**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Metodologia e aplicativo de dimensionamento para um sistema
de pulverização acoplável a pivô central - Notliada**

Marcelo Aguiar Abritta

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

**Piracicaba
2011**

Marcelo Aguiar Abritta
Engenheiro Agrônomo

**Metodologia e aplicativo de dimensionamento para um sistema de
pulverização acoplável a pivô central - Notliada**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Abritta, Marcelo Aguiar

Metodologia e aplicativo de dimensionamento para um sistema de pulverização
acoplável a pivô central - Notliada / Marcelo Aguiar Abritta. - - Piracicaba, 2011.
103 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Automação 2. Irrigação por pivô central 3. Pesticidas - Aplicações 4. Quimigação
5. Tecnologia agrícola I. Título

CDD 631.7
A163m

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais, Roberto e Silvia, e à minha irmã Daniela, pelo apoio incondicional e amor dedicado

OFEREÇO

Aos meus queridos avós: Maria, Geraldo, Luzia e Ednan

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Durval Dourado Neto, por compartilhar sua visão única da agricultura ao me orientar, desde os tempos de graduação, sua presença foi fundamental para meu desenvolvimento profissional.

Ao Professor Casimiro Dias Gadanha Junior, pela orientação e disponibilização das instalações do laboratório de tecnologia de aplicação de defensivos.

Aos Professores José Antônio Frizzzone, Marcos Vinícius Folegatti e Tarlei Arriel Botrel, pela concessão do espaço de trabalho e ensinamentos concedidos dentro e fora da sala de aula.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado.

À minha namorada Marilisa, pelo amor e amizade dedicados.

Aos meus companheiros de morada e grandes amigos, Everaldo da Silva Moreira e Rafael Maschio.

À famigerada Lena, pela amizade, paciência e carinho.

Ao analista de sistemas Luis Carlos Lopes Júnior, pela ajuda na organização do código fonte.

Às secretárias, Davilmar Aparecida Domingues Colevatti, Sandra Regina T. Silveira Mello e Beatriz Regina Novaes pela ajuda, apoio e organização.

À bibliotecária Eliana Maria Garcia pela ajuda na revisão e formatação da dissertação.

À Família K-labouço, presente desde os primórdios da vida esalqueana, a convivência com meus irmãos de república sempre estará presente em minha memória, na forma dos bons momentos que passamos juntos.

EPÍGRAFE

"Lembre-se sempre que você é absolutamente único.
Assim como todos os outros."

Margaret Mead

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS.....	21
LISTA DE SÍMBOLOS.....	23
1 INTRODUÇÃO	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Irrigação por pivô central	29
2.2 Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas	30
2.3 Tecnologia de aplicação de defensivos em sistemas irrigados	34
2.3.1 Quimigação	34
2.3.2 Sistemas de pulverização acopláveis a pivô central	36
2.3.3 Aplicação por pulsos	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 Localização e etapas do experimento	41
3.2 Caracterização dos emissores	41
3.2.1 Diâmetro do bocal	42
3.2.2 Distribuição do emissor	42
3.3 Determinação do espaçamento máximo entre emissores.....	44
3.3.1 Coeficiente de variação de fabricação	45
3.3.2 Curvas de vazão <i>versus</i> pressão	46
3.4 Dimensionamento do sistema de pulverização acoplável	47
3.4.1 Cálculo da intensidade de aplicação mínima da barra	47
3.4.2 Cálculo dos espaçamentos consecutivos na barra de pulverização	49
3.4.3 Diâmetros equivalentes nas junções da tubulação telescópica.....	52
3.4.4 Ciclo de trabalho da válvula solenóide	53
3.5 Cenários de dimensionamento	54
3.6 Determinação da uniformidade estatística final do dimensionamento.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57

4.1 Distribuição do emissor e espaçamento máximo	57
4.2 Características do emissor	63
4.3 Aplicativo de dimensionamento	65
4.4 Resultados do dimensionamento.....	68
4.5 Considerações gerais	76
4.5.1 Características dos emissores	76
4.5.2 Construção de um protótipo.....	76
4.5.3 Agricultura de precisão	76
4.6 Considerações finais.....	77
4.6.1 Cenários de dimensionamento	77
4.6.2 Inovações	77
5 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS	81
ANEXOS.....	85

RESUMO

Metodologia e aplicativo de dimensionamento para um sistema de pulverização acoplável a pivô central - Notliada

A aplicação de defensivos é um dos fatores de maior impacto em um sistema de produção agrícola, para o sucesso dessa prática o sistema de pulverização deve alocar o princípio ativo no alvo com eficiência e custo reduzido. Em uma área irrigada por pivô central o agricultor possui como alternativas para a aplicação de agroquímicos a pulverização tratorizada, aplicação aérea, quimigação e sistemas de pulverização acoplados ao equipamento de irrigação. Com o intuito de diminuir o custo fixo envolvido na implantação de um sistema de pulverização acoplado foi desenvolvida uma metodologia de dimensionamento, um aplicativo com as rotinas de cálculo e sugeridos novos modelos de emissor, que possuem válvulas anti gotas integradas, também estudados neste trabalho. São comparados quatro cenários para o dimensionamento: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis. As principais inovações do novo desenho do sistema são barras com a metade do comprimento de outros equipamentos acopláveis, de diâmetro telescópico, e o dimensionamento específico para cada torre. Os cenários com barras intercambiáveis obtiveram uniformidades estatísticas no limiar das faixas excelente e muito bom, mas apresentaram amplitudes entre a calda máxima e mínima aplicada da ordem de 60 L ha^{-1} , favorecendo a adoção de sistemas com barras exclusivas. O aplicativo pode utilizar quaisquer modelos de emissor conhecidos pelo usuário exportando os resultados para um arquivo com valores separados por vírgula

Palavras-chave: Tecnologia de aplicação de defensivos; Aplicação por pulsos; Notliada; *Object Pascal*

ABSTRACT

Method and software to design a pivot attached spray system - Notliada

Chemical application is a major factor into agricultural systems, to be succeeded in this practice the application system must allocate the active ingredient on target with efficiency and at low costs. In a center pivot irrigation area a farmer have some alternatives for chemical application as tractor mounted sprayers, aerial application, chemigation and pivot attached spray systems. Aiming lower deploying costs of a spray system coupled to the irrigation device, a design method and a software have been developed. New emitter models, which have built-in no leakage valves was also studied in this work. Four design scenarios have been studied: (a) interchangeable PVC spray boom; (b) unique PVC spray boom for each tower; (c) interchangeable MDPE spray boom (e) unique MDPE spray boom for each tower. The main innovations obtained by the new design were spray boom with half the length of the predecessors, telescopic diameter and specific design for each tower. Both the scenarios have reached excellent statistical uniformity, hence the interchangeable scenario had a range greater than 50 L ha⁻¹ between maximum and minimum application rate. The software can design the spray booms for any emitter model known by the user

Keywords: Pesticide application technology; Pulse width modulation; Notliada; Object Pascal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos envolvidos na transferência e deposição de agroquímicos	32
Figura 2 – Quantidade de princípio ativo depositada na parte aérea (Qpa, %) em função do volume de calda utilizado (Vc, L ha ⁻¹).....	33
Figura 3 - Emissores do modelo Inverted Mister, respectivamente MRI 08, MRI 12, MRI 16 e MRI 20	41
Figura 4 – Projetor ótico de perfil Starrett, HB 400.....	42
Figura 5 – Vistas da bancada utilizada para determinar a distribuição do spray.....	43
Figura 6 - Posições de ensaio dos emissores de jato cônico.....	43
Figura 7 – Representação esquemática da obtenção do perfil de distribuição dos emissores.....	44
Figura 8 – Aproximação dos emissores em uma barra hipotética formada por quatro unidades de emissão	44
Figura 9 – Sobreposições das distribuições do emissor	45
Figura 10 – Bancada construída para determinação das curvas de pressão <i>versus</i> vazão e coeficiente de variação de fabricação.....	46
Figura 11 – Relações entre os tempos de funcionamento e as áreas cobertas pelas torres	47
Figura 12 – Variáveis utilizadas no dimensionamento da barra de pulverização	48
Figura 13 – Método iterativo de Newton-Raphson	52
Figura 14 – Aplicação estatística do teorema de Pitágoras	54
Figura 15 – Perfis obtidos na mesa de distribuição.....	57
Figura 16 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média MRI08	59
Figura 17 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI08.....	59
Figura 18 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI08.....	59
Figura 19 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média, para o modelo MRI12.....	60

Figura 20 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI12	60
Figura 21 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI12	60
Figura 22 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média MRI16	61
Figura 23 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI16	61
Figura 24 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI16	61
Figura 25 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média MRI20	62
Figura 26 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI20	62
Figura 27 – Curvas de coeficiente de variação <i>versus</i> espaçamento para o modelo MRI20	62
Figura 28 – Vazões dos modelos de emissor estudados em relação à média	64
Figura 29 – Fluxograma do dimensionamento geral	65
Figura 30 – Fluxo de informações da função de dimensionamento das barras localiza antes da torre ($k = 1$), CalculaESPAT	66
Figura 31 – Fluxo de informações da função de dimensionamento das barras localiza depois da torre ($k = 2$), CalculaESPDP	67
Figura 32 – Tela do aplicativo de dimensionamento do sistema de pulverização acoplável a pivô central Notliada	68
Figura 33 – Uniformidade estatística em função do número de torres, para os quatro cenários de dimensionamento estudados	69
Figura 34 – Coeficiente de variação da calda em função do número de torres, para os cenários de dimensionamento	70
Figura 35 – Custo da tubulação das barras de pulverização em função do número de torres para os quatro cenários de dimensionamento estudados	71

Figura 36 – Calda com pulsos e espaçamentos resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (a) barras de PVC intercambiáveis	72
Figura 37 – Pressão no ponto de inserção do emissor e diâmetro de tubulação utilizado para o cenário (a) barras de PVC intercambiáveis	72
Figura 38 – Calda com pulsos e espaçamentos resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (b) barras de PVC não intercambiáveis	73
Figura 39 – Pressão no ponto de inserção do emissor e diâmetro de tubulação utilizado para o cenário (b) barras de PVC não intercambiáveis	73
Figura 40 – Calda com pulsos e espaçamentos para o cenário (c) barras de PEMD intercambiáveis	74
Figura 41 – Pressão no ponto de inserção do emissor e diâmetro de tubulação utilizado para o cenário (c) barras de PEMD intercambiáveis	74
Figura 42 – Calda com pulsos e espaçamentos resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (d) barras de PEMD não intercambiáveis	75
Figura 43 – Pressão no ponto de inserção do emissor e diâmetro de tubulação utilizado para o cenário (d) barras de PEMD não intercambiáveis	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto ao volume de calda utilizado	31
Tabela 2 – Diferenças entre os critérios de projeto de sistemas destinados à irrigação e à quimigação	35
Tabela 3 – Classificação dos valores de uniformidade estatística	56
Tabela 4 – Eficiência de coleta e Alcance máximo	58
Tabela 5 – Espaçamentos máximos e coeficiente de variação da distribuição	58
Tabela 6 – Diâmetro ($\varnothing$, mm) e coeficiente de variação	63
Tabela 7 – Coeficiente de variação de fabricação.....	63
Tabela 8 – Parâmetros de ajuste para as funções de pressão x vazão	64
Tabela 9 – Características dos dimensionamentos.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>PASS</i>	<i>Pivot Attached Spray System</i>
<i>PVC</i>	<i>Polyvinyl chloride</i> , cloreto de polivilina
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>kW</i>	Quilowatt
<i>mca</i>	Metros de coluna de água
<i>PEMD</i>	Polietileno de média densidade

LISTA DE SÍMBOLOS

AI	Área Irrigada (m^2)
$A_{i,k,j}$	Área coberta pelo i -ésimo emissor (m^2)
A_j	Área da coroa compreendida entre a metade do enésimo vão e a metade do enésimo+1 vão (m^2)
C_{crit}^I	Calda crítica inferior ($L\ m^{-2}$)
C_j	Calda aplicada pela j -ésima barra ($L\ m^{-2}$)
$C_{min,n}$	Calda mínima obtida pelo enésimo modelo disponível ($L\ m^{-2}$)
C_{crit}^S	Calda crítica superior ($L\ m^{-2}$)
CT	Ciclo de trabalho em uma aplicação por pulsos (adimensional)
CTB	Custo da tubulação do sistema (R\$)
Cvd	Coeficiente de variação das distribuições no sistema Notliada (%)
Cve	Coeficiente de variação das vazões sobrepostas em um determinado espaçamento (%)
Cvf	Coeficiente de variação de fabricação (%)
$Cvnt$	Coeficiente de variação do sistema Notliada (%)
DC	Duração de um ciclo de trabalho ($TL+TD$, s)
$de_{i,k,j}$	distância entre dois emissores (m)
$d_{i,k,j}$	distância do i -ésimo emissor até o ponto pivô (m)
D_j	distância da j -ésima torre até o ponto pivô (m)
$e_{i,k,j}$	espaçamento do i -ésimo emissor (m)
$e_{max,m}$	espaçamento máximo obtido através da sobreposição das distribuições do enésimo modelo de emissor (m)
ET_m	Evapotranspiração máxima ($mm\ dia^{-1}$)
$f_{i,k,j}$	Fator de atrito no i -ésimo trecho (adimensional)
H	Pressão (mca)
$hf_{i,k,j}$	Perda de carga no trecho de tubulação compreendido entre o i -ésimo emissor e o $i+1$ -ésimo emissor (mca)
$H_{i,k,j}$	Pressão no ponto de inserção do i -ésimo emissor (mca)

i	número de índice para os emissores localizados na barra de pulverização
IAF	Índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$)
$IO_{i,k,j}$	Índice de obstrução na inserção do i -ésimo emissor (adimensional)
j	número de índice para válvulas solenóide, vãos e torres do pivô
k	número de índice para as barras de pulverização
K	Parâmetro da equação de perda de carga localizada (adimensional)
K_0	Termo constante da equação de dimensionamento
K_1	Termo constante da equação de dimensionamento
K_2	Termo constante da equação de dimensionamento
K_3	Termo constante da equação de dimensionamento
K_4	Termo constante da equação de dimensionamento
$Le_{i,k,j}$	Perda de carga localizada referente a inserção do emissor no i -ésimo trecho (m)
L_j	Comprimento do j -ésimo vão (m)
L_m	Lâmina média (mm)
m	número de índice para os modelos de emissor
m^*	número de índice do modelo de emissor que gera o maior espaçamento
ne	número de emissores
$\emptyset_E$	Diâmetro equivalente na junção de duas tubulações de diâmetro diferente
$\emptyset_{i,k,j}$	Diâmetro da tubulação no i -ésimo trecho (m)
$Q_{i,k,j}$	Vazão acumulada até o i -ésimo trecho ($m^3 s^{-1}$)
$q_{i,k,j}$	Vazão do i -ésimo emissor da barra de pulverização ($L h^{-1}$)
q_m	Vazão média de um lote de emissores ($L h^{-1}$)
Q_{pa}	Quantidade de princípio ativo que atinge a folhagem ($mg planta^{-1}$)

Q_{si}	Vazão do sistema de irrigação ($m^3 h^{-1}$)
Q_{sq}	Vazão de um sistema de quimigação hipotético ($m^3 h^{-1}$)
$Ry_{i,k,j}$	Número de Reynolds para o fluxo no i -ésimo trecho (adimensional)
$Sc_{i,k,j}$	Área da seção do tubo no ponto de inserção do emissor no i -ésimo trecho (m^2)
$S_{i,k,j}$	Área da seção do tubo no i -ésimo trecho (m^2)
Sq	Desvio padrão da vazão de um lote de emissores ($L^2 h^{-2}$)
TD	Tempo desligado da em um Ciclo de Trabalho (s)
t_f	Tempo de funcionamento (h)
t_{fd}	Tempo de funcionamento diário ($h \text{ dia}^{-1}$)
t_j	Tempo de efetivo de funcionamento da j -ésima torre (h)
TL	Tempo ligado da em um Ciclo de Trabalho (s)
Us	Uniformidade estatística (%)
v	Velocidade de deslocamento do sistema ($m h^{-1}$)
X_1	Parâmetro da equação do fator de atrito (adimensional)
X_2	Parâmetro da equação do fator de atrito (adimensional)
α_m	Coeficiente de ajuste da equação de pressão x vazão para o m -ésimo modelo ($L h^{-1} mca^{-0.5}$)
π	relação entre o perímetro e o raio de uma circunferência (adimensional)

1 INTRODUÇÃO

A utilização de agroquímicos é essencial para o controle dos fatores envolvidos no processo de produção agrícola, sem a revolução verde necessitaríamos de uma área de cultivo muito maior do que a atual para alcançar os mesmos níveis de produção. Os defensivos agrícolas tornam-se mais eficazes com o passar dos anos, mas também mais onerosos, o que torna essencial sua utilização eficaz, obtendo benefícios econômicos e ambientais.

Agricultores, em um sistema de produção que envolva irrigação por aspersão via pivô central, têm como alternativas para aplicação de agroquímicos a pulverização tratorizada, aérea e a quimigação. A quimigação, apesar de consistir em uma boa alternativa, quando não temos como alvo a parte aérea da planta e em algumas formulações de produtos, ainda é uma técnica limitada. Devido aos critérios de dimensionamento incompatíveis com a pulverização agrícola. O objetivo principal de um equipamento de irrigação é fornecer água para a planta, tendo então como alvo o solo, para isso os diâmetros de gota e lâminas aplicadas pelo sistema tem deposição reduzida na parte aérea das plantas.

Para que se possa utilizar a estrutura do pivô central para a aplicação de agroquímicos são levadas em consideração lâminas compatíveis com as áreas de deposição proporcionadas pelo alvo, no caso parte aérea, tanto da cultura de interesse, como de plantas invasoras em pós-emergência. Utilizando tais critérios na concepção de sistemas de pulverização acoplados. Estes equipamentos possuem sistemas de bombeamento e emissão independentes dos utilizados na irrigação, aplicando volumes de calda bem inferiores aos aplicados pelo pivô, sem a necessidade de mudanças no sistema projetado, pois o mesmo irá apenas transportar o equipamento sobre a área.

Em condições climáticas como as brasileiras, áreas irrigadas por pivô central são ocupadas por vários cultivos durante o ano, mantendo altas as pressões de organismos nocivos. Neste âmbito, sistemas de aplicação de defensivos que possam utilizar a estrutura de um pivô central para se locomover parecem uma boa alternativa, pois seus custos de implantação são facilmente diluídos em sistemas de produção que demandem várias aplicações anuais, devido ao baixo consumo de energia.

As vantagens em se utilizar um sistema deste tipo consistiriam em: (i) possuir grande amplitude nas caldas passíveis de serem aplicadas; (ii) rapidez na intervenção de uma área atingida; (iii) segurança para o aplicador; (iv) uniformidade da calda, devido ao fluxo turbulento dentro do encanamento; (v) dispensar o transporte de água para a lavoura e paradas para reabastecimento de pulverizadores terrestres; (vi) dispensar pistas de pouso e equipes de apoio, no caso da pulverização aérea.

Com isso, os objetivos deste estudo foram:

- Avaliar um conjunto de emissores com características desejáveis para utilização em um sistema de pulverização acoplável a pivô;
- Desenvolver uma metodologia de dimensionamento que reduzisse os materiais utilizados no sistema sem prejudicar a uniformidade de aplicação;
- Comparar quatro cenários de dimensionamento, variando-se o material e os critérios de utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação por pivô central

Em 1948 o sistema de irrigação “auto-propelido”, como nomeado primeiramente por Frank Zybach (seu inventor), transformou a irrigação de maneira a torná-la viável em áreas antes consideradas impróprias a esta prática. Mesmo que o equipamento tenha passado por inúmeras mudanças, seu conceito básico ainda é utilizado. A irrigação por pivô central começou a consolidar-se a partir de 1961, sendo que, em 1973 já eram irrigados cerca de 800.000 ha por este sistema nos EUA. Atualmente seu uso está bem difundido, são mais de quatro milhões de hectares irrigados por este sistema. No Brasil estima-se que a área irrigada por pivô central seja de 850.000 ha, o que corresponde a 25% do total (COELHO, 2007; MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Os sistemas de pivô central se diferenciam de outros sistemas de aspersão por possuírem uma das extremidades fixa, por onde recebem água e energia elétrica, e outra móvel, que descreve um círculo em torno da primeira. A lateral é composta por uma série de vãos, com comprimentos que variam de 27 a 76 m, transportados a uma altura de aproximadamente 3 metros por suas torres automotrizes em formato de “A”. Diferentes sistemas de propulsão foram usados para tracionar as rodas em pivôs centrais: (i) aspersores; (ii) motores de pistão tocados à água; (iii) motores hidráulicos; (iv) turbinas; e (v) motores elétricos. Os motores elétricos são os mais comuns atualmente pela confiabilidade, transporte da lateral sem a necessidade de irrigar, fácil ajuste de velocidade e sentido de caminhamento (TARJUELO, 1995; KELLER; BLIESNER, 1990).

A velocidade de caminhamento do equipamento é regulada atuando-se sobre o motorreductor da torre final, fazendo-o funcionar em frações de minuto, avançando de maneira intermitente sobre o terreno, exceto quando o relê está a 100%, quando o funcionamento é contínuo e a torre final se desloca a velocidades que variam de 110 a 428 m h⁻¹. As torres interiores possuem contatores que energizam os motorredutores quando a torre à jusante excede o ângulo de início e desligam quando é excedido o ângulo de parada, que são de aproximadamente 20°, portanto, o avanço da torre externa produz uma reação em cadeia de avanços, mantendo o alinhamento da linha

lateral (MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007; TARJUELO, 1995; CUENCA, 1989; NEW; FIPPS, 1995).

As características de caminhamento do sistema fazem com que os bocais presentes no final da lateral se movam a velocidades muito maiores daquelas observadas nas proximidades do centro da área irrigada, sendo necessárias considerações especiais quanto ao *design* do sistema, para que sejam aplicadas as mesmas lâminas em todo o seu comprimento. A intensidade de aplicação cresce do centro até a extremidade, sendo que cada metro de lateral deve irrigar áreas cada vez maiores durante o mesmo tempo (tempo de revolução), mantendo a mesma lâmina (CUENCA, 1989; TARJUELO, 1995).

Como vantagens dos pivôs centrais podemos citar: (i) operação automatizada, podendo ser acionado remotamente; (ii) habilidade de aplicar pequenas lâminas de irrigação; (iii) alta uniformidade de aplicação; (iv) possibilidade de se aplicar agroquímicos através da água de irrigação, e; (v) pouca necessidade de manutenção anual. Podem ser citadas como desvantagens do sistema: (a) custo inicial; (b) alta intensidade de aplicação, especialmente no final da linha lateral, e; (c) padrão circular, irrigando aproximadamente 80% de um campo quadrado (MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007).

2.2 Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas

A demanda por pesticidas vem crescendo desde a década de 60, apesar de alguns governos imporem políticas de restrição de uso. Essas restrições partiram da percepção dos riscos envolvidos em seu uso nos termos de resíduos em alimentos e impacto no ambiente, porém essa percepção é baseada erroneamente em três falsas premissas: (i) bons cultivos eram obtidos em uma era pré-pesticidas; (ii) químicos como os pesticidas não ocorrem naturalmente; (iii) estes pesticidas aumentam a incidência de câncer. Na prática, vegetais possuem compostos que são altamente tóxicos, a exemplo do cianeto presente na mandioca. Sem o uso da tecnologia (o que inclui o uso de pesticidas) a triplicação da produção agrícola entre as décadas de 60 e 90 demandaria adicionais 30 milhões de quilômetros quadrados em terras agrícolas (VAN EMDEN; PEAKALL, 1996).

Os propósitos da aplicação de agroquímicos em culturas agrícolas são: fornecer nutrientes para o crescimento das plantas, controlar plantas daninhas, doenças, insetos e outras pragas agrícolas. A aplicação de defensivos de maneira apropriada é fundamental para o sucesso da agricultura moderna, os agroquímicos se tornaram mais sofisticados através dos anos, mas também mais onerosos, portanto bons métodos de aplicação são fundamentais para evitar a utilização excessiva. Para que os defensivos agrícolas sejam utilizados com maior eficiência, o alvo atual deve ser definido no espaço e no tempo. Além disso, a proporção de pesticidas emitidos que alcançam o alvo deve aumentar e se depositar de maneira que esteja prontamente disponível à praga. O objetivo de uma pulverização é alocar apenas a quantidade suficiente de um dado ingrediente ativo no alvo, para que se possa alcançar o efeito biológico desejado com segurança e economia (SRIVASTAVA et al., 2006; MATTHEWS, 2000).

Entretanto, este processo é bem complexo (Figura 1). O modo de ação do pesticida exerce influência sobre a seleção do modo de aplicação. Um inseticida, por exemplo, pode ser efetivo por contato, ingestão ou inalação. Do mesmo modo, fungicidas e herbicidas podem ter ação de contato ou serem translocados por ação sistêmica da planta. Termos como alto, médio, baixo, muito baixo e ultra baixo volume de aplicação vêm sendo usados, mas os valores para estes costumam variar (Tabela 1), especialmente quando consideramos culturas anuais e perenes (MATTHEWS, 2000).

Tabela 1 – Classificação quanto ao volume de calda utilizado ($L\ ha^{-1}$) (MATTHEWS, 2000)

Volume de Calda	Culturas Anuais	Culturas Perenes
Alto	> 600	> 1000
Médio	200 – 600	500 – 1000
Baixo	50 – 200	200 – 500
Muito baixo	5 – 50	50 – 200
Ultra baixo	< 5	< 50

Figura 1 – Processos envolvidos na transferência e deposição de agroquímicos (adaptado de MATTHEWS, 2000)

A Figura 2 ilustra a variação da quantidade de princípio ativo que atinge o alvo folha em função da calda utilizada. Até o valor de calda crítica inferior (C_{crit}^i), há um acréscimo da quantidade de princípio ativo que atinge a folha devido a limitações de solubilidade e volume de calda. Acima do valor de calda crítica superior (C_{crit}^s), há a

limitação de área foliar, arquitetura da planta, natureza da folha e lavagem do produto devido ao volume de água (DOURADO NETO; FANCELLI, 2004).

Figura 2 – Quantidade de princípio ativo depositada na parte aérea (Qpa, %) em função do volume de calda utilizado (Vc, L ha⁻¹)

Sumner et al. (2000) compararam a aplicação de agroquímicos através da quimigação, do sistema de pulverização acoplado a pivô central PASS (*Pivot Attached Spray System*), aplicando 2340 L ha⁻¹, e pulverizadores convencionais. Para herbicidas pré-emergentes as aplicações via quimigação e PASS se mostraram mais efetivas, mesmo em doses abaixo das recomendadas. Para herbicidas em pós-emergência, pulverizadores convencionais tiveram ligeira vantagem sobre os outros dois métodos, assim como na aplicação de um fungicida de contato. Para o uso de desfolhantes em algodão o PASS e a pulverização convencional mostraram vantagem significativa sobre a quimigação.

Pesticidas devem ser aplicados de forma precisa e uniforme no alvo. Pouco princípio ativo depositado resulta em um controle deficitário e baixa produtividade, enquanto que altas concentrações do mesmo podem danificar os cultivos, desperdiçar agroquímicos e dinheiro, além de aumentar os riscos de contaminação ambiental. Bons resultados no uso de pesticidas estão diretamente relacionados à identificação da praga, tempo de aplicação, seleção do pesticida e equipamento de pulverização, assim

como sua calibração e manutenção (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2007).

2.3 Tecnologia de aplicação de defensivos em sistemas irrigados

2.3.1 Quimigação

A quimigação é definida como a aplicação de agroquímicos através da injeção na água que flui através de um sistema de irrigação, no entanto, o termo quimigação é relativamente novo, pois a idéia de se aplicar agroquímicos através da água de irrigação nos remete a década de 50, envolvendo inicialmente a aplicação de fertilizantes. Dependendo do tipo de agroquímico aplicado pode-se referir a quimigação como fertigação, insetigação, fungigação, nematigação e herbigação. Os avanços obtidos nos últimos anos em design de sistemas de irrigação e equipamentos de injeção tem estimulado a pesquisa nesta área (DOWLER, 1993; UNIVERSITY OF MINNESOTA, 2004).

A quimigação necessita de um equipamento bem dimensionado e que possua manutenção regular, além de pessoal bem treinado para sua operação, garantindo que os agroquímicos sejam aplicados no tempo e quantidade corretos. Apesar de sistemas pressurizados possuírem operação mais complicada, em relação aos não pressurizados, eles facilitam a implementação da prática. O sucesso da técnica de quimigação depende de alguns fatores, tais como: (i) calda ($L\ ha^{-1}$) utilizada; (ii) regime de escoamento hidráulico; (iii) propriedades do produto químico, como solubilidade e tensão superficial; e (iv) volume máximo de calda armazenável na parte aérea das plantas, quando este é o alvo da quimigação, que é dependente do índice de área foliar, arquitetura da planta e natureza das folhas (DOURADO NETO; FANCELLI, 2004; LARRAÍN; QUIROZ, 2007).

A irrigação e a quimigação foliar possuem critérios de projeto antagônicos (Tabela 2). No caso da irrigação, o dimensionamento é feito em função da demanda máxima de água da planta. A evapotranspiração depende da cultura, do tempo, da água disponível para a cultura, estado nutricional e fitossanitário. Os valores oscilam entre 6 e 9 mm por dia, sendo assim, considerando-se 70% do valor mínimo de pico, obtemos uma lâmina de projeto de 4,2 mm (relê a 100%, com eficiência de 100%), resultando em uma calda de $42.000\ L\ ha^{-1}$. No caso da quimigação, o dimensionamento

do sistema de irrigação poderia visar, hipoteticamente, uma lâmina equivalente à máxima aplicada via trator (200 a 400 L ha⁻¹). Assim, teríamos uma lâmina de projeto de 0,04 mm, inviável na prática (DOURADO NETO; FANCELLI, 2004).

Tabela 2 – Diferenças entre os critérios de projeto de sistemas destinados à irrigação e à quimigação

Técnica	Critério de projeto
Irrigação	A vazão do sistema de irrigação (Q_{si} , m ³ h ⁻¹) é calculada em função da evapotranspiração máxima no estágio de maior demanda da planta (ET_m , mm dia ⁻¹), da área irrigada (AI , ha) e do tempo de funcionamento diário (t_{fd} , h dia ⁻¹), como pode ser visto na Equação (1).
Quimigação	A vazão de um suposto sistema de quimigação (Q_{sq} , m ³ h ⁻¹) poderia ser calculada em função da área a ser "irrigada" (AI , ha), do tempo de funcionamento (t_f , h) do equipamento para aplicar uma lâmina máxima equivalente ao volume máximo armazenável na folha (L ha ⁻¹), o qual é dependente do índice de área foliar (IAF , m ² m ⁻²) e da lâmina média (Lm , mm) de água sobre a folha (Equação 2).

(DOURADO NETO; FANCELLI, 2004)

$$Q_{si} = \frac{10 ET_m AI}{t_{fd}} \quad (1)$$

$$Q_{sq} = \frac{10 IAF Lm AI}{t_f} \quad (2)$$

Como benefícios na adoção da prática da quimigação podemos salientar: (i) distribuição uniforme, quando o sistema de irrigação é bem dimensionado e possui manutenção constante, sistemas como o pivô central e sistemas lineares possuem uniformidade superior à obtida em aplicações aéreas e tratorizadas; (ii) maior janela de aplicação, pivôs centrais podem operar em praticamente qualquer condição de tempo e a qualquer hora do dia; (iii) incorporação e ativação, com a quimigação, agroquímicos que necessitam incorporação e água para a ativação são aplicados às profundidades desejadas e ativados imediatamente; (iv) reduz a compactação do solo ao reduzir o tráfego de maquinário, reduzindo consequentemente o consumo de energia e operações onerosas de subsolação; (v) redução do dano mecânico da cultura, que pode causar perdas substanciais e aumentar a incidência de doenças; (vi) redução do risco de contaminação do operador, pelo fato de sua presença não ser necessária no

campo durante a aplicação e pelas baixas concentrações de princípio ativo na calda; (vii) redução das quantidades de insumos aplicadas, em especial quando se trata da aplicação de fertilizantes e herbicidas em pré-plantio incorporado; (viii) possível redução de contaminação ambiental, em especial quando relacionado à deriva; (ix) economia nos custos de aplicação, e; (x) aumento da eficiência em alguns tipos de aplicação (JOHNSON et al., 1986).

Quanto à prática da quimigação podemos citar como desvantagens: (i) risco de contaminação da fonte de água, através do refluxo de agroquímicos através da adutora do sistema; (ii) necessidade de mão de obra qualificada e manutenção constante do equipamento; (iii) restrições quanto aos agroquímicos utilizados, poucos produtos são registrados para este método de aplicação; (iv) complexidade das interações químicas, vários produtos devem ser aplicados em pontos distintos para limitar as interações entre fertilizantes e biocidas aplicados simultaneamente; (v) dificuldades relacionadas à interação do turno de rega com o agendamento da quimigação, fertilizantes podem ser necessários em períodos de suficiência hídrica; (vi) a corrosão causada pelos produtos químicos pode reduzir significativamente a vida útil dos componentes do sistema; e (vii) critérios de dimensionamento contrastantes entre sistemas de irrigação e de pulverização (JOHNSON et al., 1986; EVANS; WALLER, 2007).

2.3.2 Sistemas de pulverização acopláveis a pivô central

Como já discutido, a aplicação de grandes volumes de calda, quando o alvo da pulverização é a parte aérea da planta, reduz significativamente a quantidade de princípio ativo depositado nas folhas, podendo reduzir a eficiência do controle, como alternativa à quimigação os sistemas de pulverização acoplados a pivô central podem reduzir significativamente a calda aplicada.

Garvey (1981), com o intuito de aproveitar a estrutura de um pivô central para a aplicação produtos químicos, idealizou um sistema em que a calda não é transportada pela água de irrigação, batizando-o como *Piggyback System*. Neste sistema, a solução química é conduzida por meio de uma tubulação secundária, paralela à linha lateral. Cada torre do pivô possui uma válvula solenóide, que é acionada simultaneamente ao seu movimento, fazendo a solução fluir para uma tubulação plástica, onde existem

bicos de pulverização responsáveis pela sua distribuição. Durante a aplicação da solução, a parte aérea do pivô funciona apenas como um veículo de transporte, não realizando irrigação. Segundo o autor, o volume de pulverização aplicado por este tipo de equipamento é de 1.600 L ha^{-1} (LARSEN, 1980).

Sumner et al. (1997) propuseram um sistema de pulverização baseado em seu antecessor, Peter Garvey, com o intuito de reduzir o custo inicial do equipamento, viabilizando sua implementação. O PASS utilizava micro aspersores, válvulas anti gotas e tubulação de polietileno. Este sistema tem a capacidade de aplicar volumes de calda da ordem de 1900 L ha^{-1} , obtendo Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) que variam de 87 a 95%.

A Pivot Barra – Indústria e Comércio Ltda. produziu no Brasil uma barra de pulverização para ser acoplada ao pivô central, o sistema constituía-se de uma barra de alumínio onde são montados bicos de pulverização equipados com válvulas anti gotas, esta barra possuía o mesmo comprimento de cada torre do pivô. Este sistema é capaz de aplicar volumes de calda que variam entre 508 e 1526 L ha^{-1} , para velocidades de deslocamento entre 120,6 e $362,4 \text{ m h}^{-1}$ (VILELA, 2002).

Chapman (1997) obteve a patente de um sistema de distribuição de produtos químicos desenvolvido pela empresa norte americana Valmont Industries Inc., o *Accu-Pulse* realiza a pulverização de maneira intermitente, sincronizada ao deslocamento das torres. A principal diferença do sistema é um acumulador de volume ajustável que pode variar a dosagem por pulso, os volumes variam de 0,008 a 0,031 L, a cada pulso a calda passa por um bocal sendo distribuída por um defletor, o sistema pode aplicar volumes de pulverização da ordem de 230 L ha^{-1} . Testes baseados em papéis sensíveis a água mostraram diâmetros de gota muito maiores que os encontrados normalmente em aplicações tratorizadas, o que pode reduzir significativamente a deriva e melhorar a penetração no dossel, mas aumenta a variabilidade espacial de cobertura das folhas de duas a três vezes (FARAHANI et al., 2006).

Dourado Neto e Fancelli (1999) idealizaram um sistema, para aplicação de produtos químicos, acoplado a um pivô central. O Notliada tem por finalidade adequar o volume de calda ao alvo da pulverização, possuindo um sistema de automação que cessa a aplicação quando o motorredutor de uma respectiva torre não está em

funcionamento. No sistema foram utilizadas pontas de pulverização de jato plano de grande ângulo montadas em corpos plásticos acompanhados de elementos filtrantes, o funcionamento das barras era sincronizado à movimentação das torres do pivô por intermédio de uma válvula solenóide. Este sistema obteve um volume de pulverização de 3.000 L ha^{-1} . Um novo protótipo do sistema Notliada (2.0) foi desenvolvido por Pereira (2001), o conjunto de emissão era composto por válvula reguladora de pressão, tubos de polietileno, microaspersores e válvulas anti gota. Este sistema podia aplicar volumes de calda da ordem de 2.430 L ha^{-1} , à uniformidade de 82%.

Vilela (2002), tomando como referência o sistema de pulverização acoplável a pivô central Notliada, criou um protótipo que possuía duas barras paralelas em cada vão, cada uma controlada por uma das torres da extremidade do mesmo, este sistema possui uma uniformidade teórica de 100%, pois os volumes aplicados por cada barra são proporcionais aos componentes de velocidade criados pelo movimento de cada torre de controle. Este sistema obtém volumes de calda que chegam à faixa de aplicações tratorizadas, 246 L ha^{-1} , com a possibilidade de ajuste em três ciclos de trabalho diferentes da válvula solenóide, que modula a vazão através da duração de seu ciclo de trabalho, permitindo a configuração de 2 marchas de aplicação extras. O tamanho de gotas também atende às recomendações para a aplicação de defensivos, com diâmetro mediano volumétrico de $126,3 \mu\text{m}$ e coeficiente de dispersão médio de 1,29, que permite classificar o espectro de gotas produzido como uniforme.

Palacín et al. (2005) propuseram um sistema de pulverização baseado em tecnologia de aplicação variável, este sistema possui uma válvula eletrostática em cada microaspersor, que controla separadamente o fluxo conforme a distância radial do emissor e a velocidade da torre, as velocidades são obtidas através de medida direta com um sensor de velocidade em cada torre, que pode variar a taxa de aplicação em situações que causam variações na velocidade, como patinamento e relevos íngremes. A alternativa do controle individual pode ser mais precisa, mas exige sensores para aferição constante da velocidade, que também pode ser calculada através do acionamento do contator de cada torre.

Em suma, sistemas de aplicação de defensivos em baixo volume para pivôs centrais trazem consigo as vantagens da quimigação, podendo ainda, em alguns casos,

aplicar volumes similares aos obtidos em aplicação tratorizada, conferindo uma maior flexibilidade ao conjunto, com a capacidade de aplicar defensivos não registrados para a quimigação em volumes condizentes quando o alvo é a área foliar do cultivo.

2.3.3 Aplicação por pulsos

Karmeli e Peri (1974) descreveram os princípios básicos de um sistema de irrigação que funcionava de maneira intermitente, a fim de obter menores taxas de aplicação dos emissores da época, limitados a 5 mm h^{-1} , a lógica é simples e visava o aproveitamento da tecnologia dos painéis de controle, que abrem e fecham válvulas de maneira sequencial, de acordo com o design do sistema. Neste trabalho o termo irrigação por pulsos é definido como uma série de ciclos de irrigação, compostos por duas fases: (i) fase de operação; e (ii) fase de repouso. A fase (i) decorre a uma precipitação relativamente alta, no entanto, ao levar-se em conta o tempo de repouso a precipitação é baixa. Este conceito foi inicialmente desenvolvido para sistemas de aspersão fixos, sendo que um único ciclo pode durar horas, o que seria inviável em sistemas que se movimentam continuamente, como os pivôs centrais. No entanto a relação entre as variáveis principais são as mesmas (FRAISSE; DUKE; HEERMANN, 1995).

A sequência de tempos ligado e desligado durante a operação de uma válvula solenóide é caracterizada como ciclo de trabalho, que é matematicamente definida como a porcentagem do tempo total do ciclo em que a válvula está energizada. O ciclo de trabalho se aproxima de zero quando a solenóide é energizada em raros intervalos de tempo e chega a 100% quando a solenóide é energizada continuamente, estado chamado de trabalho contínuo. A variação da vazão através da barra é proporcional ao ciclo de trabalho utilizado (FRAISSE; DUKE; HEERMANN, 1995).

O uso da modulação por pulsos no controle da vazão traz como vantagem a obtenção de um intervalo maior em relação a um sistema baseado na pressão. Se a vazão desejada com a atuação do sistema de controle for da ordem de 10% da vazão original a pressão de trabalho ajustada seria aproximadamente 1% da pressão de trabalho original, fora da faixa de trabalho para a maioria dos emissores do mercado,

causando alterações significativas no perfil de distribuição e diâmetros de gotas gerados (PIERCE; AYERS, 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e etapas do experimento

O trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, situado no município de Piracicaba – SP e parte integrante da Universidade de São Paulo. Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios de Hidráulica e Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas.

As etapas do trabalho constituíram a caracterização dos conjuntos de emissão e desenvolvimento da metodologia de dimensionamento do sistema hidráulico. Todas as avaliações foram feitas com água pura, livre de sólidos em suspensão. As pressões em todos os ensaios foram aferidas através de um manômetro digital fabricado por Gulton do Brasil Ltda., modelo GULpress 1000.

3.2 Caracterização dos emissores

Os emissores escolhidos para o dimensionamento do protótipo foram do modelo Inverted Mister (Figura 3), fabricados pela Senninger Irrigation Inc., as características que levaram à escolha deste modelo foram: (i) válvula anti-gotas incorporada ao emissor; (ii) vazão adequada aos propósitos do protótipo a ser desenvolvido; (iii) bocais de diâmetro superior às pontas de pulverização encontradas nas mesmas faixas de vazão, amenizando problemas de entupimento; e (iv) características da construção facilitam o desmonte e limpeza do emissor.

Esses emissores possuem jato do tipo cone vazio e foram originalmente desenvolvidos para a aplicação de baixos volumes em nebulização.

Figura 3 - Emissores do modelo Inverted Mister, respectivamente MRI 08, MRI 12, MRI 16 e MRI 20

Os emissores foram ensaiados tomando-se como referência a norma ISO 5682-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO,

1993), com o objetivo de determinar a distribuição do spray, ângulo de aplicação, coeficiente de variação de fabricação. Os emissores analisados foram cedidos pela empresa, constituindo um lote de 50 emissores para cada modelo, obtidos aleatoriamente de um lote que totalizava 300.

3.2.1 Diâmetro do bocal

Com o objetivo de avaliar a qualidade da manufatura dos emissores os diâmetros dos bocais foram aferidos por intermédio de um projetor ótico de perfil da marca *Starrett*, modelo HB 400. Foram medidos os diâmetros de 30 emissores de cada modelo (Figura 4).

Figura 4 – Projetor ótico de perfil Starrett, HB 400

3.2.2 Distribuição do emissor

A distribuição do emissor foi determinada em uma bancada construída para este propósito, a qual possui área de coleta de 3,5 x 3,0 m constituída de canaletas de 0,025

m, que coletam e direcionam o volume pulverizado a um conjunto de 133 provetas, nas quais são realizadas as leituras (Figura 5). As provetas possuem volume de leitura de 0,250 L, graduado em intervalos de 0,002 L. O tempo de ensaio era flexível, sendo interrompido no momento em que a primeira proveta ultrapassa o volume de 0,2 L. O sistema hidráulico da bancada era composto por uma bomba de três êmbolos Jacto (modelo JP-75), motor elétrico com potência de 5,15 kW e reservatório com capacidade para 2.000 L.

Figura 5 – Vistas da bancada utilizada para determinar a distribuição do emissor

Foram escolhidos cinco emissores de cada modelo para a realização deste ensaio, os mesmos tiveram suas distribuições aferidas na pressão mínima e máxima (20,39 e 35,69 mca), a três diferentes alturas (0,5, 0,6 e 0,7 m) e em duas diferentes posições (Figura 6).

Figura 6 - Posições de ensaio dos emissores de jato cônico

3.3 Determinação do espaçamento máximo entre emissores

A determinação do espaçamento máximo entre emissores possui três etapas: (i) obtenção do perfil de distribuição das vazões obtidas em cada proveta (Figura 7); (ii) aproximação dos emissores em uma barra hipotética formada por quatro unidades de emissão, obtendo as vazões acumuladas no intervalo 2 – 3, distância entre emissores 2 (de_2) (Figura 8); (iii) obtenção das curvas de espaçamento *versus* coeficiente de variação (C_v , %) (Figura 9).

Figura 7 – Representação esquemática da obtenção do perfil de distribuição dos emissores, mostrando a coleta das vazões de cada canaleta da mesa de distribuição (I), e o perfil gerado após a tabulação dos dados, separado em dois lados, A e B, pois as sobreposições são feitas nos esquemas AB, AA e BB (II).

Figura 8 – Aproximação dos emissores em uma barra hipotética formada por quatro unidades de emissão, de_2 (m) é a distância entre os emissores 2 e 3

Figura 9 – Sobreposições das distribuições do emissor em três espaçamentos hipotéticos (I, II e III) e os coeficientes de variação correspondentes (IV)

As curvas de espaçamento x coeficiente de variação foram obtidas através de uma planilha eletrônica, desenvolvida em Microsoft Excel[®], os espaçamentos máximos de cada modelo ($e_{max,m}$, m) foram definidos como aqueles em que o coeficiente de variação do intervalo 2 – 3 fosse inferior a 12%.

3.3.1 Coeficiente de variação de fabricação

Para os ensaios de coeficiente de variação de fabricação e para a elaboração das curvas de vazão *versus* pressão foi construída uma bancada com trilhos que permitissem o movimento dos emissores sobre os coletores (Figura 10), possibilitando que os mesmos fossem posicionados simultaneamente sobre os recipientes de coleta. Os emissores foram ensaiados em lotes de 25, nas pressões de 20,39, 25,49, 30,59 e 35,69 mca. O tempo limite de ensaio foi determinado como o necessário para atingir-se 90% da capacidade do coletor, a massa dos coletores foi obtida a partir de uma balança Ohaus[®], modelo Adventurer, com precisão de 0,01 g. Os volumes foram corrigidos de acordo com a temperatura da água.

Figura 10 – Bancada construída para determinação das curvas de pressão *versus* vazão e coeficiente de variação de fabricação

O coeficiente de variação fabricação (Cvf , adimensional) foi calculado através da expressão:

$$Cvf = \frac{S_q}{q_{média}} \quad (3)$$

em que S_q ($L^2 h^{-2}$) é o desvio padrão da amostra e $q_{média}$ ($L h^{-1}$) a vazão média, obtidos na pressão de 30,59 mca (ISO, 1993).

3.3.2 Curvas de vazão *versus* pressão

A vazão de um emissor pode ser descrita pela equação:

$$q = \alpha_m H^\beta \quad (4)$$

em que α_m ($L h^{-1} mca^{-\beta}$) é o coeficiente de ajuste da equação para o enésimo modelo empregado, H (mca) é a pressão e β (adimensional) o expoente característico do emissor. Aplicando-se logaritmo neperiano a equação e substituindo-se β por 0,5, para facilitar as rotinas de cálculo para o dimensionamento obtemos:

$$\ln q = \ln \alpha + 0,5 \ln H \quad (5)$$

que nada mais é do que a equação de uma reta, sendo assim, podemos ajustá-la aos dados obtidos em laboratório aplicando-se o método dos quadrados mínimos (CHARNET et al., 2008):

$$\ln q = \widehat{\ln \alpha_m} + 0,5 \ln H \quad (6)$$

em que:

$$\widehat{\ln \alpha_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln q_{i,m} - 0,5 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln H_{i,m} \therefore \alpha_m = e^{\widehat{\ln \alpha_m}} \quad (7)$$

3.4 Dimensionamento do sistema de pulverização acoplável

Os emissores devem ser posicionados na barra de pulverização com intuito de atender as variações de área e tempo de funcionamento, mantendo-se a mesma intensidade de aplicação. Nos pivôs centrais atuais os motores elétricos são quase uma constante, o que confere uma propriedade interessante ao sistema, pois as diferenças nas velocidades de caminhamento de cada torre são obtidas através do acionamento intermitente dos motorreductores. A relação entre as áreas compreendidas entre a metade do j -ésimo vão e do j -ésimo+1 vão é igual à relação dos tempos de funcionamento das torres correspondentes, como pode ser observado na Figura 11 e nas Equações (8) e (9).

Figura 11 – Relações entre os tempos de funcionamento e as áreas cobertas pelas torres, onde t (h) é o tempo de funcionamento da torre, A (m^2) é a área coberta pela distância entre a metade do vão j e a metade do vão $j+1$ e L_j (m) é a largura do vão (Figura 12)

$$A1 = \frac{4}{5}A2 = \frac{3}{5}A3 = \frac{2}{5}A4 = \frac{1}{5}A5 \quad (8)$$

$$t1 = \frac{4}{5}t2 = \frac{3}{5}t3 = \frac{2}{5}t4 = \frac{1}{5}t5 \quad (9)$$

3.4.1 Cálculo da intensidade de aplicação mínima da barra

Na Figura 12 podemos observar algumas das variáveis utilizadas no dimensionamento do sistema de pulverização acoplável.

Figura 12 – Variáveis utilizadas no dimensionamento da barra de pulverização: (i) j , número de índice para torre, válvula solenóide e comprimento do vão; (ii) k , número de índice para barra de pulverização; (iii) i , número de índice para emissor; (iv) D_j (m), distância do centro à torre; (v) cc (m), distância do centro ao início da área cultivada; (vi) L_j (m), comprimento do lance; (vii) $de_{i,k,j}$ (m), distância entre emissores; e (viii) distância do centro ao emissor

A calda (C , $L \text{ m}^{-2}$) pode ser calculada em função da vazão do i -ésimo emissor, na k -ésima torre e acionado pela j -ésima válvula solenóide ($q_{i,k,j}$, $L \text{ h}^{-1}$), da área da coroa coberta pelo mesmo ($A_{i,k,j}$, m^2) e do tempo efetivo de funcionamento da torre (t_j , h):

$$C = \frac{q_{i,k,j} t_j}{A_{i,k,j}} \quad (10)$$

A vazão dos emissores pode ser descrita pela equação:

$$q_{i,k,j} = \alpha_m H_{i,k,j}^\beta \quad (11)$$

em que α_n ($L \text{ h}^{-1} \text{ mca}^{-0,5}$) é o coeficiente de ajuste da equação para o n -ésimo modelo empregado, $H_{i,k,j}$ (mca) é a pressão no ponto de inserção do emissor e $\beta = 0,5$ (equação (5) adimensional) o expoente característico do emissor.

A área varrida por um emissor pode ser descrita por:

$$A_{i,k,j} = 2\pi d_{i,k,j} e_{i,k,j} \quad (12)$$

em que $d_{i,k,j}$ (m) é a distância entre o i -ésimo emissor e o ponto pivô, e $e_{i,k,j}$ (m) é o espaçamento do i -ésimo emissor.

O tempo de funcionamento de da j -ésima torre é obtido a partir da equação:

$$t_j = \frac{2\pi D_j}{v} \quad (13)$$

em que D_j (m) é a distância da j -ésima torre em relação ao ponto pivô e v (m h^{-1}) se refere à velocidade de deslocamento do sistema.

Substituindo (11), (12) e (13) em (10) obtemos a equação que descreve a intensidade de aplicação de um emissor instalado na barra de pulverização:

$$C = \frac{\alpha_m H_{i,k,j}^{0,5} D_j}{d_{i,k,j} e_{i,k,j} v} \quad (14)$$

Para o cálculo da calda mínima a ser aplicada por um emissor a distância do emissor é obtida por:

$$d_{i,k,j} = D_j + \frac{e_{\max,m}}{2} - \frac{L_j}{2} \quad (15)$$

em que $e_{\max,m}$ (m) representa o espaçamento máximo obtido através da sobreposição das distribuições determinadas em laboratório para o m -ésimo emissor disponível e L_j (m) o comprimento do j -ésimo vão.

A não ser para o primeiro segmento do primeiro vão, em que $d_{i,k,j}$ é dado por:

$$d_{i,k,j} = D_j + \frac{e_{\max,m}}{2} - \frac{L_j}{2} \quad (16)$$

Substituindo (15) em (14) obtemos a equação da calda mínima a ser aplicada por uma barra (para $k = 1$):

$$C_{\min_{i,k,j}} = \frac{\alpha_{m^*} H_{i,k,j}^{0,5} D_j}{\left(D_j + \frac{e_{\max,m^*}}{2} - \frac{L_j}{2} \right) e_{\max,m^*} v} \quad (17)$$

em que m^* é o número de ordem do modelo que obteve o menor calda mínima, $e_{\max,m^*}$ passa a representar o espaçamento do primeiro emissor ($e_{1,k,j}$).

3.4.2 Cálculo dos espaçamentos consecuintes na barra de pulverização

A calda aplicada pelo emissor consecuinte pode ser descrita por:

$$C_{\min_{i,k,j}} = C_{i+1,k,j} = \frac{\alpha_{m^*} H_{i+1,k,j}^{0,5} D_j}{d_{i+1,k,j} e_{i+1,k,j} v} \quad (18)$$

A distância do emissor consecuinte ao ponto pivô ($d_{i+1,k,j}$, m - Figura 12) é obtida pela equação:

$$d_{i+1,k,j} = d_{i,k,j} + de_{i,k,j} = d_{i,k,j} + \frac{e_{i,k,j}}{2} + \frac{e_{i+1,k,j}}{2} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18) e fatorando:

$$\frac{1}{2}e_{i+1,k,j}^2 + \left(d_{i,k,j} + \frac{e_{i,j}}{2}\right)e_{i+1,k,j} - \frac{\alpha_k D_j}{v C_j} H_{i+1,k,j}^{0,5} = 0 \quad (20)$$

A pressão no ponto de inserção $H_{i+1,k,j}$ pode ser descrita pela equação

$$H_{i+1,k,j} = H_{i,k,j} + hf_{i,k,j} \quad (21)$$

em que $hf_{i,k,j}$ (mca) é a perda de carga no trecho e é descrita pela equação de Darcy-Weisbach, considerando a aceleração da gravidade $9,81 \text{ m s}^{-2}$ (KELLER; BLIESNER, 1990):

$$hf_{i,k,j} = \frac{0,08263 f_{i,k,j} Q_{i,k,j}^2}{\phi_{i,k,j}^5} \left(\frac{e_{i,k,j}}{2} + \frac{e_{i+1,k,j}}{2} + Le_{i,k,j} \right) \quad (22)$$

O fator de atrito no trecho ($f_{i,k,j}$) é descrito pela equação abaixo, que pode ser utilizada para qualquer regime de fluxo (CHURCHILL, 1977):

$$f_{i,k,j} = 8 \left[\left(\frac{8}{Ry_{i,k,j}} \right)^{12} + \frac{1}{(X_1 + X_2)^{1,5}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (23)$$

em que $Ry_{i,k,j}$ é o número de Reynolds (Adimensional, Equação 24) e X_1 e X_2 são parâmetros da equação acima (Adimensionais, Equações 25 e 26):

$$Ry_{i,k,j} = 1,26 \times 10^6 \frac{Q_{i,k,j}}{\phi_{i,k,j}} \quad (24)$$

$$X_1 = \left\{ 2,457 \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{Ry_{i,k,j}} \right)^{0,9} + 0,27 \left(\frac{r}{\phi_{i,k,j}} \right)} \right] \right\}^{16} \quad (25)$$

em que r representa a rugosidade absoluta da tubulação (m), considerou-se o valor de $15 \times 10^{-6} \text{ m}$ para tubos de PVC (cloreto de polivilina) e PEMD (polietileno de média densidade).

$$X_2 = \left(\frac{37530}{Ry_{i,k,j}} \right)^{16} \quad (26)$$

O comprimento equivalente, $Le_{i,k,j}$ (metros de tubulação), referente a perda de carga localizada causada pela inserção do emissor na tubulação pode ser calculado por (MORRIS; WIGGERT, 1972):

$$Le_{i,k,j} = \frac{K\phi_{i,k,j}}{f_{i,k,j}} \quad (27)$$

O fator K foi relacionado empiricamente ao índice de obstrução ($IO_{i,k,j}$, adimensional) do teorema de Bélanger, para uma contração brusca e subsequente expansão (BAGARELLO et al., 1997):

$$K = 1,68 IO_{i,k,j}^{0,646} = 1,68 \left(\frac{S_{i,k,j}}{Sc_{i,k,j}} - 1 \right)^{0,646} \quad (28)$$

em que $S_{i,k,j}$ (m²) representa a área da seção do tubo no trecho e $Sc_{i,k,j}$ (m²) a área da seção no ponto de inserção do emissor.

Substituindo (22) em (21) e posteriormente em (20) obtemos a Equação (29):

$$\frac{1}{2}e_{i+1,k,j}^2 + \left(d_{i,k,j} + \frac{e_{i,k,j}}{2}\right)e_{i+1,k,j} = \frac{\alpha_m^* D_j}{vC} \left[H_{i,k,j} + \frac{0,08263 f Q_{i,k,j}^2}{\phi_{i,k,j}^5} \left(\frac{e_{i,k,j}}{2} + \frac{e_{i+1,k,j}}{2} + Le_i \right) \right]^{0,5} \quad (29)$$

Após isolarmos às variáveis independentes podemos reescrever a expressão:

$$f(e_{i+1,1,j}) = k_4 e_{i+1,k,j}^4 + k_3 e_{i+1,k,j}^3 + k_2 e_{i+1,k,j}^2 - k_1 e_{i+1,k,j} - k_0 \quad (30)$$

em que:

$$k_0 = \left(\frac{\alpha_m^* D_j}{vC} \right)^2 \left[H_{i,k,j} + \frac{0,08263 f Q_{i,k,j}^2}{\phi_{i,k,j}^5} \left(\frac{e_{i,k,j}}{2} + Le_i \right) \right] \quad (31)$$

$$k_1 = \left(\frac{\alpha_m^* D_j}{vC} \right)^2 \frac{0,08263 f Q_{i,k,j}^2}{\phi_{i,k,j}^5} \quad (32)$$

$$k_2 = \left(d_{i,k,j} + \frac{e_{i,k,j}}{2} \right)^2 \quad (33)$$

$$k_3 = \left(d_{i,k,j} + \frac{e_{i,k,j}}{2} \right) \quad (34)$$

$$k_4 = \frac{1}{4} \quad (35)$$

que, ao derivar, obtemos:

$$f'(e_{i+1,1,j}) = 4k_4 e_{i+1,2,j}^3 + 3k_3 e_{i+1,2,j}^2 + 2k_2 e_{i+1,2,j} - k_1 \quad (36)$$

De maneira análoga obtemos a equação para os emissores posicionados após a torre:

$$f(e_{i+1,2,j}) = k_4 e_{i+1,2,j}^4 - k_3 e_{i+1,2,j}^3 + k_2 e_{i+1,2,j}^2 - k_1 e_{i+1,2,j} - k_0 \quad (37)$$

e sua derivada:

$$f'(e_{i+1,2,j}) = 4k_4 e_{i+1,2,j}^3 - 3k_3 e_{i+1,2,j}^2 + 2k_2 e_{i+1,2,j} - k_1 \quad (38)$$

A raiz das Equações (30) e (37) é estimada através do método numérico de Newton-Raphson, valores cada vez mais próximos da raiz da equação podem ser obtidos através de:

$$e_{i+1,k,j_1} = e_{i+1,j_0} - \frac{f(e_{i+1,k,j_0})}{f'(e_{i+1,k,j_0})} \quad (39)$$

a figura traduz a aplicação do método:

Figura 13 – Método iterativo de Newton-Raphson utilizado na determinação do espaçamento entre emissores (Equações (30) e (36), antes da torre – Equações (37) e (38), após a torre) assumindo erro máximo de 10^{-15} (Equação (40))

$$f(e_{i+1,k,j_0}) \leq 10^{-15} \quad (40)$$

3.4.3 Diâmetros equivalentes nas junções da tubulação telescópica

O cálculo dos espaçamentos é realizado partindo-se da extremidade da barra e é encerrado em um regulador de pressão localizado no eixo que cruza a torre em que a

barra será instalada. A pressão nesse ponto deve corresponder à pressão de operação de um regulador comercial, para facilitar a construção do equipamento, este acerto é obtido ao combinar duas tubulações de diâmetros diferentes em uma mesma barra, cujos comprimentos são obtidos por uma rotina iterativa de dimensionamento. Esse critério de dimensionamento propicia uma economia nos volumes de tubulação utilizados. Para determinar a perda de carga no trecho da emenda podemos utilizar a regra de Dupuit, para obter o diâmetro equivalente (ϕ_E , m) (AZEVEDO NETTO et al., 1998):

$$\frac{L_E}{\phi_E^{2m+n}} = \frac{L_1}{\phi_1^{2m+n}} + \frac{L_2}{\phi_2^{2m+n}} + \dots + \frac{L_i}{\phi_i^{2m+n}} \quad (41)$$

Como o dimensionamento envolve apenas dois diâmetros e a emenda das tubulações 1 e 2 será realizada no ponto médio do espaçamento entre dois emissores, podemos reescrever a Equação (41) da seguinte maneira, utilizando-se os expoentes m e n propostos por Blasius (MORRIS; WIGGERT, 1972):

$$\phi_E = \frac{1,571\phi_1\phi_2}{(\phi_1^{4,75} + \phi_2^{4,75})^{\frac{1}{4,75}}} \quad (42)$$

3.4.4 Ciclo de trabalho da válvula solenóide

O ciclo de trabalho (CT , adimensional) da válvula solenóide depende da distância entre a torre e o pivô, ao aumentar o CT (Equação (43)) diminuimos a calda máxima do sistema, o que diminui o intervalo de caldas de pulverização passíveis de serem aplicadas pelo Notliada, no entanto o aumento do ciclo de trabalho viabiliza a redução da calda aplicada nas barras mais externas, o que resulta em um posicionamento mais espaçado de emissores e menor desvio entre as vazões estimadas e as obtidas com pulsos.

$$CT = \frac{TL}{DC} = \frac{TL}{TL + TD} \quad (43)$$

em que DC (s) é a duração do ciclo, TL e TD (s) são respectivamente o tempo ligado e o tempo desligado. Vilela (2002) obteve coeficientes de variação satisfatórios entre a vazão estimada e a coletada para $TD = 3,5$ s e $TL = 0,3$ s, que é o regime de operação da segunda barra do primeiro vão, que determina a calda mínima aplicada pelo sistema.

A primeira barra opera em ciclos de trabalho menores, devido às baixas velocidades de deslocamento, e as barras mais exteriores em ciclos cada vez maiores devido aos incrementos na área coberta pelos emissores.

3.5 Cenários de dimensionamento

O dimensionamento foi realizado, variando-se dois fatores: (i) o material utilizado na tubulação, PVC ou PEMD; e (ii) as torres devem ou não ser intercambiáveis. Sendo os quatro cenários diferentes: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis.

3.6 Determinação da uniformidade estatística final do dimensionamento

Se duas variáveis são independentes, mas contribuem para a variância de uma terceira variável, podemos aplicar o teorema de Pitágoras para achar o coeficiente de variação resultante (BRALTS; WU; GITLIN, 1981). No caso do sistema Notliada tem-se como fontes de variação independente: (i) a qualidade da manufatura dos emissores, representada pelo coeficiente de variação de fabricação (C_{vf} , adimensional); (ii) a distribuição das vazões ao longo da barra, gerada pela alocação dos emissores e representada pelo coeficiente de variação resultante nos espaçamentos utilizados (C_{vd} , adimensional); e (iii) diferenças nas caldas aplicadas por cada emissor, representadas pelo coeficiente de variação das caldas (C_{vc} , adimensional). A aplicação do teorema de Pitágoras pode ser observada na figura:

Figura 14 – Aplicação estatística do teorema de Pitágoras

Podemos calcular o Cvd , que depende do perfil gerado pela sobreposição no espaçamento adotado ($e_{i,k,j}$) e é ponderado pela área varrida pelo emissor ($A_{i,k,j}$), através da expressão:

$$Cvd = \frac{1}{A_t} \left(\sum_{i=1}^n A_{i,0,0} Cve_{i,0,0} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n A_{i,k,j} Cve_{i,k,j} \right) \quad (44)$$

em que Cve é o coeficiente de variação gerado pela sobreposição dos emissores no espaçamento adotado para o i -ésimo ponto da barra de aplicação e A_t (m^2) a área total coberta pelo sistema.

O Cvc pode ser calculado através da equação:

$$Cvc = \sqrt{\frac{1}{A_t} \left(\sum_{i=1}^n A_{i,0,0} (C_{i,0,0} - C_{média})^2 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n A_{i,k,j} (C_{i,k,j} - C_{média})^2 \right)} / C_{média} \quad (45)$$

Podemos representar o coeficiente de variação do sistema Notliada relacionado à qualidade da manufatura de seus emissores e aos espaçamentos utilizados ($Cvnt_1$) pela equação:

$$Cvnt_1 = \sqrt{Cvf^2 + Cvd^2} \quad (46)$$

O coeficiente de variação final do sistema Notliada é calculado através da expressão:

$$Cvnt_2 = \sqrt{Cvc^2 + Cvnt_1^2} \quad (47)$$

A uniformidade estatística (U_s) do sistema é obtida através da equação (BRALTS; WU; GITLIN, 1981):

$$U_s = 100(1 - Cvnt_2) \quad (48)$$

Os valores obtidos foram classificados de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos valores de uniformidade estatística (Us, %)

Us	Classificação
90 – 100	Excelente
80 – 90	Muito bom
70 – 80	Regular
60 – 80	Ruim
0 – 60	Inaceitável

(BRALTS; WU; GITLIN, 1982)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição do emissor e espaçamento máximo

As distribuições do emissor foram avaliadas em duas pressões diferentes e em três diferentes alturas, abaixo podemos observar as distribuições obtidas na altura de trabalho escolhida, 0,6 metros, por proporcionar os maiores espaçamentos entre emissores:

Figura 15 – Perfis obtidos na mesa de distribuição para os modelos MRI08 (I), MRI12 (II), MRI16 (III) e MRI20 (IV), nas pressões máxima (Máx) e mínima (Mín)

Na Tabela 4 pode-se observar as vazões coletadas nos ensaios de distribuição (Q_{md} , L h⁻¹), comparadas às fornecidas pelo fabricante (Q_f , L h⁻¹) e às obtidas nos ensaios de vazão *versus* pressão (Q_{HxQ} , L h⁻¹). A eficiência de coleta diz respeito à razão entre Q_{md} e Q_{HxQ} , a diferença entre esses valores diz respeito a frações da vazão retidas na mesa e coletadas por provetas que não atingiram altura mínima de leitura.

Tabela 4 – Pressão de trabalho (H , mca), vazões segundo o fabricante (Q_f , L h⁻¹), vazões obtidas na mesa de distribuição (Q_{md} , L h⁻¹), vazões obtidas nos ensaios Q *versus* H (Q_{HxQ} , L h⁻¹), Eficiência de coleta (E_{col} , %), Alcance máximo no lado A da distribuição (AmA , m) e no lado B (AmB , m)

Modelo	H	Q_f	Q_{md}	Q_{HxQ}	E_{col}^1	AmA	AmB
MRI08	20,39	28,40	27,16	28,11	96,62	-0,725	0,700
	35,69	36,70	35,26	36,98	95,33	-0,725	0,700
MRI12	20,39	47,30	46,14	47,42	97,31	-0,850	0,850
	35,69	61,30	60,79	62,71	96,94	-0,750	0,750
MRI16	20,39	60,20	56,64	59,04	95,94	-0,900	0,900
	35,69	77,60	74,95	77,95	96,15	-0,850	0,900
MRI20	20,39	67,40	64,46	66,12	97,48	-1,025	1,000
	35,69	88,60	85,06	86,94	97,84	-1,100	1,075

$$^1E_{col} = 100 * Q_{md} / Q_{HxQ}$$

Pode-se observar na Figura 15 que os perfis de distribuição dos emissores são bimodais, com exceção do modelo MRI08, o que é esperado de emissores de cone vazio. Este comportamento se reflete nas curvas de espaçamento *versus* C_v , que tem um padrão senoidal, cujos máximos locais coincidem com a sobreposição das modas observadas no perfil de distribuição individual, podemos observar as sobreposições no espaçamento máximo e as curvas de espaçamento x C_v nas figuras que vão de Figura 16 até Figura 27. Os espaçamentos máximos obtidos para a altura de trabalho de 0,6 metros podem ser observados na tabela:

Tabela 5 – Espaçamentos máximos ($e_{max,m}$, m) e coeficiente de variação da distribuição no intervalo 2 – 3 (Cve , %), obtidos nas pressões (H , mca) de trabalho mínima e máxima

Modelo	MRI08		MRI12		MRI16		MRI20	
H	20,39	35,69	20,39	35,69	20,39	35,69	20,39	35,69
$e_{max,m}$	0,950	0,825	0,625	0,525	0,700	0,675	0,850	0,875
Cve	11,66	11,8	10,98	10,58	9,35	10,33	11,43	11,65

Figura 16 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média (Q , %), para o modelo MRI08, no intervalo entre os emissores 2 e 3, no espaçamento máximo, para as pressões mínima (I) e máxima (II)

Figura 17 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI08 na pressão mínima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 18 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI08 na pressão máxima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 19 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média (Q , %), para o modelo MRI12, no intervalo entre os emissores 2 e 3, no espaçamento máximo, para as pressões mínima (I) e máxima (II)

Figura 20 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI12 na pressão mínima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 21 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI12 na pressão máxima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 22 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média (Q , %), para o modelo MRI16, no intervalo entre os emissores 2 e 3, no espaçamento máximo, para as pressões mínima (I) e máxima (II)

Figura 23 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI16 na pressão mínima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 24 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI16 na pressão máxima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 25 – Perfil de distribuição das vazões em porcentagem da vazão média (Q , %), para o modelo MRI20, no intervalo entre os emissores 2 e 3, no espaçamento máximo, para as pressões mínima (I) e máxima (II)

Figura 26 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI20 na pressão mínima e nas sobreposições AB, AA e BB

Figura 27 – Curvas de coeficiente de variação (C_v , %) *versus* espaçamento (m) para o modelo MRI20 na pressão máxima e nas sobreposições AB, AA e BB

Podemos observar que os maiores espaçamentos foram obtidos para os modelos MRI08 e MRI20, os modelos intermediários obtiveram pequenos espaçamentos máximos, se levarmos em conta a vazão. Esta característica levou o processo de dimensionamento a selecionar apenas os modelos MRI08 e MRI20.

4.2 Características do emissor

Os diâmetros dos bocais e o coeficiente de variação de uma amostra de 30 unidades podem ser observados na tabela:

Tabela 6 – Diâmetro ($\emptyset$, mm) e coeficiente de variação (C_v , %) dos quatro modelos de emissor estudados (MRI08, MRI12, MRI16 e MRI20)

	MRI08	MRI12	MRI16	MRI20
$\emptyset$	1,461	2,124	2,402	2,765
C_v	1,385	0,251	0,704	0,331

O pequeno coeficiente de variação entre os diâmetros dos modelos analisados influi positivamente no resultado final do dimensionamento, tornando a pulverização mais uniforme. Esta característica é reforçada pelos baixos coeficientes de variação de fabricação obtidos:

Tabela 7 – Vazão média (Q_m , L h⁻¹), coeficiente de variação (C_v , %) e coeficiente de variação de fabricação (C_{vf} , % - $H = 30,59$ mca), em função da pressão (H , mca), para os quatro modelos de emissor estudados

H	Variável	MRI08	MRI12	MRI16	MRI20
20,39	Q_m	28,11	47,42	59,04	66,12
	C_v	1,78	2,02	3,05	1,21
25,49	Q_m	31,41	52,90	65,78	73,27
	C_v	1,84	1,86	3,33	0,94
30,59	Q_m	34,30	57,85	72,29	80,29
	C_{vf}	1,84	2,12	3,27	0,83
35,69	Q_m	36,98	62,71	77,95	86,94
	C_v	1,87	1,75	3,17	0,91

Figura 28 – Vazões dos modelos de emissor estudados em relação à média (Q, %), $H = 30,59$ mca. MRI08 (I); MRI12 (II); MRI16 (III); e MRI20 (IV)

As equações de pressão *versus* vazão para os modelos analisados estão expostas na Tabela 8:

Tabela 8 – Parâmetros de ajuste para as funções de pressão *versus* vazão

Modelo	α	β	r^2
MRI08	6,1916	0,5	0,999
MRI12	10,4524	0,5	0,999
MRI16	13,0173	0,5	0,999
MRI20	14,5555	0,5	0,998

Observamos altos coeficientes de determinação para as funções de pressão *versus* vazão, apesar de o expoente ter sido fixado e do erro multiplicativo

envolvido na linearização, feita através da aplicação de logaritmo ao conjunto de dados. Com isso as etapas de cálculo foram facilitadas sem afetar a precisão das estimativas de vazão ao longo da barra.

4.3 Aplicativo de dimensionamento

Para o cálculo do espaçamento dos emissores na barra de pulverização foi desenvolvido um aplicativo em linguagem Object Pascal (através de um compilador Delphi®). O programa de dimensionamento tem como centro as funções de cálculo do espaçamento para as barras localizadas antes da torre (CalculaESPAT) e depois da torre (CalculaESPDP). Uma visão geral do fluxo de informações é obtida através das Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29 – Fluxograma do dimensionamento geral

Figura 30 – Fluxo de informações da função de dimensionamento das barras localizadas antes da torre ($k = 1$), CalculaESPAT

Figura 31 – Fluxo de informações da função de dimensionamento das barras localizadas depois da torre ($k = 2$), CalculaESPDP

As rotinas de obtenção dos espaçamentos também acertam a pressão no final da barra, através da combinação entre dois diâmetros diferentes, tal rotina propicia a

economia de material e o uso de reguladores de pressão nas faixas de pressão comerciais. No caso do dimensionamento específico para cada torre o número de emissores tende a diminuir conforme nos afastamos do ponto pivô, tal efeito é propiciado pelo ajuste no tempo ligado da válvula solenóide. Os ciclos de trabalho cada vez menores também reduzem a variação entre a vazão aplicada e a estimada através dos pulsos.

Na Figura 32 podemos observar a interface do aplicativo de dimensionamento, sua utilização é bem simples, basta inserir os dados do sistema de irrigação e dos emissores que se pretende utilizar, para o cálculo visando torres intercambiáveis, quando possível, basta marcar a opção barras iguais.

Dados do Pivô

Nome do Projeto: Notliada 4.0 ☐ Barras iguais

Início do Plantio: 10 metros

L Balanço: 25

Número de vãos: 10

Velocidade: 264,2 m/h

L vão: 55,11 metros

4	55,11
5	55,11
6	55,11
7	55,11
8	55,11

Dados dos emissores

Pmin: 20,394324 mca TL: 0,3 s

Pmax: 35,690067 mca TD: 3,5 s

Inserção: H 0,01 m L 0,01 m

Código: MRI20

Alpha: 14,55546055 $L/(h.mca^{1/2})$

emax: 0,85 metros

N	Código	Alpha	emax
1	MRI08	6,191590031	0,95
2	MRI20	14,55546055	0,85

Dimensiona Notliada

Figura 32 – Tela do aplicativo de dimensionamento do sistema de pulverização acoplável a pivô central Notliada, mostrando as entradas de dados do sistema

4.4 Resultados do dimensionamento

Para comparar os cenários de dimensionamento: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD

intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis. Variou-se de 1 a 15 o número de torres do equipamento, fixando-se a velocidade em $264,2 \text{ m h}^{-1}$, com lances de 55,11 metros e balanço de 25 metros.

Ao avaliarmos a uniformidade estatística para os diferentes cenários observamos que os dimensionamentos que visam barras intercambiáveis tem um pequeno decréscimo inicial, chegando a um mínimo de 88 %, ainda classificado como muito bom, e depois volta a margear o limite entre as classificações excelente e muito bom (90%), sem se diferenciar substancialmente dos cenários de barras exclusivas para cada torre. Porém, deve-se considerar a amplitude entre as caldas mínima e máxima em algumas torres, que pode chegar a 60 litros. Esta amplitude pode causar sérios problemas de fitotoxidez e controle deficitário, dependendo do agroquímico utilizado. A Figura 33 ilustra a variação na uniformidade estatística para os quatro cenários estudados.

Figura 33 – Uniformidade estatística (Us, %), em função do número de torres, para os quatro cenários de dimensionamento estudados: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis

As diferença na Us para os cenários (a) e (c) deve-se exclusivamente à variação nas caldas aplicadas por cada emissor ao se extrapolar o dimensionamento de uma torre, o que pode ser observado no gráfico de Cvc em função do número de torres, o qual possui o mesmo padrão das depleções nas curvas destes cenários (Figura 34).

Figura 34 – Coeficiente de variação da calda (Cvc , %), em função do número de torres, para os cenários de dimensionamento: (a) barras de PVC intercambiáveis; e (c) barras de PEMD intercambiáveis

Podemos comparar os três cenários em relação ao custo de implantação apenas comparando os custos com a tubulação das barras, pois as vazões dos sistemas de pulverização são inerentes às características do sistema de irrigação, assim como o número de solenóides e a adutora a ser utilizada. O número de emissores utilizados também independe dos cenários, variando minimamente entre as situações analisadas, sendo relacionado às características dos conjuntos de emissão. Pode-se observar a variação no custo da tubulação das barras, em função do número de torres para os quatro diferentes cenários na Figura 35.

Figura 35 – Custo da tubulação das barras de pulverização (CTB, R\$), em função do número de torres para os quatro cenários de dimensionamento estudados: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis

Para realizar uma comparação mais detalhada de cada dimensionamento utilizou-se como base o dimensionamento para um pivô central de 10 torres, as características dos sistemas dimensionados para (a), (b), (c) e (d) podem ser observadas na Tabela 9 e nas Figuras 36 à 43.

Tabela 9 – Características dos dimensionamentos: coeficiente de variação de distribuição (C_{vd} , %); coeficiente de variação das caldas (C_{vc} , %); coeficiente de variação do sistema Notliada (C_{vnt_2} , %); uniformidade estatística (U_s , %); calda máxima passível de ser aplicada pelo sistema ($C_{máx}$, $L\ ha^{-1}$); número de emissores (n_e); e custo da tubulação da barra (CTB, R\$). Para os quatro cenários: (a) barras de PVC intercambiáveis; (b) barras de PVC não intercambiáveis; (c) barras de PEMD intercambiáveis; e (d) barras de PEMD não intercambiáveis.

	C_{vd}	C_{vc}	C_{vnt_2}	U_s	$C_{máx}$	n_e	CTB
(a)	6,61	7,24	9,98	90,02	1142	689	1262,39
(b)	7,03	0,00	7,26	92,74	1294	699	1350,38
(c)	6,46	7,20	9,85	90,15	1171	695	939,33
(d)	7,04	0,00	7,28	92,72	1155	692	1191,13

Figura 36 – Calda com pulsos ($L\ ha^{-1}$) e espaçamentos ($e_{i,k,j}$, m), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (a) barras de PVC intercambiáveis

Figura 37 – Pressão no ponto de inserção do emissor ($H_{i,k,j}$, mca) e diâmetro de tubulação utilizado ($\varnothing_{i,k,j}$, mm), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (a) barras de PVC intercambiáveis

Figura 38 – Calda com pulsos ($L\ ha^{-1}$) e espaçamentos ($e_{i,k,j}$ m), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (b) barras de PVC não intercambiáveis

Figura 39 – Pressão no ponto de inserção do emissor ($H_{i,k,j}$ mca) e diâmetro de tubulação utilizado ($\varnothing_{i,k,j}$ mm), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (b) barras de PVC não intercambiáveis

Figura 40 – Calda com pulsos ($L\ ha^{-1}$) e espaçamentos ($e_{i,k,j}$, m), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (c) barras de PEMD intercambiáveis

Figura 41 – Pressão no ponto de inserção do emissor ($H_{i,k,j}$, mca) e diâmetro de tubulação utilizado ($\varnothing_{i,k,j}$, mm), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (c) barras de PEMD intercambiáveis

Figura 42 – Calda com pulsos ($L\ ha^{-1}$) e espaçamentos ($e_{i,k,j}$, m), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (d) barras de PEMD não intercambiáveis

Figura 43 – Pressão no ponto de inserção do emissor ($H_{i,k,j}$, mca) e diâmetro de tubulação utilizado ($\varnothing_{i,k,j}$, mm), resultantes do dimensionamento do sistema Notliada para o cenário (d) barras de PEMD não intercambiáveis

Podemos observar que para os cenários (b) e (d) os dimensionamentos para as torres mais externas possuem emissores cada vez mais espaçados, no caso do cenário (d) as linhas que representam os espaçamentos em cada torre ficam quase paralelas ao eixo x , este efeito se deve ao aumento do ciclo de trabalho da válvula solenóide.

Das quatro situações apresentadas podemos destacar as pressões nas barras mais externas para o cenário (d), que são bem baixas em relação às demais, a diminuição da pressão requerida pela barra no final da adutora pode levar a uma economia em energia na operação do sistema. Este fator não pode ser controlado durante o dimensionamento. A alocação de diâmetros grandes nas barras pode ocorrer devido a incrementos relativamente menores de área, frente ao aumento da pressão na barra, fazendo com que os espaçamentos excedam o máximo recomendado para o emissor, já que este é o espaçamento inicial é igual ao máximo quando $k = 1$.

4.5 Considerações gerais

4.5.1 Características dos emissores

O espectro de gotas gerado pelo emissor e pela sua associação em uma barra de pulverização deve ser estudado para que se possa determinar a eficiência de aplicação do sistema em condições de campo, pois este influi diretamente na deriva, penetração no dossel e índice de cobertura da área foliar. A durabilidade destes componentes deve também ser determinada, pois os agroquímicos em geral são abrasivos e podem reduzir significativamente a vida útil de conjuntos de emissão construídos para outros propósitos.

4.5.2 Construção de um protótipo

Para dar continuidade ao trabalho é essencial a construção de um protótipo e sua avaliação em condições de campo, o que permitiria um levantamento mais detalhado das variáveis que determinam a aplicabilidade do sistema.

4.5.3 Agricultura de precisão

Com um maior nível de segmentação das barras de pulverização seria possível a aplicação de defensivos em taxa variada, o que exigiria mais eletrônica embarcada, a

geração de mapas detalhados para determinar as variações na taxa de aplicação e a integração com um sistema geográfico de informações.

4.6 Considerações finais

4.6.1 Cenários de dimensionamento

O dimensionamento visando barras intercambiáveis obteve níveis de uniformidade estatística classificados entre excelente e muito bom, no entanto este critério leva a amplitudes entre a calda máxima e mínima da ordem de 60 litros por hectare, o que pode causar problemas de sub e superdosagem do princípio ativo aplicado. Dependendo do agroquímico utilizado este fator pode levar prejuízos significativos para o agricultor.

O uso do PMED na composição do sistema gera menores custos e foi escolhido como alternativa ao PVC marrom soldável.

4.6.2 Inovações

O comando independente de uma barra para pulverizar apenas do início da cultura até o ponto médio do primeiro lance permite diminuir a calda aplicada através de reduzidos ciclos de trabalho, sem penalizar a sobreposição, já que a velocidade de caminhamento máxima desta barra tem como limite a metade da velocidade da torre, já que uma das extremidades do lance é fixa.

O dimensionamento independente de cada torre permite o aumento do tempo ligado do ciclo de trabalho da válvula solenóide, pelo fato das torres externas cobrirem áreas cada vez maiores, isso gera uma redução dos desvios entre a vazão estimada e a aplicada por cada emissor, melhorando a uniformidade do sistema.

A utilização de diâmetros telescópicos nas barras de pulverização permite o acerto de pressão na entrada da barra, fazendo que com que esta seja compatível com as pressões de trabalho de reguladores comerciais. A utilização de diâmetros telescópicos propicia também uma economia nos volumes de tubulação utilizados.

As solenóides de cada torre comandam barras cujo comprimento máximo é a metade do comprimento do lance, o que pode gerar uma reação mais rápida dos

emissores ao pulso, aumentando a uniformidade. Sendo que, na modulação por pulsos de uma barra, o tempo de caminhamento do transiente hidráulico é uma importante fonte de variação dos volumes aplicados.

A rotina de dimensionamento do aplicativo Notliada 4.0 não escolhe os modelos utilizados em cada ponto da barra através de limites impostos pelo usuário, ao invés disso são calculados os espaçamentos para cada modelo disponível em todos os pontos e então o sistema escolhe o espaçamento máximo gerado. Essa rotina propicia uma alocação mais eficiente dos emissores na barra de pulverização, reduzindo o custo final.

5 CONCLUSÕES

A metodologia de dimensionamento proposta pode alcançar volumes de pulverização classificados como baixos, na faixa de aplicações tratorizadas, para os cenários estudados obteve-se um volume de calda mínimo de 173 L ha^{-1} . O volume de calda máximo passível de ser aplicado foi de 1200 L ha^{-1} , o que proporciona uma faixa de trabalho de aproximadamente 1000L.

Os modelos de emissor estudados apresentaram distribuições uniformes e coeficientes de variação fabricação adequados à sua aplicação em sistemas de pulverização. Outras características como bocais grandes em relação às vazões aplicadas e válvulas anti gotas integradas ao corpo do emissor favorecem sua utilização em um protótipo final.

Tanto o dimensionamento visando barras intercambiáveis quanto o exclusivo geraram uniformidades estatísticas excelentes, porém a amplitude entre as caldas mínimas e máximas chegou a 60 L ha^{-1} nas extrapolações mais internas do dimensionamento, o que não é desejável em uma aplicação por causar riscos relacionados ao controle ineficiente e à superdosagem.

A rotina de dimensionamento pode utilizar qualquer modelo de emissor cujas características sejam conhecidas pelo usuário, não possuindo elementos específicos relacionados aos emissores estudados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS.

Standards: best management practices for boom spraying. St. Joseph, 2007. 6 p.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNADEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, R.E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blücher, 1998. 670 p.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 1, p. 1-7, Jan./ Feb. 1997.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BRALTS, V.F.; WU, I.P.; GITLIN, H.M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, p. 113-119, 1981.

_____. Emitter plugging and drip irrigation lateral line hydraulics. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 2, p. 1274-1281, may 1982.

CHARNET, R.; FREIRE, C.A.L.; CHARNET, E.M.R.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear**. 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2008. 368 p.

CHURCHILL, S.W. Friction factor equation spans all fluid-flow regimes. **Journal of Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 84, n. 24 p. 91-92, Nov. 1977.

COELHO, R.D. **Contribuições para a Irrigação Pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CUENCA, R.H. **Irrigation system design: an engineering approaching**. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 552 p.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. Quimigação na cultura do feijão. In: FOLEGATTI, M.V. **Fertirrigação**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 393-432.

_____. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

DOWLER, C.C. Chemigation. In: MATTHEWS, G.A.; HISLOP, E.C. **Application technology for crop protection**. Wallingford: CAB International, 1993. chap. 16, p. 317-328.

EVANS, R.G.; WALLER, P.M. Application of chemical materials. In: LAMN, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 2007. chap. 8, p. 285-327.

FARAHANI, H.J.; SHANER, D.L.; BUCHLEITER, G.W.; BARTLETT, G.A. Evaluation of a low volume agro-chemical application system for center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, n. 4, p. 517-525, 2006.

FRAISSE, C.W.; DUKE, H.R.; HEERMANN, D.F. Laboratory evaluation of variable water application with pulse irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 5, p. 1363-1369, May 1995.

GARVEY, P.M. **Liquid chemical spraying apparatus movable by a tower-type water irrigation system. US 4.277.026**, Feb. 20 1980. July 7 1981.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Equipment fo crop protection: spraying equipment. Part 1: Test methods for sprayer nozzles. ISO 5682-1**. Genève, 1993. 43 p.

JOHNSON, A.W.; YOUNG, J.R.; THREADGILL, E.D.; DOWLER, C.C.; SUMNER, D.R. Chemigation for crop production. **Plant Disease**, St. Paul, v. 70, n. 11, p. 998-1004, 1986.

KARMELI, D.; PERI, G. Basic principles of pulse irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 100, n. 3, p. 309-319, Sept. 1974.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

LARRAÍN, P.S.; QUIROZ, C.E. Chemigation. In: PIMENTEL, D. **Encyclopedia of pest management**. Boca Ratoon: CRC Press, 2007. v. 2, p. 63-66.

LARSEN, R. Piggyback system turns pivot into chemical applicator. **Irrigation Age**, Chicago, v. 15, n. 3, p. 8-9, Nov./Dec. 1980.

MARTIN, D.L.; KINCAID, D.C.; LYLE, W.M. Design and operation of sprinkler systems. In: HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOT, R.L. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd ed. St. Joseph: ASABE, 2007. p. 557-631.

MATTHEWS, G.A. **Pesticide application methods**. 2nd ed. London: Blackwell Science, 2000. 448 p.

MORRIS, H.M.; WIGGERT, J.M. **Applied hydraulics in engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1972. 455 p.

NEW, L.; FIPPS, G. **Center pivot irrigation**. Texas A&M University, 1995. Disponível em: <<http://repository.tamu.edu>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

PALACÍN, J.; SALSE, J.A.; CLUA, X.; ARNÓ, J.; BLANCO, R.; ZANUY, C. Center pivot automatization for agrochemical use. **Computers and Eletrons in Agriculture**, Amsterdam, v. 49, n. 3, p. 419-430, Dec. 2005.

PEREIRA, A.S. **Desenvolvimento de um protótipo aplicador de produtos químicos para um sistema de irrigação pivô central**. 2001. 64 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PIERCE, R.A.; AYERS, P.D. Evaluation of deposition and application accuracy of a pulse width modulation variable rate field sprayer. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2001, Sacramento. **Proceedings...**: Sacramento, 2001. p. 33.

SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P.; BUCKMASTER, D.R. **Engineering principles of agricultural machines**. 2nd ed. St. Joseph: ASABE, 2006. p. 239-324.

SUMNER, H.R.; DOWLER, C.C.; GARVEY, P.M. Application of agrichemicals by chemigation, pivot-attached spray systems, and conventional sprayers. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 16, n. 2, p. 103-107, 2000.

SUMNER, H.R.; GARVEY, P.M.; HEERMANN, D.F.; CHANDLER, L.D. Center pivot irrigation attached sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 13, n. 3, p. 323-327, Feb. 1997.

TARJUELO, J.M. **El riego por aspersión y su tecnología**. Madrid: Mundi-Prensa, 1995. 569 p.

UNIVERSITY OF MINNESOTTA. Extension Service. Chemigation. In: _____. **Private pesticide applicator's manual**. 18th ed. [S.l.], 2004. chap. 9, p. 143-159.

VALMONT INDUSTRIES (United States). Chapman, J.A. **Chemical distribution system**. **U.S.5.678.771**, 21 April 19 1995. October 21 1997.

VAN EMDEN, H.F.; PEAKALL, D.B. **Beyond silent spring**: integrated pest management and chemical safety. New York: Chapman & Hall, 1996. 322 p.

VILELA, L.A.A. **Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central**. 2002. 149 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ANEXOS

Código fonte do aplicativo desenvolvido em linguagem Object Pascal para o dimensionamento do sistema Notliada

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Grids, Buttons, math, ExtDlgs;
type
  TExtended=Array of Extended;
  TDime=Array of Array of String;
  TForm1 = class(TForm)
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    AdicionaEmissor: TButton;
    Label4: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    StringGrid1: TStringGrid;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    GroupBox1: TGroupBox;
    GroupBox2: TGroupBox;
    DimensionaNotliada: TBitBtn;
    Edit7: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label10: TLabel;
    AdicionaVao: TButton;
    StringGrid2: TStringGrid;
    Edit9: TEdit;
    Label15: TLabel;
    SaveTextFileDialog1: TSaveTextFileDialog;
    Label14: TLabel;
    Label16: TLabel;
    Edit8: TEdit;
    Label17: TLabel;
    Label18: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Label13: TLabel;
    Edit11: TEdit;
    Label19: TLabel;
    Label20: TLabel;
    Label21: TLabel;
    Label22: TLabel;
    Edit12: TEdit;
  end;

```



```

Edit13: TEdit;
Label23: TLabel;
Edit14: TEdit;
Edit15: TEdit;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
Barrasiguais: TCheckBox;
procedure AdicionaEmissorClick(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure DimensionaNotliadaClick(Sender: TObject);
procedure Edit5Change(Sender: TObject);
procedure Edit7Exit(Sender: TObject);
procedure AdicionaVaoClick(Sender: TObject);
private
{ Private declarations }
public
Var
  S,Nvao,Dant,J,MontaVetor,MontaVetor2:Integer;
  tole,Dj,V,Pmin,Pmax,Cant,PRA,CoCult,Hins,Lins:extended;
  Codigo:array of string;
  Alpha,emax,DjVaoJ:TExtended;
  NvaoN:array of integer;
end;
var
  Form1: TForm1;
implementation
{$R *.dfm}
function CalculaESPAT(Nvao,S:Integer;V,Dj,Pmin,Pmax,CoCult,Djn,Hins,Lins:Extended;Codigo:array of
string;alpha,emax:array of extended;trechoA:boolean): TDime;
var
  l,MudaD,DI,N,PR,P:integer;

Fimbarra,tole,dij,C,k0,k1,k2,k3,f,NR,feij,dfeij,Q,Pij,eaij,Ceij,It,A,B,hf,qi,Ci,D,DeltaP,D1,D2,D3,Pfim,Le,KIO1
,KIO2,KIO:extended;
  eij,Cmin,ESP,qij,QSUM,PIJS1,PIJS2,Cij,DTubo,NIJ,DIST:TExtended;
  Codimin:string;
  Mapa,Cordenada:Array of String;
  Dime:TDime;
  NI:array of integer;
const {Constantes envolvidas no dimensionamento, como pressão do regulador, diâmetro e espessura da
tubulação}
  k4=0.25;
  Diametro: array[1..9] of real = (0.017,0.0216,0.0278,0.0352,0.044,0.0534,0.0666,0.0756,0.0978);
// Diametro: array[1..6] of real = (0.017,0.022,0.0288,0.0362,0.0452,0.057);
  Espessura: array[1..9] of real = (0.0015,0.0017,0.0021,0.0024,0.003,0.0033,0.0042,0.0047,0.0061);
// Espessura: array[1..6] of real = (0.0015,0.0015,0.0016,0.0019,0.0024,0.003);
  Regulador: array[1..7] of real = (7.0307,10.54605,14.0614,17.57675,21.0921,28.1228,35.1535);
begin
{Calcula calda mínima}
if trechoA=true then Fimbarra:=Dj/2 else Fimbarra:=Djn;
if Pmax>Regulador[7] then Pmax:=Regulador[7];
setlength(Cmin,S);
for l := 0 to S - 1 do
begin

```

```

case trechoA of
  true:
    Cmin[I]:=alpha[I]*power(Pmin,0.5)*Djn/(emax[I]*(CoCult+emax[I]/2)*V);
  false:
    Cmin[I]:=alpha[I]*power(Pmin,0.5)*Djn/(emax[I]*(Djn-dj/2+emax[I]/2)*V);
end;
end;
C:=Cmin[0];
for I := 1 to S - 1 do
  if C>Cmin[I] then C:=Cmin[I];
end;
for I := 0 to S - 1 do
  if Cmin[I]=C then break;
  begin
    Q:=alpha[I]*power(Pmin,0.5)/3600000;
    eaij:=emax[I];
    if trechoA=false then di:=Djn-dj/2+emax[I]/2 else di:=CoCult+emax[I]/2;
    MudaD:=-999;
    Codimin:=Codigo[I];
    DI:=1;
  end;
end;
{Calcula espaçamento dos emissores}
{Antes da torre}
Pij:=Pmin;
setlength(eij,S);
setlength(NI,S);
setlength(ESP,1);
setlength(QSUM,1);
setlength(PIJS1,1);
setlength(Cij,1);
setlength(qij,1);
setlength(Mapa,1);
setlength(DIST,1);
setlength(NIJ,1);
setlength(Dtubo,1);
SetLength(Cordenada,1);
ESP[0]:=eaij;
QSUM[0]:=Q*3600000;
PIJS1[0]:=Pij;
Mapa[0]:=Codimin;
DIST[0]:=di;
NIJ[0]:=0;
qij[0]:=Q*3600000;
Cij[0]:=C;
Cordenada[0]:='1,1,'+inttostr(Nvao);
PR:=0;
repeat
  di:=DIST[0];
  Q:=QSUM[0]/3600000;
  eaij:=ESP[0];
  ceij:=eaij;
  Pij:=PIJS1[0];
  P:=0;
  repeat
    begin
      for I := 0 to S - 1 do
        begin

```

```

tole:=0.0000000000000001;
N:=0;
D1:=Diametro[DI];
KIO1:=1.68*power((pi*power(D1,2)/4)/((pi*power(D1,2)/4)-(Hins-Espessura[DI])*Lins)-1,0.646);
if DI>1 then
begin
D2:=Diametro[DI-1];
KIO2:=1.68*power((pi*power(D2,2)/4)/((pi*power(D2,2)/4)-(Hins-Espessura[DI])*Lins)-1,0.646);
D3:=power(2*power(Diametro[DI],4.75)*power(Diametro[DI-1],4.75)/(power(Diametro[DI],4.75)+power(Diametro[DI-1],4.75)),1/4.75);
end;
repeat
if P>MudaD then
begin
D:=D1;
KIO:=KIO1;
end
else
if P<MudaD then
begin
D:=D2;
KIO:=KIO2;
end
else
if P=MudaD then
begin
D:=D3;
KIO:=KIO2;
end;
NR:=1260630*Q/D;
A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D)),16);
B:=power(34530/NR,16);
f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);
Le:=KIO*D/f;
k0:=power(alpha[I]*Djn/(V*C),2)*(Pij+0.08263*f*power(Q,2)*(eaij/2+Le)/power(D,5));
k1:=power(alpha[I]*Djn/(V*C),2)*0.08263*f*power(Q,2)/(2*power(D,5));
k2:=power(dij+eaij/2,2);
k3:=dij+eaij/2;
feij:=k4*power(Ceij,4)+k3*power(Ceij,3)+k2*power(Ceij,2)-k1*Ceij-k0;
dfeij:=4*k4*power(Ceij,3)+3*k3*power(Ceij,2)+2*k2*Ceij-k1;
lt:=Ceij-(feij/dfeij);
Ceij:=lt;
N:=N+1;
if N/50>1 then Tole:=Tole*10;
until abs(feij)<=Tole;
eij[I]:=Ceij;
NI[I]:=N;
end;
for I := 0 to S - 1 do
if eij[I]>emax[I] then eij[I]:=0;
Ceij:=eij[0];
for I := 1 to S - 1 do
if Ceij<eij[I] then Ceij:=eij[I];
for I := 0 to S - 1 do
if eij[I]=Ceij then break;
begin

```

```

if (Ceij<=0) or (Pij>Pmax) then Ceij:=Dj;
dij:=dij+eaij/2+Ceij/2;
NR:=1260630*Q/D;
A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D)),16);
B:=power(34530/NR,16);
f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);
hf:=0.08263*f*power(Q,2)*(eaij/2+Ceij/2+Le)/power(D,5);
Pij:=Pij+hf;
eaij:=Ceij;
qi:=alpha[I]*power(Pij,0.5);
Ci:=qi*Djn/(Ceij*dij*V);
if P=0 then Dtubo[0]:=D;
P:=P+1;
setlength(ESP,P+1);
setlength(QSUM,P+1);
setlength(PIJS1,P+1);
setlength(Cij,P+1);
setlength(qij,P+1);
setlength(Mapa,P+1);
setlength(DIST,P+1);
setlength(NIJ,P+1);
setlength(DTubo,P+1);
setlength(Cordenada,P+1);
NIJ[P]:=NI[I];
ESP[P]:=eaij;
qij[P]:=qi;
Q:=qi/3600000+Q;
QSUM[P]:=Q*3600000;
PIJS1[P]:=Pij;
Mapa[P]:=Codigo[I];
CIJ[P]:=Ci;
Dtubo[P]:=D;
DIST[P]:=Dij;
Cordenada[P]:=Inttostr(P+1)+'1'+Inttostr(Nvao);
Pfim:=Pij+0.08263*f*power(Q,2)*abs(Fimbarra-dij)/power(D,5);
end;
end;
until Fimbarra<(dij+ceij);
{Acerta Pressão com regulador}
if Pfim>Pmax then DI:=DI+1 else {Se a pressão for maior que a do maior regulador disponível
aumenta-se o diâmetro}
if (PR = 0) and (ceij<>Dj) then {Se a pressão não for maior que a máxima e o espaçamento não
estourou, escolhe-se o regulador}
begin
if Pfim<=Regulador[1] then PR:=1 else
if Pfim<=Regulador[2] then PR:=2 else
if Pfim<=Regulador[3] then PR:=3 else
if Pfim<=Regulador[4] then PR:=4 else
if Pfim<=Regulador[5] then PR:=5 else
if Pfim<=Regulador[6] then PR:=6 else
if Pfim<=Regulador[7] then PR:=7;
end
else
{se o regulador foi escolhido, começa o cálculo da tubulação telescópica}
begin
DeltaP:=Regulador[PR]-Pfim;

```

```

setlength(PIJS2,P+1);
PIJS2[0]:=PIJS1[0];
if (deltaP>0) and (D=Diametro[1]) then {Se a pressão não alcançar a pressão do regulador e for
o diâmetro mínimo aumenta-se o diâmetro e escolhe-se um novo regulador}
begin
  DI:=DI+1;
  PR:=0;
end
else
begin {Senão acerta-se o comprimento das tubulações}
  for I := 1 to P - 1 do
    begin
      if DI=1 then D2:=D;
      NR:=1260630*(QSUM[I-1]/3600000)/D2;
      A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D2)),16);
      B:=power(34530/NR,16);
      f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);
      hf:=0.08263*f*power((QSUM[I-1]/3600000),2)*(ESP[I-1]/2+ESP[I]/2+Le)/power(D2,5);
      PIJS2[I]:=PIJS2[I-1]+hf;
      if PIJS2[I]>(PIJS1[I]+DeltaP) then break;
      MudaD:=I;
    end;
    if (MudaD>=P-1) or (Ceij=Dj) then
    begin
      PIJS1[0]:=PIJS1[0]+0.1;
      DI:=1;
      PR:=0;
      for I := 0 to S - 1 do
        Cmin[I]:=alpha[I]*power(PIJS1[0],0.5)*Djn/(emax[I]*(Djn-dj/2+emax[I]/2)*V);
        C:=Cmin[0];
        for I := 1 to S - 1 do
          if C>Cmin[I] then C:=Cmin[I];
        for I := 0 to S - 1 do
          if Cmin[I]=C then break;
        begin
          QSUM[0]:=alpha[I]*power(PIJS1[0],0.5);
          qij[0]:=QSUM[0];
          ESP[0]:=emax[I];
          CIJ[0]:=C;
          MudaD:=-999;
        end;
      end;
    end;
  end;
until abs(Pfim-Regulador[PR])<0.05*(Regulador[PR]);
Setlength(Dime,P+1,12);
{Grava a matriz de resultados do dimensionamento}
for I := 0 to P do
  begin
    Dime[I,0]:=Cordenada[I];
    Dime[I,1]:=floattostr(ESP[I]);
    Dime[I,2]:=Mapa[I];
    Dime[I,3]:=floattostr(PIJS1[I]);
    Dime[I,4]:=floattostr(DIST[I]);
    Dime[I,5]:=floattostr(qij[I]);
    Dime[I,6]:=floattostr(QSUM[I]);
  end;

```

```

    Dime[I,7]:=floattostr(Cij[I]);
    Dime[I,8]:=floattostr(Dtubo[I]);
    Dime[I,9]:=floattostr(NIJ[I]);
    Dime[I,10]:=floattostr(Regulador[PR]);
    Dime[I,11]:=inttostr(DI);
end;
result:=Dime;
end;
function
CalculaESPDP(Nvao,S,Dant:Integer;PRA,V,Dj,Pmin,Pmax,Cant,Djn,Hins,Lins:Extended;Codigo:array of
string;alpha,emax:array of extended): TDime;
var
    I,MudaD,DI,N,PR,P:integer;

tole,dij,C,k0,k1,k2,k3,f,NR,feij,dfeij,Q,Pij,eaij,Ceij,lt,A,B,hf,qi,Ci,D,DeltaP,D1,D2,D3,Pfim,Le,KIO1,KIO2,KI
O:extended;
    eij,Cmin,ESP,qij,QSUM,PIJS1,PIJS2,Cij,DTubo,NIJ,DIST:TExtended;
    Mapa:Array of String;
    Dime:TDime;
    NI:array of integer;
const {Constantes envolvidas no dimensionamento, como diâmetro e espessura da tubulação}
    k4=0.25;
    Diametro: array[1..9] of real = (0.017,0.0216,0.0278,0.0352,0.044,0.0534,0.0666,0.0756,0.0978);
// Diametro: array[1..6] of real = (0.017,0.022,0.0288,0.0362,0.0452,0.057);
    Espessura: array[1..9] of real = (0.0015,0.0017,0.0021,0.0024,0.003,0.0033,0.0042,0.0047,0.0061);
// Espessura: array[1..6] of real = (0.0015,0.0015,0.0016,0.0019,0.0024,0.003);
begin
{Calcula espaçamento depois da torre}
    Pfim:=PRA;
    eaij:=0;
    ceij:=0.5;
    C:=Cant;
    MudaD:=-999;
    setlength(ESP,1);
    setlength(PIJS1,1);
    setlength(eij,S);
    setlength(NI,S);
    PIJS1[0]:=Pmin;
    ESP[0]:=eaij;
    DI:=Dant;
    repeat
        dij:=Djn+Dj/2-ESP[0]/2;
        Q:=0.0000000000000001;
        eaij:=0;
        Pij:=PIJS1[0];
        P:=0;
        repeat
            begin
                for I := 0 to S - 1 do
                    begin
                        tole:=0.0000000000000001;
                        N:=0;
                        D1:=Diametro[DI];
                        KIO1:=1.68*power((pi*power(D1,2)/4)/((pi*power(D1,2)/4)-(Hins-Espessura[DI])*Lins)-1,0.646);
                        if DI>1 then
                            begin

```

```

D2:=Diametro[DI-1];
KIO2:=1.68*power((pi*power(D2,2)/4)/((pi*power(D2,2)/4)-(Hins-Espessura[DI])*Lins)-1,0.646);
D3:=power(2*power(Diametro[DI],4.75)*power(Diametro[DI-
1],4.75)/(power(Diametro[DI],4.75)+power(Diametro[DI-1],4.75)),1/4.75);
end;
repeat
  if P>MudaD then
    begin
      D:=D1;
      KIO:=KIO1;
    end
  else
    if P<MudaD then
      begin
        D:=D2;
        KIO:=KIO2;
      end
    else
      if P=MudaD then
        begin
          D:=D3;
          KIO:=KIO2;
        end
      end;
    NR:=1260630*Q/D;
    A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D)),16);
    B:=power(34530/NR,16);
    f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);
    Le:=KIO*D/f;
    k0:=power(alpha[I]*Djn/(V*C),2)*(Pij+0.08263*f*power(Q,2)*(eaij/2+Le)/power(D,5));
    k1:=power(alpha[I]*Djn/(V*C),2)*0.08263*f*power(Q,2)/(2*power(D,5));
    k2:=power(dij-eaij/2,2);
    k3:=dij-eaij/2;
    feij:=k4*power(Ceij,4)-k3*power(Ceij,3)+k2*power(Ceij,2)-k1*Ceij-k0;
    dfeij:=4*k4*power(Ceij,3)-3*k3*power(Ceij,2)+2*k2*Ceij-k1;
    It:=Ceij-(feij/dfeij);
    Ceij:=It;
    N:=N+1;
    if N/50>1 then Tole:=Tole*10;
  until abs(feij)<=Tole;
  eij[I]:=Ceij;
  NI[I]:=N;
end;
for I := 0 to S - 1 do
  if eij[I]>emax[I] then eij[I]:=0;
  Ceij:=eij[0];
  for I := 1 to S - 1 do
    if Ceij<eij[I] then Ceij:=eij[I];
  for I := 0 to S - 1 do
    if eij[I]=Ceij then break;
  begin
    if Ceij=0 then Ceij:=Dj;
    dij:=dij-eaij/2-Ceij/2;
    NR:=1260630*Q/D;
    A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D)),16);
    B:=power(34530/NR,16);
    f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);

```

```

hf:=0.08263*f*power(Q,2)*(eaij/2+Ceij/2+Le)/power(D,5);
Pij:=Pij+hf;
eaij:=Ceij;
qi:=alpha[I]*power(Pij,0.5);
Ci:=qi*Djn/(Ceij*dij*V);
setlength(ESP,P+1);
setlength(QSUM,P+1);
setlength(PIJS1,P+1);
setlength(Cij,P+1);
setlength(qij,P+1);
setlength(Mapa,P+1);
setlength(DIST,P+1);
setlength(NIJ,P+1);
setlength(DTubo,P+1);
NIJ[P]:=NI[I];
ESP[P]:=eaij;
qij[P]:=qi;
if P <> 0 then Q:=qi/3600000+Q else Q:=qi/3600000;
QSUM[P]:=Q*3600000;
PIJS1[P]:=Pij;
Mapa[P]:=Codigo[I];
CIJ[P]:=Ci;
Dtubo[P]:=D;
DIST[P]:=Dij;
Pfim:=Pij+0.08263*f*power(Q,2)*abs(dij-Djn)/power(D,5);
P:=P+1;
end;
end;
until Djn>(dij-ceij);
{Acerta Pressão com regulador}
if Pfim>PRA then DI:=DI+1 else
begin
DeltaP:=PRA-Pfim;
setlength(PIJS2,P+1);
PIJS2[0]:=PIJS1[0];
for I := 1 to P - 1 do
begin
NR:=1260630*(QSUM[I-1]/3600000)/D2;
A:=power(2.457*Ln(1/(power(7/NR,0.9)+0.27*0.015/D2)),16);
B:=power(34530/NR,16);
f:=8*power(power(8/NR,12)+1/power(A+B,3/2),1/12);
hf:=0.08263*f*power((QSUM[I-1]/3600000),2)*(ESP[I-1]/2+ESP[I]/2+Le)/power(D2,5);
PIJS2[I]:=PIJS2[I-1]+hf;
if PIJS2[I]>(PIJS1[I]+DeltaP) then break;
MudaD:=I;
end;
if (MudaD>=P-1) or (Ceij=Dj) then
begin
PIJS1[0]:=PIJS1[0]+0.1;
DI:=DI-1;
end;
end;
until abs(Pfim-PRA)<0.05*(PRA);
Setlength(Dime,P,10);
{Grava a matriz de resultados do dimensionamento}
for I := 0 to P-1 do

```



```

begin
  Dime[P-I-1,0]:=inttostr(P-I)+'2'+inttostr(Nvao);
  Dime[P-I-1,1]:=floattostr(ESP[I]);
  Dime[P-I-1,2]:=Mapa[I];
  Dime[P-I-1,3]:=floattostr(PIJS1[I]);
  Dime[P-I-1,4]:=floattostr(DIST[I]);
  Dime[P-I-1,5]:=floattostr(qij[I]);
  Dime[P-I-1,6]:=floattostr(QSUM[I]);
  Dime[P-I-1,7]:=floattostr(Cij[I]);
  Dime[P-I-1,8]:=floattostr(Dtubo[I]);
  Dime[P-I-1,9]:=floattostr(NIJ[I]);
end;
result:=Dime;
end;
procedure TForm1.AdicionaEmissorClick(Sender: TObject);
{Insere dados dos emissores}
begin
  Stringgrid1.Visible:=true;
  S:=S+1;
  setlength(Codigo,S);
  setlength(alpha,S);
  setlength(emax,S);
  Codigo[S-1]:=edit3.Text;
  Alpha[S-1]:=strtofloat(edit4.Text);
  emax[S-1]:=strtofloat(edit6.Text);
  Stringgrid1.ColCount:=4;
  Stringgrid1.RowCount:=S+1;
  Stringgrid1.Cells[0,0]:='N';
  Stringgrid1.Cells[1,0]:='Código';
  Stringgrid1.Cells[2,0]:='Alpha';
  Stringgrid1.Cells[3,0]:='emax';
  Stringgrid1.Cells[0,S]:=inttostr(S);
  Stringgrid1.Cells[1,S]:=edit3.Text;
  Stringgrid1.Cells[2,S]:=edit4.Text;
  Stringgrid1.Cells[3,S]:=edit6.Text;
end;
procedure TForm1.AdicionaVaoClick(Sender: TObject);
begin
  Stringgrid2.Visible:=true;
  J:=J+1;
  setlength(DjVaoJ,J);
  setlength(NvaoN,J);
  DjVaoJ[J-1]:=strtofloat(edit1.Text);
  NvaoN[J-1]:=J;
  Stringgrid2.ColCount:=2;
  Stringgrid2.RowCount:=J+1;
  Stringgrid2.Cells[0,0]:='Número do Vão';
  Stringgrid2.Cells[1,0]:='Comprimento';
  Stringgrid2.Cells[0,J]:=inttostr(J);
  Stringgrid2.Cells[1,J]:=edit1.Text;
end;
procedure TForm1.DimensionaNotliadaClick(Sender: TObject);
var
  I,H,K,L:integer;
  Barra0,Barra1,Barra2:TDime;
  CalculaCalda:Array of Array of Extended;

```

```

CaldaCV, CV, DJni: TExtended;
Media, DesvPad, Somatorio, CVi, Djn, Lbalanco, Checar, TL, TD, TLI, TDI, deplecao, CaldaProj: Extended;
NvaoN1, NvaoN2, NvaoN3: array of integer;
TrechoA, N1maior, ContemBalanco: boolean;
MontaArquivo: TStringlist;
salvadime: TSaveTextFileDialog;
begin
  Pmin:=strtofloat(edit5.Text);
  Pmax:=strtofloat(edit7.Text);
  Hins:=strtofloat(edit15.Text);
  Lins:=strtofloat(edit14.Text);
  V:=strtofloat(edit8.Text);
  CoCult:=strtofloat(Edit10.Text);
  Lbalanco:=strtofloat(Edit11.Text);
  TL:=strtofloat(edit12.Text);
  TD:=strtofloat(edit13.Text);
  SetLength(DJni, J);
  Somatorio:=0;
  for I := 0 to high(DJni) do
    begin
      Somatorio:=DjVaoJ[I]+Somatorio;
      DJni[I]:=Somatorio;
    end;
  //Dimensiona torre 0!, início do plantio até metade do primeiro vão.
  Dj:=DjVaoJ[0];
  Djn:=Djni[0];
  NVao:=1;
  TrechoA:=true;
  Barra0:=CalculaEspAT(Nvao, S, V, Dj, Pmin, Pmax, CoCult, Djn, Hins, Lins,Codigo,alpha,emax,TrechoA);
  //Dimensiona Torre 1.
  TrechoA:=false;
  Dj:=DjVaoJ[0];
  Djn:=Djni[0];
  Barra1:=CalculaEspAT(Nvao, S, V, Dj, Pmin, Pmax, CoCult, Djn, Hins, Lins,Codigo,alpha,emax,TrechoA);
  PRA:=strtofloat(Barra1[0,10]);
  Cant:=strtofloat(Barra1[0,7]);
  Dant:=strtofloat(Barra1[0,11]);
  Barra2:=CalculaESPDP(Nvao, S, Dant, PRA, V, Dj, Pmin, Pmax, Cant, Djn, Hins, Lins,Codigo,Alpha,emax);
  CaldaProj:=Cant;
  TDI:=(TL+TD)*strtofloat(Barra0[0,7])/Caldaproj-TL;
  //Gravar.
  MontaArquivo:=TStringlist.Create;
  MontaArquivo.Add("Dimensionamento do início do plantio até a metade do primeiro vão");
  MontaArquivo.Add('Coordenada;Eij (m);Mapa;Pij (mca);Dij (m);qij (L/h);Qij (L/h);Cij (L/m^2);Cij Pulso
(L/ha);Diam.ij (m);Nij;'+Pressão do Regulador (mca) =;;;'+barra0[0,10]+';'+TL
(s)=';'+floattostr(TL)+';'+TD (s)=';'+floattostr(TDI));
  Deplecao:=10000*TL/(TD+TL);
  for I := 0 to high(barra0) do

MontaArquivo.Add(Barra0[I,0]+';'+Barra0[I,1]+';'+Barra0[I,2]+';'+Barra0[I,3]+';'+Barra0[I,4]+';'+Barra0[I,5]+';'+
Barra0[I,6]+';'+Barra0[I,7]+';'+floattostr(strtofloat(Barra0[I,7])*Deplecao)+';'+Barra0[I,8]+';'+Barra0[I,9]);
  Deplecao:=10000*TL/(TD+TL);
  MontaArquivo.Add("Dimensionamento da metade do primeiro vão até a metade do segundo
vão";,,,,,;'+Pressão do Regulador (mca) =;;;'+barra1[0,10]+';'+TL (s)=';'+floattostr(TL)+';'+TD
(s)=';'+floattostr(TD));
  for I := 0 to high(barra1) do

```



```

        SetLength(NvaoN1,MontaVetor);
        NvaoN1[MontaVetor-1]:=NvaoN[I];
    end;
    for I := 1 to J - 1 do
        if DjVaoJ[NvaoN1[0]-1]<>DjVaoJ[I] then break;
        MontaVetor2:=I;
        MontaVetor:=0;
    end;
    for I := MontaVetor2 to J - 1 do
        if DjVaoJ[MontaVetor2]=DjVaoJ[I] then
            begin
                MontaVetor:=MontaVetor+1;
                SetLength(NvaoN2,MontaVetor);
                NvaoN2[MontaVetor-1]:=NvaoN[I];
            end;
    end;
    //Calcula espaçamento para vão predominante.
    if length(NvaoN1)>Length(NvaoN2) then
        begin
            SetLength(NvaoN3,Length(NvaoN1));
            N1maior:=true;
            for I := 0 to high(NvaoN1) do
                NvaoN3[I]:=NvaoN1[I];
            end
        else
            begin
                SetLength(NvaoN3,Length(NvaoN2));
                N1maior:=false;
                for I := 0 to high(NvaoN2) do
                    NvaoN3[I]:=NvaoN2[I];
                end;
            end;
    end;
    //Checa Balanço
    if NvaoN3[high(NvaoN3)]=NvaoN[high(NvaoN)] then ContemBalanço:=true else
    ContemBalanço:=false;
    for I := 0 to high(NvaoN3) do
        begin
            Nvao:=NvaoN3[I];
            Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1];
            Djn:=Djni[NvaoN3[I]-1];
            Barra1:=CalculaEspAT(Nvao,S,V,Dj,Pmin,Pmax,CoCult,Djn,Hins,Lins,Codigo,alpha,emax,TrechoA);
            PRA:=strtofloat(Barra1[0,10]);
            Cant:=strtofloat(Barra1[0,7]);
            Dant:=strtofloat(Barra1[0,11]);
            Barra2:=CalculaESPDP(Nvao,S,Dant,PRA,V,Dj,Pmin,Pmax,Cant,Djn,Hins,Lins,Codigo,Alpha,emax);
        end;
    end;
    //Extrapolando dimensionamento e calcula Coeficiente de Variação.
    SetLength(CalculaCalda,0,0);
    SetLength(CalculaCalda,Length(Barra1)+Length(Barra2),3);
    SetLength(CV,Length(NvaoN3));
    for H := 0 to high(CalculaCalda) do
        if H<=high(Barra1) then
            begin
                CalculaCalda[H,0]:=strtofloat(Barra1[H,1]);
                CalculaCalda[H,1]:=strtofloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2);
                CalculaCalda[H,2]:=strtofloat(Barra1[H,5]);
            end
        else
            begin
                CalculaCalda[H,0]:=strtofloat(Barra2[H-length(Barra1),1]);
            end
        end;
    end;

```

```

        CalculaCalda[H,1]:=strtofloat(Barra2[H-length(Barra1),4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2);
        CalculaCalda[H,2]:=strtofloat(Barra2[H-length(Barra1),5]);
    end;
    Setlength(CaldaCV,0);
    Setlength(CaldaCV,length(CalculaCalda)*Length(NvaoN3));
    K:=0;
    L:=0;
    for H := 0 to length(CalculaCalda)*Length(NvaoN3)-1 do
    begin
        if K>high(CalculaCalda) then
        Begin
            K:=0;
            L:=L+1;
        End;
        CaldaCV[H]:=CalculaCalda[K,2]*Djni[NvaoN3[L]-1]/((Djni[NvaoN3[L]-1]-
Dj/2+CalculaCalda[K,1])*CalculaCalda[K,0]*V);
        K:=K+1;
    end;
    Somatorio:=0;
    for H := 0 to high(CaldaCV) do
        Somatorio:=CaldaCV[H]+Somatorio;
    Media:=Somatorio/Length(CaldaCV);
    Somatorio:=0;
    for H := 0 to high(CaldaCV) do
        Somatorio:=Power(CaldaCV[H]-Media,2)+Somatorio;
    DesvPad:=SQRT(Somatorio/high(CaldaCV));
    CV[I]:=100*DesvPad/Media;
    end;
    //Calcula pro menor CV, vãos predominantes.
    CVi:=CV[0];
    for I := 1 to high(CV) do
        if CVi>CV[I] then CVi:=CV[I];
    for I := 0 to high(CV) do
        if CVi=CV[I] then break;
    K:=H;
    Nvao:=NvaoN3[I];
    Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1];
    Djn:=Djni[NvaoN3[I]-1];
    Barra1:=CalculaEspAT(Nvao,S,V,Dj,Pmin,Pmax,CoCult,Djn,Hins,Lins,Codigo,alpha,emax,TrechoA);
    PRA:=strtofloat(Barra1[0,10]);
    Cant:=strtofloat(Barra1[0,7]);
    Dant:=strtoint(Barra1[0,11]);
    Barra2:=CalculaESPDP(Nvao,S,Dant,PRA,V,Dj,Pmin,Pmax,Cant,Djn,Hins,Lins,Codigo,Alpha,emax);
    TLI:=TD*Caldaproj*(TL/(TD+TL))/(strtofloat(Barra1[0,7])*(1-
Caldaproj*(TL/(TD+TL))/strtofloat(Barra1[0,7])));
    Deplecao:=10000*TLI/(TD+TLI);
    //Gravar.
    if ContemBalanco=true then
    begin
        K:=1;
        MontaArquivo.Add("Dimensionamento para o comprimento de vão predominante e balanço");
    end
    else
    begin
        K:=0;
        MontaArquivo.Add("Dimensionamento para o comprimento de vão predominante");
    end

```

```

end;
for I := 0 to high(NvaoN3)-K do
begin
MontaArquivo.Add("Dimensionamento para Torre "+inttostr(NvaoN3[I])+';.....Pressão do
Regulador (mca) =;;;'+barra1[0,10]+';'+TL (s)=';'+floattostr(TLI)+';'+TD (s)=';'+floattostr(TD));
for H := 0 to high(Barra1) do

MontaArquivo.Add(inttostr(H+1)+'1,'+inttostr(NvaoN3[I])+';'+Barra1[H,1]+';'+Barra1[H,2]+';'+Barra1[H,3]+';'+
floattostr(strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))+';'+Barra1[H,5]+';'+Barra1[H,6]+';'+floattostr(strtfloat(Barra1[H,5])*Djni[NvaoN3[I]-
1]/((strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))*strtfloat(Barra1[H,1]*V))+';'+floattostr(deplecao*strtfloat(Barra1[H,5])*Djni[NvaoN3[I]-
1]/((strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))*strtfloat(Barra1[H,1]*V))+';'+Barra1[H,8]+';'+Barra1[H,9]);
for H := 0 to high(Barra2) do

MontaArquivo.Add(inttostr(H+1)+'2,'+inttostr(NvaoN3[I])+';'+Barra2[H,1]+';'+Barra2[H,2]+';'+Barra2[H,3]+';'+
floattostr(strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))+';'+Barra2[H,5]+';'+Barra2[H,6]+';'+floattostr(strtfloat(Barra2[H,5])*Djni[NvaoN3[I]-
1]/((strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))*strtfloat(Barra2[H,1]*V))+';'+floattostr(deplecao*strtfloat(Barra2[H,5])*Djni[NvaoN3[I]-
1]/((strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[I]-1]-
Dj/2))*strtfloat(Barra2[H,1]*V))+';'+Barra2[H,8]+';'+Barra2[H,9]);
end;
if contembalanco=true then
begin
MontaArquivo.Add("Dimensionamento para Torre "+inttostr(NvaoN3[I])+';.....Pressão do
Regulador (mca) =;;;'+barra1[0,10]+';'+TL (s)=';'+floattostr(TLI)+';'+TD (s)=';'+floattostr(TD));
for H := 0 to high(Barra1) do

MontaArquivo.Add(inttostr(H+1)+'1,'+inttostr(NvaoN3[high(NvaoN3)])+';'+Barra1[H,1]+';'+Barra1[H,2]+';'+
Barra1[H,3]+';'+floattostr(strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))+';'+Barra1[H,5]+';'+Barra1[H,6]+';'+floattostr(strtfloat(Barra1[H,5])*Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-
1)/((strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))*strtfloat(Barra1[H,1]*V))+';'+floattostr(deplecao*strtfloat(Barra1[H,5])*Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-
1)/((strtfloat(Barra1[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))*strtfloat(Barra1[H,1]*V))+';'+Barra1[H,8]+';'+Barra1[H,9]);
for H := 0 to high(Barra2) do
begin
if (strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2)>(Djni[high(djni)]+Lbalanco) then break
else

MontaArquivo.Add(inttostr(H+1)+'2,'+inttostr(NvaoN3[high(NvaoN3)])+';'+Barra2[H,1]+';'+Barra2[H,2]+';'+
Barra2[H,3]+';'+floattostr(strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))+';'+Barra2[H,5]+';'+Barra2[H,6]+';'+floattostr(strtfloat(Barra2[H,5])*Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-
1)/((strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))*strtfloat(Barra2[H,1]*V))+';'+floattostr(deplecao*strtfloat(Barra2[H,5])*Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-
1)/((strtfloat(Barra2[H,4])-(djni[Nvao-1]-Dj/2)+(Djni[NvaoN3[high(NvaoN3)]]-1)-
Dj/2))*strtfloat(Barra2[H,1]*V))+';'+Barra2[H,8]+';'+Barra2[H,9]);
end;
end;
//Calcula vãos díspares.
if (N1maior=true) then
begin
SetLength(NvaoN3,Length(NvaoN2));

```

```

for I := 0 to high(NvaoN2) do
    NvaoN3[I]:=NvaoN2[I];
end
else
begin
    SetLength(NvaoN3,Length(NvaoN1));
    for I := 0 to high(NvaoN1) do
        NvaoN3[I]:=NvaoN1[I];
    end;
    MontaArquivo.Add("Dimensionamento para os vãos díspares");
    for I := 0 to high(NvaoN3) do
        begin
            if DjVaoJ[NvaoN3[I]-2]<>DjVaoJ[NvaoN3[I]-1] then
                Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1]-(DjVaoJ[NvaoN3[I]-2]-DjVaoJ[NvaoN3[I]-1])
            else
                Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1];
                Nvao:=NvaoN3[I];
                Djn:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1];
                Barra1:=CalculaEspAT(Nvao,S,V,Dj,Pmin,Pmax,CoCult,Djn,Hins,Lins,Codigo,alpha,emax,TrechoA);
                PRA:=strtofloat(Barra1[0,10]);
                Cant:=strtofloat(Barra1[0,7]);
                Dant:=strtofloat(Barra1[0,11]);
                if (DjVaoJ[NvaoN3[I]]<>DjVaoJ[NvaoN3[I]-1]) and (NvaoN3[high(NvaoN3)]<>NvaoN[high(NvaoN)])
                then
                    Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]]
                else
                    if (ContemBanco=false) and (NvaoN3[high(NvaoN3)]=NvaoN[high(NvaoN)]) then
                        Dj:=Lbalanco*2
                    else
                        Dj:=DjVaoJ[NvaoN3[I]-1];
                        Barra2:=CalculaESPDP(Nvao,S,Dant,PRA,V,Dj,Pmin,Pmax,Cant,Djn,Hins,Lins,Codigo,Alpha,emax);
                        //Gravar.
                        TLI:=TD*Caldaproj*(TL/(TD+TL))/(strtofloat(Barra1[0,7])*(1-
                        Caldaproj*(TL/(TD+TL))/(strtofloat(Barra1[0,7]))));
                        Deplecao:=10000*TLI/(TD+TLI);
                        MontaArquivo.Add("Dimensionamento para Torre "+inttostr(Nvao)+'';
                        MontaArquivo.Add("Pressão do Regulador (mca) =";
                        MontaArquivo.Add(Barra1[0,10]+' '+TL (s)=' '+floattostr(TLI)+' '+TD (s)=' '+floattostr(TD));
                        for H := 0 to high(barra1) do
                            MontaArquivo.Add(Barra1[H,0]+' '+Barra1[H,1]+' '+Barra1[H,2]+' '+Barra1[H,3]+' '+Barra1[H,4]+' '+Barra1[H,5]+' '+Barra1[H,6]+' '+Barra1[H,7]+' '+floattostr(strtofloat(Barra1[H,7])*Deplecao)+' '+Barra1[H,8]+' '+Barra1[H,9]);
                            for H := 0 to high(barra2) do
                                MontaArquivo.Add(Barra2[H,0]+' '+Barra2[H,1]+' '+Barra2[H,2]+' '+Barra2[H,3]+' '+Barra2[H,4]+' '+Barra2[H,5]+' '+Barra2[H,6]+' '+Barra2[H,7]+' '+floattostr(strtofloat(Barra2[H,7])*Deplecao)+' '+Barra2[H,8]+' '+Barra2[H,9]);
                                end;
                            end;
                        //salvar txt.
                        salvadime:=TSaveTextFileDialog.Create(self);
                        salvadime.FileName:=edit9.Text;
                        salvadime.Title:='Salvar Dimensionamento';
                        salvadime.InitialDir:=GetCurrentDir;
                        salvadime.Filter:='Arquivo texto|*.txt';
                        salvadime.DefaultExt:='txt';
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```
        if salvadime.execute then
            MontaArquivo.SaveToFile(salvadime.FileName);
            MontaArquivo.Free;
        end;
    procedure TForm1.Edit5Change(Sender: TObject);
    begin
        edit5.TabStop:=false;
    end;

    procedure TForm1.Edit7Exit(Sender: TObject);
    begin
        edit7.TabStop:=false;
    end;

    procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
    begin
        S:=0;
        J:=0;
    end;
end.
```