáticas interpoladoras para a representação da curva característica da bomba (altura manométrica em função vazão), rendimento em função vazão e  $NPSH_{requerido}$  (Net Positive Suction Head) em função da vazão. No caso da curva característica e da curva de rendimento utilizou-se a equação cúbica para representação da

variação das mesmas em função da vazão, e para o cálculo do  $NPSH_{\text{requerido}}$  optou-se pela representação através de uma parábola.

### 3.2.3.1 Altura manométrica em função da vazão

Para se obter uma expressão na forma cúbica que represente a variação da altura manométrica em função da variação da vazão deve-se retirar da curva da bomba 4 pares de dados, iniciando no ponto onde a curva corta o eixo das ordenadas, ou seja, vazão igual a zero, sendo que o restante dos pares de dados são retirados de forma a serem equidistantes, através da adoção de um delta de vazão ( $\Delta Q$ ). A Figura (3.2) nos mostra a forma de retirada dos dados da curva da bomba, de forma gráfica.

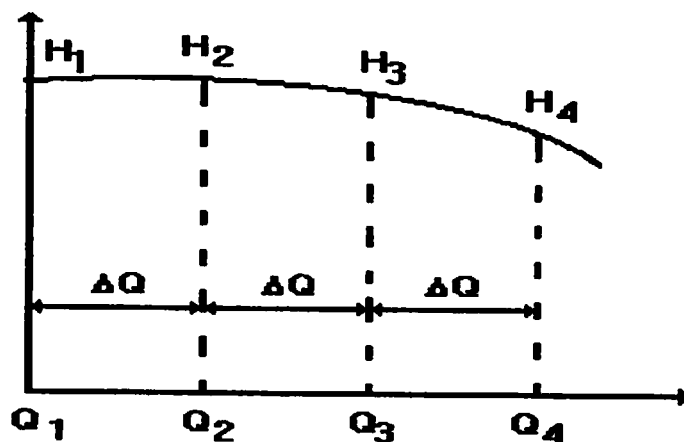


Figura 3.2 - Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva da bomba para que se possa fazer o ajuste cúbico aos dados.

$$H_{\text{man}} = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 + d \cdot Q^3 \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_1 + c \cdot Q_1^2 + d \cdot Q_1^3 = H_1 & (3.9) \\ a + b \cdot Q_2 + c \cdot Q_2^2 + d \cdot Q_2^3 = H_2 & (3.10) \\ a + b \cdot Q_3 + c \cdot Q_3^2 + d \cdot Q_3^3 = H_3 & (3.11) \\ a + b \cdot Q_4 + c \cdot Q_4^2 + d \cdot Q_4^3 = H_4 & (3.12) \end{cases}$$

Como  $Q_1=0$ , se substituirmos este valor na equação 3.9 tem-se:

$$a = H_1 \quad (3.13)$$

Sabe-se também que  $Q_2=\Delta Q$ ,  $Q_3=2 \cdot \Delta Q$  e  $Q_4=3 \cdot \Delta Q$ . Logo, substituindo-se a por  $H_1$ ,  $Q_2$  por  $\Delta Q$ ,  $Q_3$  por  $2 \cdot \Delta Q$  e  $Q_4$  por  $3 \cdot \Delta Q$ , e resolvendo o sistema obteremos as expressões para o cálculo dos coeficientes a, b, c e d da equação (3.8), que é apresentado a seguir.

$$a = H_1 \quad (3.14)$$

$$d = \frac{H_4 - 3 \cdot (H_3 - H_2) - H_1}{6 \cdot \Delta Q^3} \quad (3.15)$$

$$c = \frac{H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1}{2 \cdot \Delta Q^2} - 3 \cdot d \cdot \Delta Q \quad (3.16)$$

$$b = \frac{H_2 - H_1}{\Delta Q} - c \cdot \Delta Q - d \cdot \Delta Q^2 \quad (3.17)$$

### 3.2.3.2 Rendimento em função da vazão

A expressão matemática utilizada para representar a variação do rendimento em função da vazão foi a equação cúbica, ou seja:



$$\eta = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 + d \cdot Q^3 \quad (3.18)$$

Para se obter os coeficientes da equação acima é necessário a montagem do seguinte sistema:

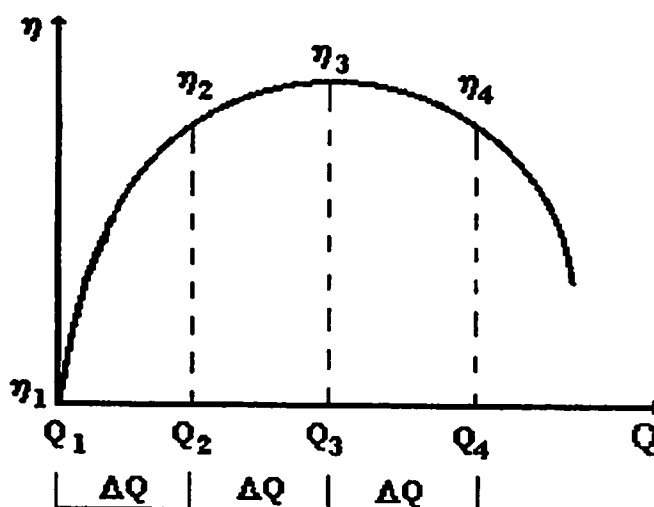


FIGURA 3.3 - Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de rendimento da bomba para que se possa fazer o ajuste cúbico aos dados.

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_1 + c \cdot Q_1^2 + d \cdot Q_1^3 = \eta_1 & (3.19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_2 + c \cdot Q_2^2 + d \cdot Q_2^3 = \eta_2 & (3.20) \end{cases}$$

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_3 + c \cdot Q_3^2 + d \cdot Q_3^3 = \eta_3 & (3.21) \end{cases}$$

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_4 + c \cdot Q_4^2 + d \cdot Q_4^3 = \eta_4 & (3.22) \end{cases}$$

pela figura acima, pode-se verificar que:

$Q_1 = 0$  e  $\eta_1 = 0$ , e substituindo estes valores na equação 3.19, tem-se:

$$a = 0 \quad (3.23)$$

Sabendo-se também que  $Q_2 = \Delta Q$ ,  $Q_3 = 2 \cdot \Delta Q$  e  $Q_4 = 3 \cdot \Delta Q$ , logo substituindo-se estes valores nas equações 3.20, 3.21 e 3.22, e resolvendo-se o sistema obtém-se as expressões para o cálculo dos coeficientes b, c e d da equação 3.18, que é apresentado a seguir.

$$d = \frac{\eta_4 - 3 \cdot (\eta_3 - \eta_2)}{6 \cdot \Delta Q^3} \quad (3.24)$$

$$c = \frac{\eta_3 - 2 \cdot \eta_2}{2 \cdot \Delta Q^2} - 3 \cdot d \cdot \Delta Q \quad (3.25)$$

$$b = \frac{\eta_2}{\Delta Q} - c \cdot \Delta Q - d \cdot \Delta Q^2 \quad (3.26)$$

### 3.2.3.3 NPSH<sub>requerido</sub> em função da vazão

A expressão matemática utilizada para representar a variação do NPSH<sub>req</sub> em função da vazão foi a parábola, ou seja,

$$\text{NPSH}_{\text{req}} = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 \quad (3.27)$$

sendo, NPSH<sub>req</sub> = altura de sucção positiva líquida requerida pela bomba, (mca),

Do mesmo modo, para se obter os coeficientes da equação de NPSH<sub>requerido</sub> deve-se montar o seguinte sistema para a resolução do problema.

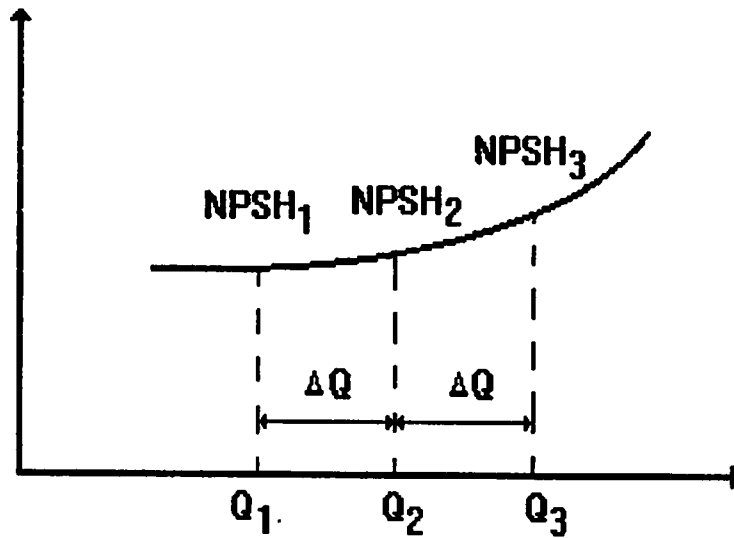


FIGURA 3.4 - Representação gráfica dos pares de dados a serem retirados da curva de NPSH requerido pela bomba para que se possa fazer o ajuste quadrático aos dados.

$$\begin{cases} a + b \cdot Q_1 + c \cdot Q_1^2 = \text{NPSH}_1 & (3.28) \\ a + b \cdot Q_2 + c \cdot Q_2^2 = \text{NPSH}_2 & (3.29) \\ a + b \cdot Q_3 + c \cdot Q_3^2 = \text{NPSH}_3 & (3.30) \end{cases}$$

pela figura acima, pode-se verificar que :

$Q_2 = Q_1 + \Delta Q$  e  $Q_3 = Q_1 + 2 \cdot \Delta Q$ , fazendo-se a substituição e resolvendo-se o sistema, tem-se os coeficientes usados na equação 3.27, para o cálculo do  $\text{NPSH}_{\text{req}}$  em função da vazão.

$$c = \frac{\text{NPSH}_3 - 2 \cdot \text{NPSH}_2 + \text{NPSH}_1}{2 \cdot \Delta Q} \quad (3.31)$$

$$b = \frac{\text{NPSH}_2 - \text{NPSH}_1}{\Delta Q} - 2 \cdot c \cdot Q_1 - c \cdot \Delta Q \quad (3.32)$$

$$a = \text{NPSH}_1 - b \cdot Q_1 - c \cdot Q_1^2 \quad (3.33)$$

Através da equação 3.27, calcula-se o  $NPSH_{req}$  pela bomba, que pode ser comparado ao  $NPSH_{disp}$  para verificar se haverá problemas de cavitação no bombeamento. O  $NPSH_{disp}$  pode ser calculado através da equação 3.36 que é mostrada a seguir.

$$NPSH_{disp} = p_0 - (p_v + \Delta H_s + h_s) \quad (3.34)$$

sendo,  $NPSH_{disp}$  = altura de sucção positiva líquida disponível, (m),  
 $p_0$  = equivalente a pressão atmosférica local, (m),  
 $p_v$  = equivalente a pressão de vapor d'água, à temperatura local, (mca),  
 $\Delta H_s$  = perda de carga na tubulação de sucção, (mca),  
 $h_s$  = altura geométrica de sucção, o valor de  $h_s$  é positivo para bomba trabalhando com sucção negativa, e negativo para bomba trabalhando com sucção positiva, ou seja, trabalhando afogada, (mca).

### 3.2.4 Determinação da vazão requerida

Como as dimensões da área efetivamente irrigada ainda não estão estabelecidas, a vazão requerida será aproximada para que se possa selecionar o aspersor, através da seguinte equação:

$$Q = \frac{A \cdot \mu}{J \cdot \eta_a} \quad (3.35)$$

sendo,  $Q$  = vazão requerida ( $m^3/h$ ),  
 $A$  = área irrigada ( $m^2$ ),  
 $\mu$  = evapotranspiração potencial da cultura no período de maior demanda (m/dia),  
 $\eta_a$  = eficiência de aplicação (fração),  
 $J$  = jornada de trabalho permitida por dia (h/dia).

### 3.2.5 Seleção do aspersor e suas características operacionais

Após o cálculo da vazão requerida pela equação 3.45, calcula-se a pressão de serviço do aspersor através da função interpoladora ajustada no item 3.2.1. Com isto, é possível selecionar o diâmetro do bocal que oferece a vazão necessária para o projeto.

### 3.2.6 Largura das faixas irrigadas

As faixas irrigadas devem apresentar a maior largura possível, limitada pelo nível de uniformidade de distribuição de água admissível para a área em consideração.

Segundo Keller e Nir (1986)<sup>1</sup> citados por Scaloppi (1995) os valores típicos do coeficiente de uniformidade de Christiansen para velocidade do vento próxima a 15 km/h está entre 70 e 75%. Partindo do critério proposto pelos autores, pode-se calcular a largura da faixa irrigada ( $W_F$ ), em condições onde a velocidade do vento seja igual a 0 (zero), como mostra a equação abaixo:

$$W_F = 1,6 \cdot r \quad (3.36)$$

sendo,  $W_F$  = largura da faixa irrigada (m),  
 $r$  = alcance do jato do aspersor (m)

Os valores máximos de larguras de faixas, recomendados para aspersores com ângulo de lançamento do jato em torno de 24°, estão apresentados na Tabela 3.4.

---

<sup>1</sup> KELLER, J.; NIR, D. *Traveling gun sprinkler system design*. Mineografado, Utah State University, 1986. 30p.

TABELA 3.4 - Largura máxima das faixas, em função do tipo de bocal do aspersor e das condições de vento.

Tipo de bocal	vento fraco ou ausente	vento de 15 km/h
anel	1,60 r	1,10 r
convergente	1,65 r	1,15 r

### 3.2.7 Comprimento efetivo das faixas

O comprimento da faixa pode ser calculado segundo a seguinte expressão:

$$L_F = L_i + L_d + L_f \quad (3.37)$$

- sendo,
- $L_F$  = comprimento da faixa (m),
  - $L_i$  = acréscimo de comprimento na extremidade inicial da faixa irrigada (m),
  - $L_d$  = distância percorrida pelo autopropelido (m),
  - $L_f$  = acréscimo de comprimento na extremidade final da faixa irrigada (m).

Na determinação do acréscimo de comprimento na extremidade inicial da faixa irrigada, recomenda-se que este acréscimo seja determinado em função de um valor mínimo de sobreposição, observado na linha divisória entre duas faixas adjacentes, que é mostrado na Figura 3.5.

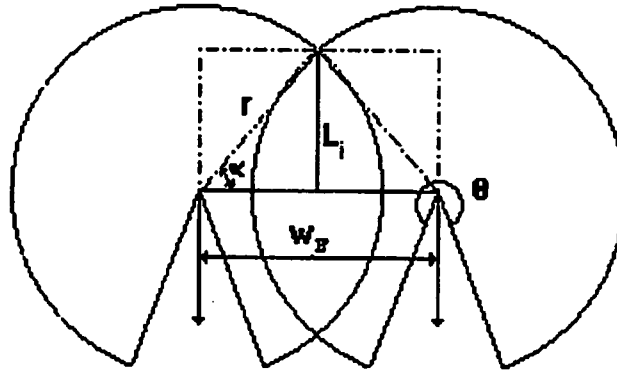


FIGURA 3.5 - Vista superior de duas faixas adjacentes, ilustrando o acréscimo do comprimento na extremidade inicial da faixa irrigada.

Deste modo, pode-se calcular este acréscimo do comprimento, na extremidade inicial da faixa irrigada, pela seguinte equação:

$$L_i = r \cdot \sin \alpha \quad (3.38)$$

sendo,  $\alpha$  = ângulo formado entre o ponto de interseção do alcance de aspersores operando e faixas adjacentes e a linha perpendicular traçada no ponto final do percurso (graus),

O valor de  $\alpha$  pode ser calculado da seguinte forma:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{W_F}{2 \cdot r} \right) \quad (3.39)$$

A Figura 3.6 ilustra o acréscimo de comprimento na extremidade final da faixa irrigada.

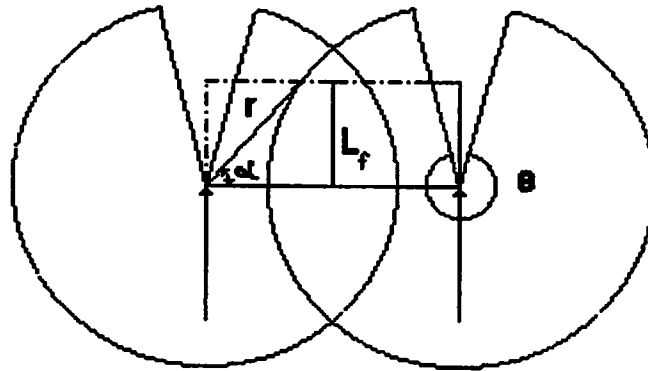


FIGURA 3.6 - Vista superior de duas faixas adjacentes, ilustrando o acréscimo do comprimento na extremidade final da faixa irrigada.

Na determinação do acréscimo de comprimento na extremidade final da faixa irrigada, utiliza-se a seguinte equação:

$$L_f = L_i \cdot \left( \left( \frac{\theta}{180} \right) - 1 \right) \quad (3.40)$$

sendo,  $\theta$  = ângulo de operação do aspersor, em graus,

O valor de  $L_f$  sempre diferenciará de  $L_i$  quando forem utilizados aspersores setoriais, com ângulo de operação ( $\theta$ ) inferior a 360 graus, até o limite de 180 graus.

### 3.2.8 Dimensões da área efetivamente irrigada

A área da faixa irrigada é calculada pela seguinte equação,

$$A_F = W_F \cdot L_F \quad (3.41)$$

sendo,  $A_F$  = área da faixa irrigada ( $m^2$ ),



Através do valor de  $A_F$ , calcula-se as dimensões da área efetivamente irrigada pelas equações abaixo:

$$W_{\text{LOTE}} = \frac{A_{\text{LOTE}}}{L_F} \quad (3.42)$$

sendo  $W_{\text{LOTE}}$  = largura da área efetivamente irrigada (m),  
 $A_{\text{LOTE}}$  = área efetivamente irrigada ( $\text{m}^2$ ),

O número de faixas é calculado pela seguinte equação:

$$N_F = \frac{W_{\text{LOTE}}}{W_F} \quad (3.43)$$

sendo  $N_F$  = número total de faixas (unid.),

deve-se observar que o valor de  $N_F$  deve ser inteiro; para isto deve-se aproximar o valor de  $N_F$  sempre que necessário.

### 3.2.9 Características operacionais do aspersor

Após o cálculo definitivo das dimensões da área a ser efetivamente irrigada, calcula-se a vazão requerida pelo aspersor através da equação 3.35.

De posse desta nova vazão, verifica-se a necessidade de correção da pressão requerida pelo aspersor, que poderá ser realizada pela função interpoladora ajustada no item 3.2.1.

Em seguida, calcula-se a razão média de aplicação de água, através da seguinte equação:

$$\bar{P} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} \quad (3.44)$$

sendo  $\bar{P}$  = taxa média de aplicação de água.

### 3.2.10 Manejo do sistema

O dimensionamento do sistema a partir deste ponto pode seguir diversos procedimentos alternativos, em função de diferentes prioridades previamente estabelecidas. Dentre as principais, duas merecem ser destacadas:

- a) Obtenção de um número inteiro de faixas irrigadas por dia
- b) Aplicação de uma lâmina líquida próxima a requerida

As alternativas de manejo do sistema (a) e (b) devem ser conciliadas com as velocidades de deslocamento disponíveis no equipamento escolhido.

A alternativa (b), ou seja, aplicação de uma lâmina líquida próxima à requerida, é do ponto de vista técnico a mais correta, embora na maioria das vezes o equipamento não possua a regulação de velocidade desejada para que se possa aplicar esta lâmina.

O tempo de parada no início e final da faixa é muito utilizado para corrigir déficit de água nas extremidades das faixas, para este cálculo utilizam-se as seguintes equações:

$$T_i = \frac{L_i \cdot T}{\left( L_F + \left( \frac{L_i \cdot \theta}{180} \right) \right)} \quad (3.45)$$

$$T_f = T_i \cdot \left( \frac{\theta}{180} - 1 \right) \quad (3.46)$$

sendo,  $T_i$  = tempo de parada no início da faixa (min),

$T_f$  = tempo de parada no final da faixa (min).

A velocidade média de deslocamento do autopropelido pode ser calculada pelas equações apresentadas no item 2.3, sendo que os valores dos termos necessários a cada equação é apresentado na Tabela a seguir:

TABELA 3.5 - Valores dos termos usados nas equações necessárias ao cálculo da velocidade de deslocamento do autopropelido, que são apresentadas no item 2.3.

$A_s$	0,80 para superfícies vegetados 0,55 para superfícies não vegetadas
$d_{im}$	77,71 mm
$P_{lm}$	1,10 daN para mangueira de 3"
$t_1$	-97,72304
$t_2$	7,51079
$t_3$	-12610,66
$R_t$	327,32 para autopropelido com engrenagem de 15 dentes 288,81 para autopropelido com engrenagem de 17 dentes 258,41 para autopropelido com engrenagem de 19 dentes
$d_0$	0,006 m
$R_0$	0,101 m

A velocidade também pode se calculada pela equação apresentada a seguir:

$$V_d = \frac{L_d}{T - (T_i + T_f)} \quad (3.47)$$

A partir destas equações, pode-se calcular quantas faixas podem ser irrigadas por dia, além da posição onde o autopropelido deve parar em uma dada faixa.

### 3.3 Pressão requerida no hidrante

Para se determinar a pressão requerida no hidrante, as seguintes informações são requeridas:

- pressão requerida no bocal do aspersor ( $p_a$ ),
- Diferença máxima de elevação entre o bocal do aspersor e o hidrante ( $h_{ah}$ ),
- Perdas de carga localizadas entre o aspersor e o hidrante, incluindo o mecanismo propulsor ( $\Delta H_{ah}$ ),
- Perda de carga hidráulica por atrito na mangueira ( $\Delta H_{mang}$ ),

Com isto, a pressão requerida no hidrante pode ser calculada pela seguinte equação:

$$p_h = p_a + h_{ah} + \Delta H_{ah} + \Delta H_{mang} \quad (3.48)$$

### 3.4 Dimensionamento das linhas de sucção, recalque e principal

A mais importante função da linha principal é conduzir a água em quantidade e pressão requeridas para o funcionamento do autopropelido, em quaisquer posições. Segundo Bernardo (1989) o principal objetivo no dimensionamento da linha principal é selecionar os diâmetros das tubulações, de modo que ela possa cumprir sua função economicamente.

No dimensionamento das linhas de sucção, recalque e principal foram levados em consideração as perdas de carga localizadas e ao longo da tubulação, a fim de atender à pressão máxima requerida nos hidrantes.

### 3.5 Moto-bomba

A altura manométrica total é calculada pela equação mostrada a seguir:

$$H_{\text{man}} = p_h + \Delta H_p + \Delta Z_p + \Delta H_r + h_r + \Delta H_s + h_s + \Delta H_{\text{loc}} \quad (3.49)$$

sendo,

- $H_{\text{man}}$  = altura manométrica (m),
- $p_h$  = pressão necessária no hidrante (m),
- $\Delta H_p$  = perda de carga na linha principal (m),
- $\Delta Z_p$  = diferença de nível na linha principal (m),
- $\Delta H_r$  = perda de carga na tubulação de recalque (m),
- $h_r$  = altura geométrica de recalque (m),
- $\Delta H_s$  = perda de carga na tubulação de sucção (m),
- $h_s$  = altura geométrica de sucção (m),
- $\Delta H_{\text{loc}}$  = perda de carga localizada (m).

A potência absorvida pela bomba, ou potência necessária no eixo da bomba ( $N_b$ ) pode ser determinada pela equação 3.50, enquanto a potência elétrica necessária ao sistema ( $N_m$ ) pode ser calculada pela equação 3.51.

$$N_{\text{eixo}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{\text{man}}}{\eta_b} \quad (3.50)$$

$$N_m = \frac{N_{\text{eixo}}}{\eta_m \cdot \eta_t} \quad (3.51)$$

sendo,  $N_{\text{eixo}}$  = potência necessária no eixo da bomba (W),  
 $N_m$  = potência elétrica necessária ao sistema (W).  
 $\gamma$  = peso específico da água ( $\text{kgf/m}^3$ ),  
 $Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  
 $\eta_b$  = rendimento da bomba (fração),  
 $\eta_m$  = rendimento do motor (fração).  
 $\eta_t$  = rendimento de transmissão (fração).

Segundo Bernardo (1989), deve-se admitir um acréscimo na potência instalada, em função da potência absorvida pela bomba. Para motores elétricos recomenda-se que a potência no eixo da bomba ( $N_{\text{eixo}}$ ) seja acrescida de uma folga, conforme indicado na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 - Acréscimo na potência instalada, em função da potência absorvida pela bomba.

Potência exigida no eixo da bomba (kW)	Acréscimo necessário à potência do motor (%)
até 1.5	30
de 1.5 a 3.7	25
de 3.7 a 7.4	20
de 7.4 a 14.7	15
acima de 14.7	10

Segundo Nogueira (1993), para motores diesel recomenda-se uma margem de segurança de 25%, independente da potência necessária no eixo da bomba.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos, visa-se a aplicação de uma lâmina líquida próxima à requerida. Porém, raramente os equipamentos conseguem atender a essas exigências. deste modo, o uso de um modelo matemático tornar-se extremamente útil para dimensionar e simular as condições operacionais do sistema e, para ilustração da aplicabilidade do modelo, será apresentado o seguinte exemplo:

Exemplo de aplicação: Dimensionar um sistema autopropelido a partir dos seguintes dados:

Local: Uberaba - MG

Área a ser irrigada: 18,00 ha

Cultura: diversas

Evapotranspiração para dimensionamento: 4,58 mm/dia

Eficiência de irrigação: 75 %

Jornada de trabalho: 18 h

Altitude: 800 m

Pressão atmosférica: 9,46 m.c.a.

Temperatura da água: 20°C

Pressão de vapor: 0,24 m.c.a.

Equipamento utilizado: Autopropelido "Chuvisco" - ASBRASIL

Aspersor: MEC-21

DADOS DE ENTRADA PARA DIMENSIONAMENTO

Área = 18,00 ha      Et = 4,58 mm/dia      Jornada = 18 h

Altitude = 800 m      Pressão atmosférica = 9,46 m.c.a.

Temperatura da água = 20°C      Pressão de vapor = 0,24 m.c.a.

CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA ÁREA A SER IRRIGADA

Vazão = 55,22 m<sup>3</sup>/h      Raio de alcance do aspersor = 45,33 m

Angulo de giro do aspersor = 360°

Número de faixas = 9      Largura da faixa = 66,00 m

Comprimento adicional no inicio da faixa = 31,08 m

Comprimento adicional no final da faixa = 31,08 m

Largura final da área efetivamente irrigada = 594,00 m

Comprimento final da área efetivamente irrigada = 257,00 m

Área final irrigada = 152658,00 m<sup>2</sup>

Marca do aspersor: ASBRASIL      Modelo: MEC-21

Diâmetro do bocal: 30 mm

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DA BOMBA

MARCA E MODELO: MARK HE      Diâmetro do Rotor 240 mm      1750 rpm

Número de estágios: 5



Pontos retirados da curva da bomba

$$\Delta Q = 30 \quad HB_0 = 145 \quad HB_1 = 145 \quad HB_2 = 140 \quad HB_3 = 125$$

$$H_m = 145,00 + 0,02778 \cdot Q - 5,50 \cdot 10^{-12} \cdot Q^2 - 0,00003 \cdot Q^3$$

### COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE RENDIMENTO

Pontos retirados da curva de rendimento da bomba

$$Q_{ini} = 00,0 \quad \Delta Q = 30,0 \quad \eta_1 = 00,0 \quad \eta_2 = 57,62 \quad \eta_3 = 76,50 \quad \eta_4 = 77,70$$

$$\eta = 2,8003 \cdot Q - 0,0332 \cdot Q^2 + 0,0001 \cdot Q^3$$

### COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DO NPSH REQUERIDO PELA BOMBA

Pontos retirados da curva do NPSH requerido pela bomba

$$Q_{ini} = 50,0 \quad \Delta Q = 25,0 \quad NPSH_1 = 2,8 \quad NPSH_2 = 2,9 \quad NPSH_3 = 4,0$$

$$NPSH_{req} = 5,6000 - 0,0960 \cdot Q + 0,0008 \cdot Q^2$$

### SIMULAÇÃO DA VELOCIDADE DO AUTOPROPELIDO

Superfície do Carreador: VEGETADA

$$\text{Fator de atrito} = 0,80$$

Comprimento da mangueira = 100,0 m

Comprimento inicial = 4,5 m

Distância autopropelido à ancora = 205,5 m

Distância de deslocamento = 195,5 m

Número de dentes da engrenagem = 15

Relação de transmissão = 327,32

Análise: INTERVALO

Distância entre pontos = 12,0 m

A seguir são apresentadas tabelas com os resultados referentes aos cálculos hidráulicos do sistema. A Tabela 4.1 mostra o número do hidrante (H); a vazão do hidrante; a altura geométrica de sucção ( $h_s$ ); o comprimento da tubulação de sucção ( $L_s$ ); a perda de carga total na tubulação de sucção ( $\Delta H_s$ ), que é calculada através das equações 2.2 e 2.8; o comprimento da tubulação de recalque ( $L_r$ ); a perda de carga total na tubulação de recalque ( $\Delta H_r$ ), calculada através das equações 2.2 e 2.8; o desnível geométrico da bomba ao hidrante ( $h_b$ ); o comprimento da tubulação da linha com hidrantes ( $L_h$ ); a perda de carga total na linha com hidrantes ( $\Delta H_h$ ), calculada através das equações 2.2 e 2.8; o comprimento da mangueira ( $L_{mang}$ ); a perda de carga na mangueira ( $\Delta H_{mang}$ ), calculada pela equação 2.2; a perda de carga no carro acrescida da elevação do aspersor em relação ao eixo da turbina ( $\Delta H_{car+tz}$ ), calculada através da equação 2.10 somada à elevação do aspersor, que é 2 m; a pressão do aspersor ( $p_a$ ), calculada através de interpolação polinomial do segundo grau cujo método foi apresentado no item 3.2.1; e a altura manométrica ( $H_{man}$ ), calculada pela equação 3.49.

TABELA 4.1 - Resultados parciais do exemplo de aplicação.

H	Vazão m <sup>3</sup> /h	h <sub>s</sub> m	L <sub>s</sub> m	ΔH <sub>s</sub> m	L <sub>r</sub> m	ΔH <sub>r</sub> m	h <sub>b</sub> m	L <sub>h</sub> m	ΔH <sub>b</sub> m	L <sub>mang</sub> m	ΔH <sub>mang</sub> m	ΔH <sub>cor-2</sub> m	p <sub>a</sub> m	H <sub>man</sub> m
1	58,40	3,0	5,0	0,20	1143,0	14,48	47,00	627,0	7,90	100,0	11,36	5,49	51,05	140,48
2	58,77	3,0	5,0	0,20	1143,0	14,66	46,60	561,0	7,17	100,0	11,49	5,54	51,71	140,37
3	59,24	3,0	5,0	0,21	1143,0	14,88	45,90	495,0	6,43	100,0	11,66	5,59	52,55	140,23
4	59,87	3,0	5,0	0,21	1143,0	15,19	44,70	429,0	5,71	100,0	11,88	5,67	53,68	140,04
5	60,53	3,0	5,0	0,22	1143,0	15,52	43,40	363,0	4,95	100,0	12,12	5,75	54,88	139,84
6	60,99	3,0	5,0	0,22	1143,0	15,74	42,80	297,0	4,13	100,0	12,29	5,81	55,70	139,69
7	61,50	3,0	5,0	0,22	1143,0	16,00	42,00	231,0	3,30	100,0	12,48	5,87	56,66	139,53
8	61,88	3,0	5,0	0,23	1143,0	16,19	41,70	165,0	2,42	100,0	12,61	5,92	57,34	139,41
9	62,37	3,0	5,0	0,23	1143,0	16,44	41,00	99,0	1,53	100,0	12,80	5,98	58,26	139,24
10	62,81	3,0	5,0	0,23	1143,0	16,67	40,50	33,0	0,60	100,0	12,96	6,04	59,09	139,10

A Tabela 4.2 mostra em cada coluna as seguintes informações: o número do hidrante (H); a vazão do hidrante (Q); o diâmetro da tubulação de sucção (D<sub>s</sub>); a velocidade na tubulação de sucção (V<sub>s</sub>); o regime de fluxo na tubulação de sucção; o diâmetro da tubulação de

TABELA 4.2 - Resultados parciais do exemplo de aplicação.

H	Q m <sup>3</sup> /h	D <sub>s</sub> mm	V <sub>s</sub> m/s	Reg.	D <sub>r</sub> mm	V <sub>r</sub> m/s	Reg.	D <sub>b</sub> mm	V <sub>b</sub> m/s	Reg.	D <sub>mang</sub> mm	V <sub>msng</sub> m/s	Reg.
1	58,40	156	0,85	(2)	130	1,22	(2)	130	1,22	(2)	77,7	3,42	(3)
2	58,77	156	0,85	(2)	130	1,23	(2)	130	1,23	(2)	77,7	3,44	(3)
3	59,24	156	0,86	(2)	130	1,24	(2)	130	1,24	(2)	77,7	3,47	(3)
4	59,87	156	0,87	(2)	130	1,25	(2)	130	1,25	(2)	77,7	3,51	(3)
5	60,53	156	0,88	(2)	130	1,27	(2)	130	1,27	(2)	77,7	3,55	(3)
6	60,99	156	0,89	(2)	130	1,28	(2)	130	1,28	(2)	77,7	3,57	(3)
7	61,50	156	0,89	(2)	130	1,29	(2)	130	1,29	(2)	77,7	3,60	(3)
8	61,88	156	0,90	(2)	130	1,29	(2)	130	1,29	(2)	77,7	3,62	(3)
9	62,37	156	0,91	(2)	130	1,31	(2)	130	1,31	(2)	77,7	3,65	(3)
10	62,81	156	0,91	(2)	130	1,31	(2)	130	1,31	(2)	77,7	3,68	(3)

(1)Laminar (2)Escoamento turbulento Hidraulicamente misto (3)Escoamento Turbulento hidraulicamente Liso (4)Escoamento Turbulento Hidraulicamente rugoso.

recalque ( $D_r$ ); a velocidade na tubulação de recalque ( $V_r$ ); o regime de fluxo na tubulação de recalque (Reg.); o diâmetro da tubulação da linha de hidrantes ( $D_h$ ); a velocidade na linha de hidrantes ( $V_h$ ); o regime de fluxo na linha de hidrantes; o diâmetro da mangueira ( $D_{mang}$ ); a velocidade na mangueira ( $V_{mang}$ ); e o regime de fluxo que ocorre na mangueira. O regime de fluxo é calculado segundo a classificação apresentada no item 2.1.2.

A Tabela 4.3 mostra em cada coluna as seguintes informações: o número do hidrante (HIDR); a vazão no hidrante ( $Q$ ); a altura manométrica ( $H_{man}$ ); o rendimento da bomba ( $\eta_{bomba}$ ), calculado pela equação 3.18 através de interpolação; a potência necessária no eixo da bomba ( $N_{eixo}$ ), calculado pela equação 3.50; o acréscimo necessário à potência do motor (ACRÉSC.), que é apresentado na Tabela 3.6; a potência elétrica necessária ao sistema ( $N_{motor}$ ), calculado através da soma da potência necessária no eixo da bomba e o acréscimo de potência necessário à potência do motor; o NPSH disponível ( $NPSH_{disp}$ ), calculado pela equação 3.34; e o NPSH requerido ( $NPSH_{req}$ ), calculado através da equação 3.27.

TABELA 4.3 - Resultados parciais do exemplo de aplicação.

HIDR	$Q$ $m^3/h$	$H_{man}$ mca	$\eta_{bomba}$ %	$N_{eixo}$ cv	ACRÉSC. %	$N_{motor}$ cv	$NPSH_{disp}$ mca	$NPSH_{req}$ mca
1	58,40	140,48	76,13	39,91	10	43,90	6,02	2,72
2	58,77	140,37	76,22	40,09	10	44,10	6,02	2,72
3	59,24	140,23	76,33	40,31	10	44,34	6,01	2,72
4	59,87	140,04	76,47	40,61	10	44,67	6,01	2,72
5	60,53	139,84	76,61	40,92	10	45,01	6,00	2,72
6	60,99	139,69	76,71	41,14	10	45,25	6,00	2,72
7	61,50	139,53	76,81	41,38	10	45,52	6,00	2,72
8	61,88	139,41	76,87	41,56	10	45,71	5,99	2,72
9	62,37	139,24	76,96	41,80	10	45,97	5,99	2,72
10	62,81	139,10	77,04	42,01	10	46,21	5,99	2,73

A Tabela 4.4 mostra as seguintes informações em cada coluna: o número do hidrante (H); a vazão no hidrante; a pressão de serviço do aspersor, calculado através de interpolação, que é mostrado no item 3.2.1; a relação largura da faixa pelo diâmetro molhado; a velocidade média do autopropelido no carreador, calculado pela equação 2.21 em vários trechos e em seguida calculando a média; o tempo gasto para percorrer o carreador; e a lâmina aplicada, calculada pela equação 2.13.

TABELA 4.4 - Resultados parciais do exemplo de aplicação.

H	VAZÃO m <sup>3</sup> /h	PRESSÃO ASPERSOR mca	RAIO ALC. ASPERSOR m	LARG.FAIXA/D IAM.MOLH %	VEL.MÉDIA AUTOPROP. m/h	TEMPO GASTO PERCORRER O CARREADOR h	LÂMINA APLICADA mm
1	58,40	51,05	48,63	67,86	45,38	4,23	19,50
2	58,77	51,71	49,03	67,31	45,82	4,19	19,44
3	59,24	52,55	49,53	66,63	46,37	4,14	19,36
4	59,87	53,68	50,21	65,73	47,10	4,08	19,26
5	60,53	54,88	50,93	64,80	47,88	4,01	19,16
6	60,99	55,70	51,42	64,18	48,41	3,97	19,09
7	61,50	56,66	51,99	63,47	49,01	3,92	19,01
8	61,88	57,34	52,40	62,97	49,45	3,88	18,96
9	62,37	58,26	52,96	62,31	50,03	3,84	18,89
10	62,81	59,09	53,45	61,74	50,54	3,80	18,83

Após várias simulações pode-se obter os dados de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para várias características operacionais (pressão variável ou pressão constante nos hidrantes), sentido de deslocamento do autopropelido ao longo do carreador, e ângulo de giro do aspersor, que é apresentado na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - Coeficientes de Uniformidade de Christiansen para várias características operacionais.

Características Operacionais		Ângulo de	Área Central das Faixas		Bordas da Área		Toda Área Irrigada		Tempo de Parada (h)	
Pressão	Sentido	Giro	Lâmina	C <sub>UC</sub>	Lâmina	C <sub>UC</sub>	Lâmina	C <sub>UC</sub>	Início	Final
Variável	Normal	360	18,38	92	13,76	70	14,44	72	-	-
		330	16,96	89	12,97	55	13,56	60	-	-
		300	17,74	82	14,82	74	15,27	76	-	-
		270	16,91	80	15,00	75	15,30	76	-	-
		240	16,55	85	14,90	78	15,17	80	-	-
		210	16,24	92	14,71	81	14,96	83	-	-
		180	17,24	92	15,01	83	15,38	84	-	-
Variável	Invertido	360	18,24	92	13,87	71	14,51	73	-	-
		330	17,22	91	13,32	70	13,90	73	-	-
		300	17,60	82	15,36	79	15,71	79	-	-
		270	16,76	80	15,32	77	15,54	78	-	-
		240	16,40	85	15,04	80	15,26	81	-	-
		210	16,10	91	14,80	83	15,01	85	-	-
		180	17,09	92	14,68	81	15,08	83	-	-
Constante	Normal	360	18,48	93	13,98	70	14,64	72	-	-
		330	17,35	90	13,25	55	13,85	61	-	-
		300	17,87	83	14,95	74	15,40	76	-	-
		270	17,27	80	15,38	75	15,67	76	-	-
		240	16,84	85	15,24	78	15,50	80	-	-
		210	16,57	92	15,08	81	15,33	83	-	-
		180	17,56	93	15,44	83	15,79	85	-	-
Constante	Invertido	360	18,33	93	14,10	71	14,72	73	-	-
		330	17,60	91	13,61	69	14,20	73	-	-
		300	17,73	83	15,51	79	15,85	80	-	-
		270	17,13	80	15,71	77	15,93	77	-	-
		240	16,70	85	15,39	80	15,60	81	-	-
		210	16,43	92	15,18	83	15,38	85	-	-
		180	17,42	93	15,11	81	15,49	84	-	-
Variável	Normal	360	18,38	92	17,05	82	17,25	83	0,48	0,48
		330	16,96	89	14,73	62	15,05	67	0,49	0,41
		300	17,74	82	17,96	78	17,92	78	0,50	0,34
		270	16,91	80	19,03	76	18,7	76	0,51	0,26
		240	16,55	85	19,84	74	19,30	75	0,53	0,18
		210	16,24	92	20,77	70	20,03	72	0,54	0,09
		180	17,24	92	21,7	68	20,96	70	0,55	-
Variável	Invertido	360	18,24	92	17,07	82	17,25	83	0,48	0,48
		330	17,22	91	14,74	71	15,1	74	0,49	0,41
		300	17,60	82	18,09	79	18,01	80	0,50	0,34
		270	16,76	80	18,81	75	18,50	76	0,51	0,26
		240	16,40	85	19,0	74	18,53	75	0,53	0,18
		210	16,10	91	19,35	72	18,82	74	0,54	0,09
		180	17,09	92	19,31	70	18,94	73	0,55	-
Constante	Normal	360	18,48	93	17,32	82	17,49	84	0,51	0,51
		330	17,35	90	14,96	63	15,31	67	0,52	0,43
		300	17,87	83	17,94	79	17,93	79	0,53	0,35
		270	17,27	80	19,41	75	19,08	76	0,54	0,27
		240	16,84	85	20,03	75	19,51	75	0,56	0,19
		210	16,57	92	20,97	71	20,24	73	0,57	0,09
		180	17,56	93	21,85	68	21,15	71	0,58	-
Constante	Invertido	360	18,33	93	17,35	82	17,49	84	0,51	0,51
		330	17,60	91	14,97	71	15,36	74	0,52	0,43
		300	17,73	83	18,07	80	18,02	80	0,53	0,35
		270	17,13	80	19,2	75	18,87	75	0,54	0,27
		240	16,70	85	19,12	74	18,72	75	0,56	0,19
		210	16,43	92	19,49	73	18,99	75	0,57	0,09
		180	17,42	93	19,40	71	19,07	74	0,58	-

Em seguida é apresentado o croqui com as dimensões da área efetivamente irrigada pelo sistema.

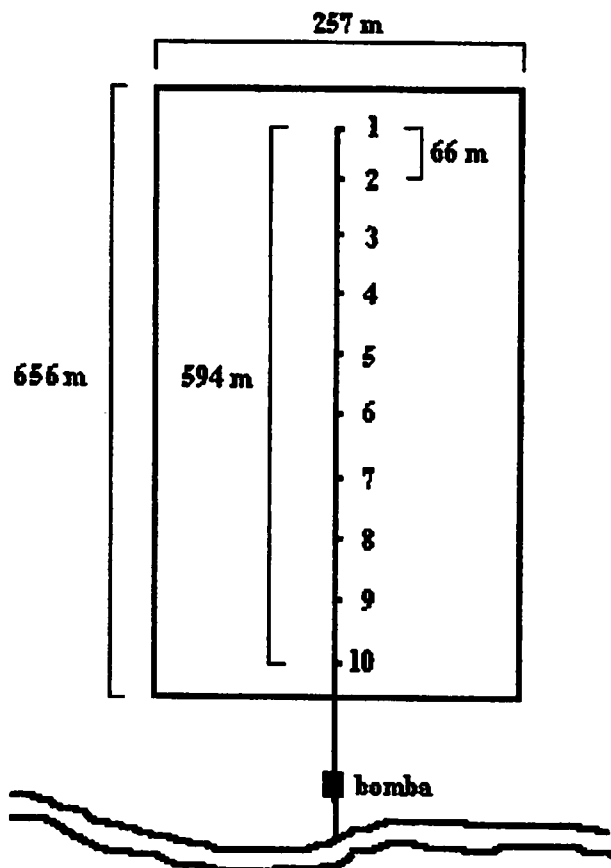


FIGURA 4.1 - Croqui da área irrigada pelo projeto.

Através do exemplo apresentado anteriormente verifica-se que o conjunto de dados de saída é completo, mostrando ao projetista todas as características de funcionamento do equipamento, tais como: equações características do aspersor (vazão e raio de alcance em função do diâmetro do bocal e pressão de serviço do aspersor); equações que caracterizam a bomba (altura manométrica, rendimento e NPSH, em função da vazão do sistema); vazão, perdas de carga, pressão do aspersor e altura manométrica indicando o ponto de funcionamento em cada

hidrante; a velocidade e regime de escoamento em cada hidrante para todas as linhas (sucção, recalque, linha de hidrante e mangueira); rendimento, potência no eixo da bomba, potência no motor, NPSH disponível, NPSH requerido, relação largura da faixa pelo diâmetro molhado, velocidade média de deslocamento do autopropelido, tempo gasto para percorrer o carreador e a lâmina aplicada em cada hidrante; além dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen para pressão constante e variável ao longo dos hidrantes, bem como para ângulos de giro do aspersor variando de 360 a 180, decrescendo de 30 em 30 graus.

Para o projeto proposto, ou seja, o exemplo apresentado anteriormente, verifica-se que se obteve uma área efetivamente irrigada de 17,12 ha, onde as dimensões foram apresentadas na Figura 4.1. O equipamento utilizado foi o autopropelido “Chuvisco” da ASBRASIL, com mangueira de 100 metros de comprimento e aspersor MEC-21 com bocal de 30x6,3 mm.

Quanto ao sistema de bombeamento optou-se pela utilização da bomba multicelular MARK, modelo HE com 5 estágios, diâmetro do rotor de 240 mm e rotação de 1750 rpm. Através de pontos retirados das curvas característica, de rendimento e de NPSH requerido, foram ajustadas equações, sendo que para a primeira foi utilizada uma equação cúbica e para o restante utilizou-se uma equação quadrática (parábola). No caso da equação característica (altura manométrica em função da vazão), optou-se pela interpolação na forma de equação cúbica devido à facilidade de cálculo dos coeficientes, pois quando a vazão é zero, temos o ponto chamado shut off, e substituindo-se o valor de vazão e de pressão na equação 3.9, obtem-se o coeficiente  $a$ , que é mostrado na equação 3.13. Devido à existência deste par de dados — vazão zero e pressão (shut off) — o modelo torna-se bem simplificado para o cálculo dos outros coeficientes. Para o rendimento optou-se pela interpolação na forma cúbica devido não só a facilidade, mas também por ser este o modelo que melhor representa a variação do



rendimento em função da vazão. Todavia, para o cálculo do NPSH requerido, optou-se pela interpolação na forma quadrática devido principalmente à facilidade no cálculo dos coeficientes, sendo que o modelo mostrou-se preciso.

Ao se analisar a Tabela 4.5, verifica-se que os projetos que apresentaram uma melhor distribuição de água foram:

- Utilização de pressão constante ao longo da linha de hidrantes e utilização de sentido de deslocamento normal ou invertido (deslocamento alternado do início para o fim, e do fim para o início do carreador), com ângulo de giro do aspersor de 360°, e com utilização de tempo de parada no início e no final do carreador, apresentando um Coeficiente médio de Uniformidade de Christiansen de 93% para a área central das faixas, 82% para as bordas da área e 84% para toda a área.
- Utilização de pressão variável ao longo da linha de hidrantes e utilização de sentido de deslocamento normal ou invertido (deslocamento alternado do início para o fim, e do fim para o início do carreador), com ângulo de giro do aspersor de 360°, e com utilização de tempo de parada no início e no final do carreador, apresentando um Coeficiente médio de Uniformidade de Christiansen de 92% para a área central das faixas, 82% para as bordas da área e 83% para toda a área.
- Utilização de pressão constante ao longo da linha de hidrantes e utilização de sentido de deslocamento normal ou invertido (deslocamento alternado do início para o fim, e do fim para o início do carreador), com ângulo de giro do aspersor de 240°, 210° ou 180° e sem utilização de tempo de parada no início e no final do carreador, apresentando um Coeficiente médio de

Uniformidade de Christiansen de 90% para a área central das faixas, 81% para as bordas da área e 83% para toda a área.

- Utilização de pressão variável ao longo da linha de hidrantes e utilização de sentido de deslocamento normal ou invertido (deslocamento alternado do início para o fim, e do fim para o início do carreador), com ângulo de giro do aspersor de 240°, 210° ou 180° e sem utilização de tempo de parada no início e no final do carreador, apresentando um Coeficiente médio de Uniformidade de Christiansen de 90% para a área central das faixas, 81% para as bordas da área e 82% para toda a área.

Deve-se observar que a diferença nos valores dos Coeficiente de Uniformidade de Christiansen é pequena, quando utilizamos pressão constante e pressão variável ao longo do carreador, porém deve-se observar que a diferença no tempo necessário para irrigar toda a área é significativa. Quando se usa pressão constante gasta-se 42,30 h para irrigar, ao passo que quando se usa pressão variável gasta-se 40,06 h, ou seja, há uma redução de 2,24 h de bombeamento. Esta redução do tempo de bombeamento quando se utiliza pressão variável ao longo do hidrante, ou seja, registro totalmente aberto para todos os hidrantes, consiste em evitar-se o gasto desnecessário de energia para gerar perda de carga e fazer com que o sistema trabalhe com pressão constante.

Logo, sugere-se que seja utilizado o sistema com pressão variável com 360° de ângulo de giro do aspersor, e que utilizado tempo de parada nas extremidades das faixas. Quanto ao sentido de deslocamento, normal ou invertido, aconselha-se o uso do que melhor satisfaça as necessidades de manejo na área a ser irrigada, pois as diferenças detectadas pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen são mínimas.

Em geral, quando é usado o aspersor trabalhando com ângulo seco, a uniformidade de distribuição de água é melhor para os ângulos de giro de  $240^\circ$ ,  $210^\circ$  e  $180^\circ$ , sem adoção de tempo de parada nas extremidades das faixas. A melhor uniformidade de distribuição é obtida quando se utiliza o aspersor trabalhando com ângulo de giro de  $360^\circ$  e adotando tempo de parada nas extremidades das faixas.

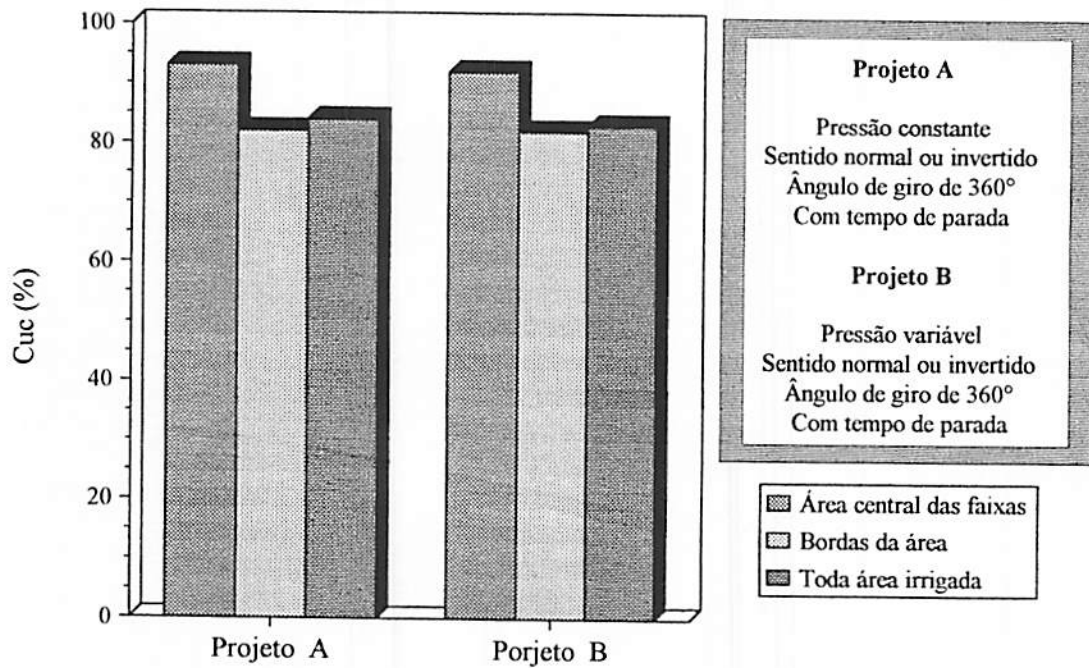


FIGURA 4.2 - Coeficientes de Uniformidade de Christiansen para os melhores projetos conseguidos através e 56 simulações.

O modelo mostrou-se eficiente como meio de agilizar os cálculos necessários ao projeto, bem como a possibilidade de se fazer o dimensionamento do sistema adotando pressão variável ao longo dos hidrantes, além de propiciar a simulação da distribuição de água para toda área irrigada.

Também foram realizadas simulações para avaliação das condições operacionais do autopropelido “Chuvisco” da ASBRASIL. Para isto foi necessário o ajuste de equações e a geração de dados de velocidade e lâmina bruta aplicada para o equipamento, utilizando-se engrenagens de 15, 17 e 19 dentes, para larguras de faixa de 54, 60, 66 e 72 m, utilizando-se carregadores de solo nú e de solo vegetado. Ao se analisar a velocidade de deslocamento do autopropelido verificou-se que a variação da velocidade é desprezível ao se analisar a superfície do solo (solo nu ou vegetado), desde que o carregador esteja livre de buracos e objetos que possam impedir o deslocamento da roda. A Figura 4.3 apresentada a posteriori mostra as lâminas brutas aplicadas para as larguras de faixas de 54, 60, 66 e 72 m.

O autopropelido “Chuvisco” mostra-se limitado quanto à regulação de velocidade, pois basicamente tem-se apenas três opções, conseguidas através da troca das engrenagens, que são de 15, 17 e 19 dentes.

Pelo exemplo apresentado anteriormente, verifica-se também que para uma jornada de trabalho de 20,03 h usando-se pressão variável ao longo dos hidrantes, ou 21,15 h usando-se pressão constante ao longo dos hidrantes, o equipamento irriga 15,50 ha, com um turno de irrigação de aproximadamente 3 dias, pois a lâmina bruta aplicada em média foi de 19,16 mm usando-se pressão variável e 19,51 mm usando-se pressão constante. Adotando-se uma eficiência de aplicação de 75%, tem-se uma lâmina líquida de 14,37 mm quando se utiliza pressão variável e 14,63 mm quando se utiliza pressão constante ao longo dos hidrantes. Como a evapotranspiração da cultura é de 4,58 mm/dia, o turno de rega quando se adota pressão variável e pressão constante ao longo dos hidrantes será, 3,14 dias e 3,19 dias respectivamente, ou seja, aproximadamente 3 dias.

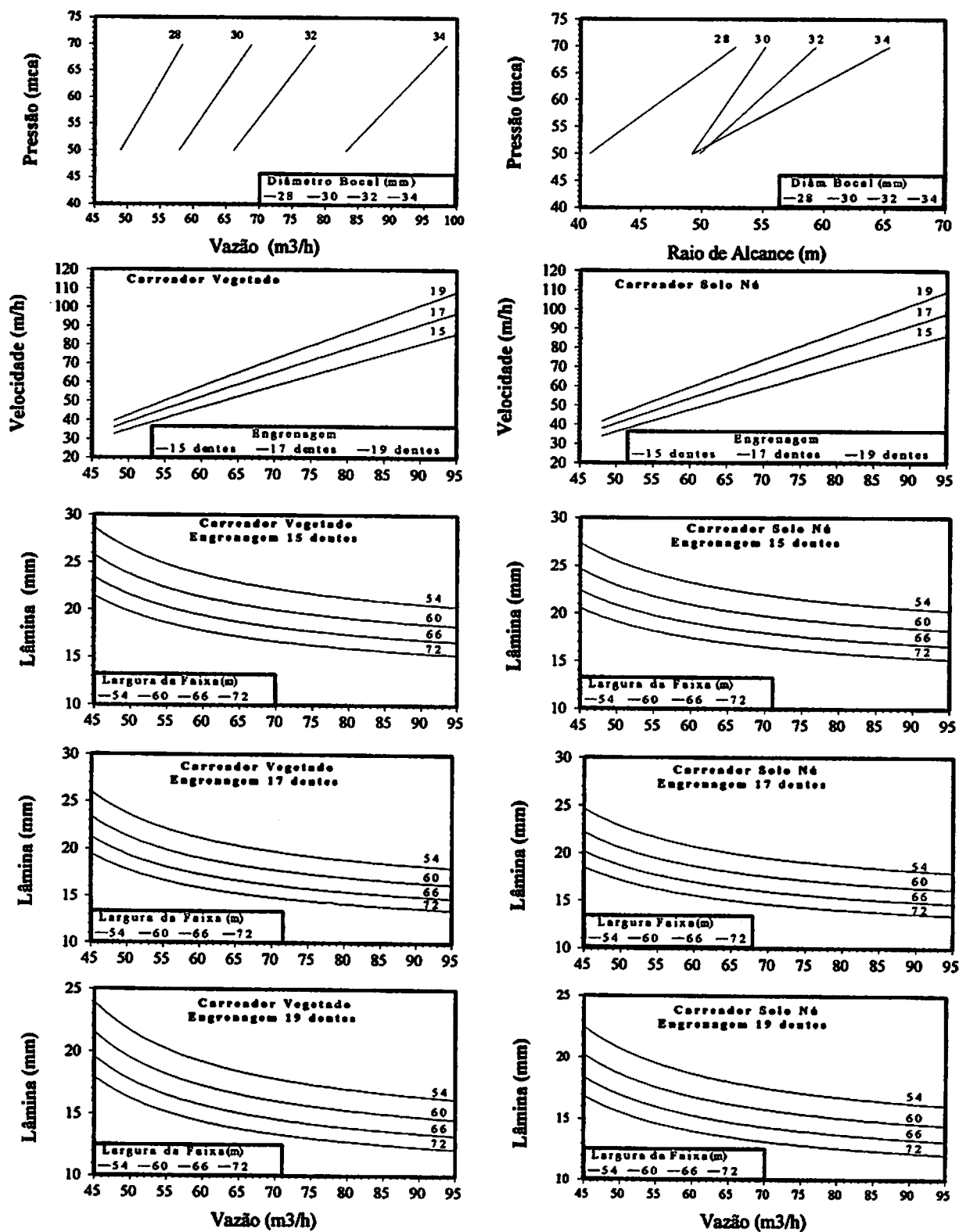


FIGURA 4.3 - Variações da pressão, velocidade e lâmina bruta aplicada em função da variação da vazão, e variação do raio de alcance do jato em função da pressão de serviço do aspersor para o autopropelido "Chuvisco" da ASBRASIL, equipado com o aspersor MEC-21.

## **5 CONCLUSÕES**

**Através do presente trabalho pode-se concluir que:**

- 1) O modelo matemático usado para dimensionar e simular a distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersores autopropelidos atende às necessidades de agilização de projeto, reduzindo o tempo gasto para se projetar.**

## **6 SUGESTÕES PARA O APERFEIÇOAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO**

- 1) Utilização de análise econômica para dimensionamento do sistema de irrigação.**
- 2) Fornecimento de uma lista com a relação de materiais do projeto.**
- 3) Simulação do escoamento superficial na área irrigada.**
- 4) Utilização de função de produção, para prever o retorno do capital empregado.**

**Acreditamos que, na atual fase, o programa pode ser uma ferramenta útil a projetistas, embora, pretenda-se dar continuidade buscando seu aprimoramento.**

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDINK, J.; KELLER, J.; PAIR, C. H.; SNEDO, R. E.; WOLFE, J. W. Design and operation of sprinkler systems. In: JENSEN, M. E., (ed). **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1983. cap. 15, p.654.
- ARENS, H. G. **Para o desempenho de bombas**. Revista DAE, v.49, n. 154, p.11-14, jan./mar. 1989.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: UFV, 1989. 596 p.
- BITTINGER, M. W.; LONGENBAUGH, R. A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.5, n.1, p.26-30, 1962.
- CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias. Bombas**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG/FUMARC. 1977. 353p.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124p. (Bulletin, 670).
- COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento autopropelido de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 120 p. (Tese - Mestrado em Irrigação e Drenagem).
- DAKER, A. **Captação, elevação e melhoramento da água. A água na agricultura**. 7. ed. Rio de Janeiro, 1987. v.2, 408 p.
- FARIA, M. A. de; VIEIRA, J. **Irrigação pos aspersão - sistemas mais usados no Brasil**. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, n.139, p.27-34, jul. 1986.
- FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; OLIVEIRA, A. S. **Ensaio de perda de carga em mangueira de 4 1/2" de diâmetro para a utilização em sistemas de irrigação por aspersão autopropelido**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 22 p.



- GRANT, T.W.; ANDERSON, W.C.; ROCHESTER, E.W. Constant and variable operating angle sprinklers of traveler irrigators. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.27, n.4, p.1106-1110, July/Aug. 1984.
- JAMES, L. G.. Effects of pump selection and terrain on center pivot performance. **Transactions of the American Society Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.21, n.1, p.366-372, 1984.
- KELLER, J; BLIESNER, R.D.. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: ed. AnaviBook/Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.
- NIELSEN, M. J. Análise de circuitos hidráulicos com bombas centrífugas - Método para estimativa analítica do ponto de funcionamento (vazão x altura manométrica). **Revista DAE**, v.16, n.147, p.385-386, dez. 1986.
- NOGUEIRA, C. E. C. **Modelo computacional para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional**. Viçosa: UFV, 1993. 68p.. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola).
- OLITTA, A. F. L. **Os Métodos de Irrigação**. São Paulo: Nobel, 1984. 267 p.
- ROCHESTER, E. W. Initial delay requirements in traveler irrigation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.26, n.1, p.137-140, 1983a.
- ROCHESTER, E. W. Water distributions with initial stationary sets in traveler irrigation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.26, n.4, p.1105-1108, 1983b.
- ROCHESTER, E. W.; HACKWELL, S. G.; YOO, K. H. Pressure vs. flow control in traveler irrigation evaluation. **Transactions of the American of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.32, n.6, p.2029-2034, Nov./Dec. 1989.
- ROCHESTER, E. W.; FLOOD, C. H.; HACKWELL, S. G. Pressure losses from hose coiling on hard-hose travelers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.33, n.3, p.834-838, May/June 1990.
- ROLLAND, L. **Mechanized sprinkler irrigation**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982. 409p.(FAO Irrigation and Drainage Paper, 35).
- ROSA, J.P. **Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação micro-autopropelido em diferentes condições de operação**. Viçosa: UFV, 1986. 78 p. (Tese de Mestrado).
- SCALOPPI, E. J.; COLOMBO, A. Dimensionamento de sistemas de irrigação com aspersores autopropelidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, Viçosa, 1995. **Anais...** Jaboticabal: FCAVJ/UNESP, 1995. 14p.

- SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v.102, n. HY5, p.657-665, May 1976.
- SOLOMON, K.; BEZDEK, J.C. Charactering sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. **Transactions of the American of Agricultural Enginners**, St. Joseph, v.23, n.4, p.899-906, July/Aug. 1980.
- TOU, J.T.; GONZALES, R.C. **Pattern recognition principles**. London: Addison-Wesley, 1974. 377p.
- ZAGGO, S. P.; COLOMBO, A.; GIL, O. F.; RESENDE, F. C. Características hidráulicas de mangueiras de borracha para utilização em sistemas de irrigação com aspersor autopropelido. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 17, Sorocaba, 1988. **Anais...** Sorocaba: CENEA/MA, 1988. 18p.

## **APÊNDICE**

**APÊNDICE - A**

**DADOS TÉCNICOS DO AUTOPROPELIDO CHUVISCO EQUIPADO COM ASPERSOR MEC-21  
CONFORME CATÁLOGO TÉCNICO**

<b>BOCAL (mm)</b>	<b>PRESSÃO (kPa)</b>	<b>VAZÃO (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Raio Irrigado (m)</b>
28,0 x 6,3	500	49,1	39
	550	51,1	45
	600	53,9	48
	650	56,1	51
	700	58,3	51
30,0 x 6,3	500	57,8	48
	550	60,6	51
	600	63,3	54
	650	65,9	54
	700	68,9	54
32,0 x 6,3	500	66,0	51
	550	69,2	51
	600	72,4	54
	650	75,4	57
	700	78,2	60
34,0 x 6,3	500	83,0	51
	550	87,1	51
	700	98,5	66

## APÊNDICE - B

## (ENSAIO 1)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 28 x 6,3 mm a uma pressão de 500 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL

MODELO: MEC-21

BOCAIS: 28 x 6,3 mm

PRESSÃO NA BASE: 500 kPa

VAZÃO: 49,1  $\text{m}^3/\text{h}$ 

DURAÇÃO ENSAIO: 60 min

VELOCIDADE: MÉDIA 1,9 km/h (MAX.: 3,9 MIN.: 0,4)

ESP. COLETORES: 6x6 m

DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	3	8	4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	52	70	76	58	63	33	20	0	0	0	0	0
0	0	0	0	34	56	64	46	77	73	73	75	67	48	0	0	0	0
0	0	0	23	37	60	58	66	57	187	57	70	75	76	32	0	0	0
0	0	5	37	70	67	60	50	68	127	73	70	80	75	52	3	0	0
0	0	16	49	74	59	66	72	85	115	90	83	84	91	50	10	0	0
0	0	26	65	48	71	79	76	84	106	109	97	85	78	80	37	0	0
0	0	25	68	73	67	86	86	48	41	140	113	93	90	78	50	0	0
0	0	26	37	53	65	79	85	78	99	130	78	96	88	69	18	0	0
0	0	14	48	56	52	70	83	93	105	110	84	78	81	52	8	0	0
0	0	3	47	43	49	55	70	75	76	73	74	61	66	28	7	0	0
0	0	1	27	34	41	35	56	49	46	60	59	64	43	20	0	0	0
0	0	0	14	16	27	36	40	36	39	47	60	45	20	0	0	0	0
0	0	0	0	3	42	31	29	41	35	37	18	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	12	13	28	20	10	11	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $50,25 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $50,25 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $107,25 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 171

LÂMINA TOTAL: 1222,56 mm

LÂMINA MÉDIA: 7,15 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 2)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 28 x 6,3 mm a uma pressão de 550 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL	MODELO: MEC-21	BOCAIS: 28 x 6,3 mm
PRESSÃO NA BASE: 550 kPa	VAZÃO: 51,5 $\text{m}^3/\text{h}$	DURAÇÃO ENSAIO: 60 min
VELOCIDADE: MÉDIA 2,6 km/h (MAX.: 6,5 MIN.: 0,1)		ESP. COLETORES: 6x6 m
DIÂM. COLETORES: 100 mm		

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	11	20	12	2	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	9	39	45	39	57	33	52	20	15	0	0	0	0	0
0	0	0	0	78	57	54	55	68	53	51	69	39	10	0	0	0	0
0	0	0	47	40	60	58	59	60	63	80	85	70	26	4	0	0	0
0	8	25	70	58	55	67	62	59	73	70	86	90	55	22	0	0	0
0	12	45	55	57	50	59	70	78	90	74	77	82	80	36	4	0	0
0	16	32	64	53	57	70	81	91	117	110	84	80	85	42	10	0	0
0	18	56	60	52	57	73	82	90	78	115	87	68	71	52	15	5	0
0	4	38	62	55	54	69	80	41	66	114	81	85	71	43	35	5	0
0	7	44	51	57	60	63	75	80	80	70	67	62	70	47	20	0	0
0	4	20	57	56	57	60	64	66	67	62	59	67	65	30	12	0	0
0	0	10	38	58	57	64	56	65	55	61	49	65	57	30	0	0	0
0	0	0	8	52	46	50	49	52	50	40	40	44	40	1	0	0	0
0	0	0	12	35	24	45	52	54	43	51	55	45	15	1	0	0	0
0	0	0	0	0	9	13	20	28	30	27	2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $50,00 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $50,00 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $94,00 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 187

LÂMINA TOTAL: 1194,55 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,39 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 3)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 28 x 6,3 mm a uma pressão de 600 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 28x6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 600 kPa                VAZÃO: 53,9  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 2,5 km/h (MAX.: 4,8 MIN.: 0,2)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	6	21	30	56	35	36	22	2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	12	19	49	57	55	49	55	44	47	15	5	0	0	0
0	0	0	28	35	37	37	45	51	59	58	61	54	58	25	3	0	0
0	0	4	31	35	40	51	44	57	60	66	60	62	53	52	14	0	0
0	0	30	41	45	45	52	64	81	83	97	67	66	52	47	49	9	0
0	0	34	36	30	50	69	75	76	80	67	75	59	60	55	50	22	0
0	0	20	41	46	55	77	83	82	64	75	75	62	59	62	60	31	0
0	0	23	36	46	50	73	99	81	35	95	96	67	62	52	65	44	0
0	0	37	48	59	61	73	94	104	95	71	74	56	58	53	44	36	0
0	0	14	45	46	63	66	87	80	85	81	62	56	53	41	47	33	0
0	0	6	22	51	63	68	73	70	66	57	59	53	49	46	74	2	0
0	0	0	20	34	49	68	64	69	60	61	58	58	66	13	15	0	0
0	0	0	4	13	16	42	59	51	56	59	52	37	44	27	0	0	0
0	0	0	0	1	17	23	29	30	41	48	32	33	24	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	7	18	14	14	13	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $45,75 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $45,75 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $93,00 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 193

LÂMINA TOTAL: 1185 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,14 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 4)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 28 x 6,3 mm a uma pressão de 650 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL

MODELO: MEC-21

BOCAIS: 28 x 6,3 mm

PRESSÃO NA BASE: 650 kPa

VAZÃO: 56,1  $\text{m}^3/\text{h}$

DURAÇÃO ENSAIO: 60 min

VELOCIDADE: MÉDIA 2,1  $\text{km/h}$  (MAX.: 4,2 MIN.: 0,0)

ESP. COLETORES: 6x6 m

DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3	16	29	29	43	35	8	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	22	40	39	56	54	63	46	67	33	12	0	0	0	0
0	0	1	23	55	59	63	54	60	59	54	72	42	15	0	0	0	0
0	0	10	54	59	63	51	58	59	59	61	47	69	44	37	9	0	0
0	7	46	52	59	57	53	52	63	60	62	55	50	62	51	36	8	0
0	17	43	54	50	59	58	68	70	75	80	57	68	60	62	42	7	0
0	27	50	50	53	57	66	62	76	83	77	82	67	67	62	57	7	0
1	35	56	56	58	62	66	67	42	56	97	95	72	66	69	69	20	0
0	36	33	37	52	64	65	67	59	73	90	86	67	67	57	55	32	0
0	14	48	60	40	59	61	60	61	72	81	70	61	62	60	41	15	0
0	11	41	38	51	49	57	61	62	66	67	67	64	58	42	36	5	0
0	0	27	50	41	54	49	48	49	50	50	54	73	58	35	18	0	0
0	0	13	38	53	45	54	35	50	39	54	50	58	53	33	4	0	0
0	0	0	12	21	22	28	40	46	34	45	41	31	19	22	0	0	0
0	0	0	0	9	25	41	42	20	19	29	21	27	8	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	10	12	10	9	7	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $36,50 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $36,50 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $86,50 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 215

LÂMINA TOTAL: 1265,09

LÂMINA MÉDIA: 5,88 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.



## APÊNDICE - B

(ENSAIO 5)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 28 x 6,3 mm a uma pressão de 700 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 28 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 700 kPa                      VAZÃO: 58,3  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 0,8  $\text{km}/\text{h}$  (MAX.: 2,1 MIN.: 0,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	5	9	7	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	24	32	45	42	61	29	21	16	0	0	0	0
0	0	0	6	14	35	38	47	53	44	42	60	52	28	1	0	0
0	0	0	40	46	58	46	48	58	49	64	50	42	35	24	11	0
0	2	21	46	51	52	54	56	62	62	57	53	49	39	36	25	0
0	11	30	51	45	56	56	67	76	75	66	64	49	45	48	31	18
0	16	37	55	47	54	69	78	80	84	83	71	66	60	49	52	25
0	31	52	53	51	58	80	71	77	78	72	81	65	57	65	49	39
2	33	43	56	59	59	81	75	64	75	81	76	84	72	59	54	45
11	42	43	47	55	67	73	74	56	61	78	85	88	72	59	48	53
8	35	49	50	49	64	76	63	69	72	75	81	67	63	57	52	42
0	14	55	48	54	53	63	74	71	69	80	73	66	112	60	45	35
0	11	36	37	53	55	46	57	68	69	59	65	52	57	44	28	22
0	0	21	33	57	50	54	50	48	63	53	49	47	40	50	32	2
0	0	2	40	34	31	29	43	39	49	44	48	40	32	22	6	0
0	0	0	1	27	40	38	42	36	36	52	37	42	23	2	0	0
0	0	0	0	0	2	25	38	31	25	34	39	16	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	4	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $36,50 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $36,00 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $105,00 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 240

LÂMINA TOTAL: 1418,13

LÂMINA MÉDIA: 5,91 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 6)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 30 x 6,3 mm a uma pressão de 500 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 30 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 500 Kpa                      VAZÃO: 57,8  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 1,6 km/h (MAX.: 4,1 MIN.: 0,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	14	16	18	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	7	34	31	20	82	54	60	17	13	2	0	0	0	0
0	0	15	40	48	59	56	40	70	80	79	73	45	42	7	0	0	0
0	2	33	69	58	50	55	64	66	74	75	87	76	61	66	0	0	0
0	20	23	59	51	50	56	87	85	68	69	70	73	79	49	18	0	0
0	36	66	50	58	48	75	74	100	94	72	62	62	73	53	35	5	0
0	40	82	68	41	57	74	91	52	108	92	78	60	74	66	55	23	0
0	35	50	48	47	60	71	94	68	70	101	80	55	52	76	74	40	0
0	38	55	59	59	65	75	80	102	60	96	75	63	55	73	63	40	0
10	19	45	71	65	68	60	75	82	107	95	78	61	66	61	80	18	0
0	0	47	38	61	66	79	72	77	85	78	70	62	63	69	60	26	0
0	0	7	17	39	52	70	73	67	73	68	70	72	90	60	39	2	0
0	0	0	16	32	38	47	71	68	67	69	81	64	66	18	8	0	0
0	0	0	0	7	32	53	49	41	71	83	82	50	24	17	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	8	24	55	50	37	44	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	16	0	0	0	0	0	0	0
									0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
 1,5 m ( $38,25 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $38,25 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $95,75 \text{ cm}^3$ )  
 Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 204  
 LÂMINA TOTAL: 1445,51 mm  
 LÂMINA MÉDIA: 7,09 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 7)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 30 x 6,3 mm a uma pressão de 550 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 30 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 550 kPa                      VAZÃO: 53,9  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 3,3 km/h (MAX.: 5,9 MIN.: 1,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	12	7	20	4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	10	20	44	56	58	71	53	31	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	59	56	76	60	57	56	64	67	36	25	2	0	0	0
0	0	6	43	75	58	55	55	67	63	70	70	70	40	17	0	0	0
0	1	13	89	85	55	60	52	61	64	68	81	86	63	35	4	0	0
0	4	37	76	74	65	61	57	56	54	67	84	102	77	40	20	1	0
0	6	59	67	74	58	61	110	72	81	77	82	99	89	58	22	1	0
0	32	58	68	66	57	76	82	77	112	122	89	102	94	73	28	8	0
0	23	51	73	70	63	65	90	47	66	140	89	99	87	80	40	10	0
0	30	58	70	68	58	69	82	88	100	112	85	89	89	56	28	10	0
0	12	49	77	72	68	60	72	81	92	86	70	78	74	53	39	0	0
0	5	31	63	64	68	65	58	61	64	60	70	70	59	46	31	0	0
0	0	8	52	67	62	64	50	53	47	54	61	75	48	41	11	0	0
0	0	7	19	39	45	57	53	51	43	46	61	50	37	12	0	0	0
0	0	0	2	17	29	56	48	41	50	59	46	27	25	1	0	0	0
0	0	0	0	3	18	15	26	41	29	30	23	16	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	13	2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $65,50 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $65,50 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $96,50 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES: 215

LÂMINA TOTAL: 1441,43 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,7 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 8)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 30 x 6,3 mm a uma pressão de 600 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 30 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 600 kpa                      VAZÃO: 63,3  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 0,1 km/h (MAX.: 0,3 MIN.: 0,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	1	18	39	47	35	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	12	40	77	67	57	57	54	52	41	15	0	0	0
0	0	0	39	46	41	45	52	68	53	60	58	72	59	30	0	0
0	0	24	49	42	38	47	60	64	57	58	62	55	62	60	49	0
0	17	49	49	50	57	46	56	51	59	57	55	62	64	55	52	13
0	39	54	49	59	53	57	54	56	55	56	54	61	62	63	69	61
17	45	49	51	54	47	56	63	64	65	71	58	59	57	55	64	67
23	53	57	54	56	54	69	55	71	74	66	77	60	60	62	63	56
32	68	60	66	65	61	71	76	46	47	86	82	57	62	65	52	42
40	54	60	58	54	55	68	78	58	60	82	79	56	58	67	52	62
24	52	56	67	59	58	73	62	72	74	71	76	55	64	64	71	45
5	50	55	57	63	49	56	69	70	71	67	54	59	60	51	47	27
0	40	55	48	54	54	50	49	53	53	51	55	56	53	63	44	24
0	19	39	50	52	62	51	53	53	53	52	57	62	51	65	43	10
0	0	37	48	51	38	43	55	54	56	52	62	58	42	47	29	0
0	0	0	25	68	37	48	55	63	61	53	60	54	25	9	0	0
0	0	0	0	27	22	42	49	46	60	49	37	40	17	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	17	18	25	12	14	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:

1,5 m ( $28,25 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $28,25 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $84,75 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 256

LÂMINA TOTAL: 1660,69 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,49 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da tese.





## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 11)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 32 x 6,3 mm a uma pressão de 500 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 32 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 500 kPa                      VAZÃO: 66,0  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 2,8 km/h (MAX.: 5,9 MIN.: 1,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	26	15	32	69	20	3	0	7	0	0	0	0	0
0	0	0	0	44	88	57	55	66	65	67	62	44	57	0	0	0	0	0
0	0	0	23	70	67	74	88	72	53	65	62	75	52	6	0	0	0	0
0	0	66	82	58	77	66	71	55	49	53	58	68	36	35	14	0	0	0
0	19	67	85	80	60	61	45	50	44	52	53	78	58	50	21	0	0	0
0	43	95	83	68	65	51	53	63	75	76	66	53	61	79	47	6	0	0
1	62	66	62	71	58	70	76	80	90	80	56	48	52	63	58	18	0	0
20	55	66	71	63	62	85	91	42	90	88	62	54	60	66	49	27	0	0
20	49	58	72	64	63	91	94	49	79	101	67	64	63	55	46	30	0	0
13	68	74	70	58	59	75	99	126	125	75	62	63	69	45	71	5	0	0
0	36	86	66	74	73	68	75	81	74	65	49	79	73	43	39	17	0	0
0	18	71	91	81	75	72	67	73	71	70	70	57	61	49	18	0	0	0
0	0	57	75	78	80	72	79	76	74	79	79	64	75	14	2	0	0	0
0	0	9	28	58	79	60	72	66	83	72	53	45	22	34	0	0	0	0
0	0	0	2	17	39	44	50	48	45	38	22	18	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	9	17	23	27	5	9	6	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
 1,5 m ( $46,00 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $46,00 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $90,00 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 221

LÂMINA TOTAL: 1570,8 mm

LÂMINA MÉDIA: 7,11 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.





**APÊNDICE - B****(ENSAIO 13)**

Volume de água em cm<sup>3</sup> coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 32 x 6,3 mm a uma pressão de 600 kPa.

**FABRICANTE:** ASBRASIL**MODELO:** MEC-21**BOCAIS:** 32 x 6,3 mm**PRESSÃO NA BASE:** 600 kPa**VAZÃO:** 72,4 m<sup>3</sup>/h**DURAÇÃO ENSAIO:** 60 min**VELOCIDADE:** MÉDIA 1,2 km/h (MAX.: 2,2 MIN.: 0,0)**ESP. COLETORES:** 6x6 m**DIÂM. COLETORES:** 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12	43	22	19	34	11	3	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	29	54	54	80	57	49	60	54	52	18	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3	31	83	53	74	62	61	66	67	60	46	55	16	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	48	55	73	57	61	60	62	53	54	51	54	57	41	33	0	0	0	0
0	0	0	0	18	66	76	55	54	56	52	62	58	58	54	74	43	52	59	25	0	0	0
0	0	0	0	50	56	56	60	56	54	55	53	57	56	50	46	51	44	38	53	1	0	0
0	0	0	18	63	45	55	57	50	55	71	81	70	74	53	63	51	52	64	40	14	0	0
0	0	0	51	62	55	50	51	49	64	76	94	90	77	65	55	53	50	60	67	42	0	0
0	0	0	45	58	61	61	52	52	69	85	42	65	94	77	53	56	55	52	55	42	0	0
0	0	0	45	60	62	54	58	54	71	88	45	64	96	85	60	57	70	59	54	35	0	0
0	0	0	47	69	66	61	55	52	64	65	79	79	80	79	63	68	67	75	53	60	0	0
0	0	0	8	53	81	65	59	51	52	52	57	56	55	54	62	66	62	61	63	2	0	0
0	0	0	0	30	40	42	56	60	46	46	52	54	49	57	70	70	75	63	29	0	0	0
0	0	0	0	5	49	61	57	55	47	51	56	56	50	51	52	47	76	49	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3	37	52	50	59	49	56	45	42	69	50	43	37	9	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	8	31	49	42	65	42	40	73	33	58	26	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	7	36	36	22	28	54	43	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:**  
1,5 m (27,50 cm<sup>3</sup>); 3,0 m (27,50 cm<sup>3</sup>) E 6,0 m (94,25 cm<sup>3</sup>)

**Nº DE COLETORES CONSIDERADOS:** 268

**LÂMINA TOTAL:** 1804,18 mm

**LÂMINA MÉDIA:** 6,73 mm

**FONTE:** Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 14)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 32 x 6,3 mm a uma pressão de 650 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL

MODELO: MEC-21

BOCAIS: 32 x 6,3 mm

PRESSÃO NA BASE: 650 kPa

VAZÃO: 75,4  $\text{m}^3/\text{h}$

DURAÇÃO ENSAIO: 60 min

VELOCIDADE: MÉDIA 1,5 km/h (MAX.: 4,2 MIN.: 0,0)

ESP. COLETORES: 6x6 m

DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	18	31	38	43	59	32	34	12	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	9	27	41	49	62	49	55	62	53	47	57	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	8	35	40	64	51	67	56	50	67	60	58	53	63	19	0	0	0	0	0
0	0	0	2	28	54	56	58	51	52	56	60	50	51	63	49	65	52	9	0	0	0	0
0	0	0	13	42	58	63	59	54	58	61	61	62	55	56	61	69	67	44	0	0	0	0
0	0	0	7	35	56	70	57	57	55	51	59	58	71	54	57	49	55	43	78	5	0	0
0	0	0	15	49	54	49	50	49	60	70	80	72	73	60	58	54	60	75	46	38	0	0
0	0	0	12	60	54	50	50	53	71	82	86	80	64	64	53	51	61	65	64	30	4	0
0	0	0	22	48	50	62	55	59	72	94	79	55	78	59	56	55	60	58	75	62	17	0
0	0	0	23	56	64	57	58	60	80	111	69	37	88	65	64	60	74	74	63	47	15	0
0	0	0	19	47	65	68	60	64	72	96	102	92	75	66	55	65	70	74	62	60	3	0
0	0	0	7	45	57	70	64	59	65	82	81	76	69	70	57	71	78	79	80	46	0	0
0	0	0	5	20	70	68	65	64	60	63	60	63	58	60	60	59	71	68	73	38	0	0
0	0	0	18	46	67	77	68	61	55	59	54	54	55	62	66	61	76	70	61	9	0	0
0	0	0	2	29	61	67	69	70	58	54	53	59	60	68	65	65	67	44	0	0	0	0
0	0	0	9	16	26	47	64	65	61	61	61	61	60	69	75	64	61	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	22	44	53	55	65	56	68	48	58	44	30	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	20	33	41	38	36	43	53	14	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
1,5 m (37,25  $\text{cm}^3$ ); 3,0 m (37,25  $\text{cm}^3$ ) E 6,0 m (92,50  $\text{cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 286

LÂMINA TOTAL: 1930,1 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,75 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.

**APÊNDICE - B****(ENSAIO 15)**

Volume de água em cm<sup>3</sup> coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 32 x 6,3 mm a uma pressão de 700 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL

MODELO:MEC-21

BOCAIS:32 x 6,3 mm

PRESSÃO NA BASE: 700 kPa

VAZÃO: 78,2 m<sup>3</sup>/h

DURAÇÃO ENSAIO: 60 min

VELOCIDADE: MÉDIA 1,1 km/h (MAX.: 3,7 MIN.: 0,0)

ESP. COLETORES: 6x6 m

DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	6	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	19	50	62	45	52	47	51	63	43	25	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	35	40	41	51	50	46	47	51	65	69	60	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	37	43	37	55	42	39	46	45	60	60	74	47	72	63	1	0	0	0	0
0	0	0	25	66	46	49	46	43	45	45	43	50	67	72	64	69	64	61	33	0	0	0
0	0	0	5	53	66	54	49	48	46	46	52	59	61	63	69	54	51	54	59	0	0	0
0	0	0	21	48	54	50	41	45	46	52	51	54	58	62	67	61	73	65	45	46	0	0
0	0	0	44	47	55	52	51	50	60	60	59	55	69	59	60	58	59	54	60	38	11	0
0	0	4	47	59	52	57	52	57	72	63	73	83	72	67	66	59	69	48	69	90	30	0
0	0	7	46	52	55	55	54	58	74	85	58	45	84	69	68	61	65	72	77	69	28	0
0	0	5	60	75	67	55	51	59	74	90	74	45	89	75	73	62	64	62	58	66	30	0
0	0	5	34	54	71	50	59	56	71	75	88	87	69	70	57	61	65	50	77	43	19	0
0	0	0	42	55	46	60	58	58	56	70	73	74	72	58	56	55	49	55	64	55	10	0
0	0	0	20	44	64	67	59	56	55	60	60	58	53	60	61	53	52	59	65	35	0	0
0	0	0	3	38	34	49	53	55	52	59	50	51	50	55	56	62	68	70	55	20	0	0
0	0	0	0	11	35	46	62	66	56	54	44	46	54	54	57	70	76	70	30	0	0	0
0	0	0	0	0	16	42	49	42	52	54	48	49	55	66	49	64	67	19	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	25	15	52	55	50	54	49	52	53	57	32	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	34	50	42	52	44	25	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
1,5 m (27,00 cm<sup>3</sup>); 3,0 m (27,00 cm<sup>3</sup>) E 6,0 m (87,25 cm<sup>3</sup>)

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 301

LÂMINA TOTAL: 1977,09 mm

LÂMINA MÉDIA: 6,57 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.

## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 16)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 34 x 6,3 mm a uma pressão de 500 kPa.

FABRICANTE: ASBRASIL                      MODELO: MEC-21                      BOCAIS: 34 x 6,3 mm  
 PRESSÃO NA BASE: 500 kPa                      VAZÃO: 83,0  $\text{m}^3/\text{h}$                       DURAÇÃO ENSAIO: 60 min  
 VELOCIDADE: MÉDIA 1,4  $\text{km/h}$  (MAX.: 3,8 MIN.: 1,0)                      ESP. COLETORES: 6x6 m  
 DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	5	49	54	87	78	13	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	16	45	78	98	89	98	96	108	81	8	2	0	0	0
0	0	0	49	72	72	69	90	85	75	59	50	131	39	86	0	0	0
0	0	29	87	64	78	76	77	78	63	94	78	110	90	66	50	8	0
0	11	40	68	86	76	75	66	69	94	83	72	96	72	87	52	45	0
0	85	82	99	74	83	73	62	53	58	60	58	66	81	63	88	66	3
19	68	92	81	73	75	68	66	75	78	61	59	63	80	73	80	85	23
18	54	90	61	69	71	70	83	94	99	83	72	58	67	90	74	98	52
23	44	80	57	62	65	72	92	60	38	117	95	71	88	123	146	130	88
45	60	52	58	58	62	73	113	82	65	152	108	73	74	103	110	69	72
23	52	75	78	60	62	62	80	108	135	106	69	64	95	82	115	125	47
1	54	45	67	69	63	59	64	70	75	71	72	70	80	81	73	64	35
0	48	68	71	72	78	63	62	68	70	77	75	73	94	104	94	31	0
0	16	55	49	80	75	70	64	64	75	74	70	83	75	65	45	19	0
0	0	20	74	92	77	68	65	80	78	77	84	90	48	41	30	0	0
0	0	0	23	63	58	60	76	73	87	73	64	58	37	28	0	0	0
0	0	0	0	9	31	73	40	48	43	38	29	14	14	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	21	2	18	15	6	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
 1,5 m ( $43,50 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $43,50 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $93,75 \text{ cm}^3$ )  
 Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 259  
 LÂMINA TOTAL: 2203,21 mm  
 LÂMINA MÉDIA: 8,51 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.



## APÊNDICE - B

### (ENSAIO 18)

Volume de água em  $\text{cm}^3$  coletado no teste do aspersor MEC-21, com bocal de 34 x 6,3 mm a uma pressão de 700 kPa

FABRICANTE: ASBRASIL

MODELO: MEC-21

BOCAIS: 34x6,3 mm

PRESSÃO NA BASE: 700 kPa

VAZÃO: 98,5  $\text{m}^3/\text{h}$

DURAÇÃO ENSAIO: 60 min

VELOCIDADE: MÉDIA 3,1  $\text{km/h}$  (MAX.: 4,7 MIN.: 0,6)

ESP. COLETORES: 6x6 m

DIÂM. COLETORES: 100 mm

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	33	23	29	34	5	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	9	46	56	44	58	63	81	76	62	70	38	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	38	46	44	59	53	62	75	78	82	90	82	55	17	0	0	0	0
0	0	0	0	14	46	63	53	52	48	56	67	61	72	78	71	80	98	84	12	0	0	0
0	0	0	0	22	53	57	55	57	56	52	66	62	64	62	76	75	81	77	53	0	0	0
0	0	0	19	40	41	48	62	53	58	61	64	61	58	60	65	67	65	85	81	38	0	0
0	0	0	25	62	67	62	48	53	56	56	56	58	57	57	58	60	66	72	80	91	10	0
0	0	0	40	60	70	57	54	54	54	54	62	71	59	46	52	57	62	66	78	89	48	0
0	0	2	45	64	69	62	61	56	53	80	98	82	78	53	39	49	56	59	75	84	47	0
0	0	18	44	70	78	63	60	62	62	121	76	75	77	78	36	41	60	60	75	75	66	0
0	0	11	47	74	81	71	73	70	74	139	67	29	69	71	40	42	49	58	77	80	75	1
0	0	10	42	74	76	73	75	72	74	135	136	83	72	60	37	44	62	62	69	74	66	0
0	0	0	35	61	92	88	81	74	67	73	102	82	62	44	41	48	56	56	70	68	77	0
0	0	0	16	58	82	78	76	73	72	67	56	59	48	48	50	53	69	58	67	77	50	0
0	0	0	0	40	81	85	82	70	74	66	63	57	56	56	54	54	62	61	76	59	7	0
0	0	0	0	25	64	84	89	83	76	69	67	60	61	54	57	70	60	80	65	50	0	0
0	0	0	0	5	22	67	82	88	85	79	67	58	67	62	66	61	66	78	72	15	0	0
0	0	0	0	0	4	25	57	89	85	80	85	70	67	73	72	69	77	48	15	0	0	0
0	0	0	0	0	0	9	6	51	62	76	78	66	60	64	62	66	48	13	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	6	22	36	60	58	66	66	61	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	7	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VOLUMES COLETADOS NOS COLETORES AUXILIARES SITUADOS A:  
1,5 m ( $40,75 \text{ cm}^3$ ); 3,0 m ( $40,75 \text{ cm}^3$ ) E 6,0 m ( $84,75 \text{ cm}^3$ )

Nº DE COLETORES CONSIDERADOS: 330

LÂMINA TOTAL: 2493 mm

LÂMINA MÉDIA: 7,55 mm

FONTE: Dados cedidos por Colombo (1991), não apresentados no corpo da Tese.

## APÊNDICE - C

Perfis adimensionais gerados a partir dos ensaios apresentados no apêndice B.

dist. adm.	Ens. 1	Ens. 2	Ens. 3	Ens. 4	Ens. 5	Ens. 6	Ens. 7	Ens. 8	Ens. 9	Ens. 10	Ens. 11	Ens. 12	Ens. 13	Ens. 14	Ens. 15	Ens. 16	Ens. 17	Ens. 18
0,025	0,965	1,210	1,052	0,833	0,783	0,726	1,416	0,578	0,715	0,726	0,923	1,119	0,584	0,740	0,541	0,676	0,785	0,788
0,075	1,076	1,513	1,317	1,154	1,225	0,995	1,584	1,037	1,300	1,226	1,226	1,208	1,094	1,258	1,195	0,928	1,219	1,370
0,125	1,942	2,276	2,132	1,949	2,151	1,823	2,094	1,693	1,940	1,696	1,840	1,850	1,839	1,830	1,735	1,537	1,816	1,835
0,175	2,019	2,292	2,056	1,784	1,675	1,879	2,123	1,555	1,775	1,579	1,984	1,967	1,715	1,754	1,614	1,748	1,843	1,831
0,225	1,944	2,132	1,893	1,655	1,539	1,752	1,997	1,327	1,492	1,445	1,735	1,641	1,484	1,550	1,395	1,407	1,520	1,512
0,275	1,820	1,937	1,602	1,634	1,609	1,588	1,683	1,451	1,633	1,438	1,541	1,461	1,438	1,435	1,383	1,261	1,262	1,157
0,325	1,714	1,745	1,835	1,618	1,690	1,508	1,618	1,411	1,682	1,289	1,350	1,247	1,294	1,322	1,287	1,036	1,125	1,044
0,375	1,546	1,621	1,668	1,492	1,606	1,390	1,500	1,186	1,446	1,160	1,243	1,166	1,098	1,187	1,164	1,012	1,095	1,077
0,425	1,469	1,549	1,417	1,356	1,413	1,221	1,440	1,115	1,286	1,169	1,164	1,170	1,094	1,133	1,125	1,012	1,190	1,128
0,475	1,364	1,557	1,341	1,294	1,287	1,209	1,511	1,119	1,131	1,202	1,289	1,157	1,118	1,139	1,109	1,074	1,229	1,183
0,525	1,211	1,470	1,336	1,284	1,277	1,203	1,428	1,160	1,137	1,226	1,304	1,275	1,076	1,170	1,085	1,140	1,297	1,191
0,575	1,292	1,583	1,251	1,307	1,201	1,287	1,519	1,175	1,143	1,274	1,374	1,286	1,154	1,178	1,103	1,181	1,318	1,273
0,625	1,148	1,406	1,204	1,197	1,143	1,313	1,352	1,192	1,167	1,255	1,382	1,239	1,143	1,241	1,135	1,231	1,436	1,331
0,675	1,193	1,290	1,158	1,239	1,061	1,290	1,266	1,103	1,110	1,244	1,319	1,283	1,121	1,272	1,075	1,199	1,361	1,359
0,725	1,132	1,198	1,053	1,132	1,005	1,215	1,137	1,193	1,029	1,250	1,237	1,198	1,219	1,256	1,171	1,271	1,377	1,346
0,775	0,923	0,830	1,029	1,055	1,010	1,049	0,903	1,066	1,085	1,263	1,156	1,220	1,088	1,184	1,166	1,105	1,206	1,332
0,825	0,741	0,534	0,777	0,904	0,818	0,862	0,625	1,114	0,928	1,093	0,946	0,972	1,121	1,006	0,967	1,149	0,872	1,104
0,875	0,561	0,246	0,469	0,668	0,782	0,650	0,363	0,918	0,880	0,794	0,470	0,733	1,000	0,709	0,981	0,877	0,629	0,700
0,925	0,364	0,048	0,226	0,272	0,428	0,366	0,113	0,636	0,448	0,270	0,212	0,308	0,510	0,395	0,639	0,689	0,238	0,274
0,975	0,054	0,022	0,079	0,054	0,147	0,077	0,042	0,088	0,049	0,069	0,034	0,071	0,041	0,066	0,194	0,141	0,019	0,066

dist. adm. - distância adimensional

- Ens. 1 - Bocal 28 x 6,3 mm e Pressão de 500 kPa
- Ens. 2 - Bocal 28 x 6,3 mm e Pressão de 550 kPa
- Ens. 3 - Bocal 28 x 6,3 mm e Pressão de 600 kPa
- Ens. 4 - Bocal 28 x 6,3 mm e Pressão de 650 kPa
- Ens. 5 - Bocal 28 x 6,3 mm e Pressão de 700 kPa
- Ens. 6 - Bocal 30 x 6,3 mm e Pressão de 500 kPa
- Ens. 7 - Bocal 30 x 6,3 mm e Pressão de 550 kPa
- Ens. 8 - Bocal 30 x 6,3 mm e Pressão de 600 kPa
- Ens. 9 - Bocal 30 x 6,3 mm e Pressão de 650 kPa
- Ens. 10 - Bocal 30 x 6,3 mm e Pressão de 700 kPa
- Ens. 11 - Bocal 32 x 6,3 mm e Pressão de 500 kPa
- Ens. 12 - Bocal 32 x 6,3 mm e Pressão de 550 kPa
- Ens. 13 - Bocal 32 x 6,3 mm e Pressão de 600 kPa
- Ens. 14 - Bocal 32 x 6,3 mm e Pressão de 650 kPa
- Ens. 15 - Bocal 32 x 6,3 mm e Pressão de 700 kPa
- Ens. 16 - Bocal 34 x 6,3 mm e Pressão de 500 kPa
- Ens. 17 - Bocal 34 x 6,3 mm e Pressão de 550 kPa
- Ens. 18 - Bocal 34 x 6,3 mm e Pressão de 700 kPa