CUSTOS DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL
EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO, DIÂMETROS
DOS BOCAIS E ESPAÇAMENTOS DOS ASPERSORES

JOÃO LUIS ZOCOLER
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Frizzone

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

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Março - 1994

Ficha catalografica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

Zocoler, João Luis
Z84c Custos da irrigação por aspersão convencional em
função da pressão de operação, diâmetros dos bocais e
espaçamentos dos aspersores. Piracicaba, 1994.
120p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Aspersor - Espaçamento 2. Irrigação por aspersão -
Custo I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz,
Piracicaba

CDD 631.7

CUSTOS DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL
EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO, DIÂMETROS
DOS BOCAIS E ESPAÇAMENTOS DOS ASPERSORES

JOÃO LUIS ZOCOLER

Aprovado em: 07.04.1994

Comissão julgadora:

Prof. Dr. José Antônio Frizzone

ESALQ/USP

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel

ESALQ/USP

Prof. Dr. José Renato Zanini

FCAVJ/UNESP

Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE
Orientador

*A minha esposa Jeniana
e a meus filhos João
Gustavo e Lucas, dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo concebimento dos fenômenos e a oportunidade de estudá-los.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), através do Departamento de Engenharia Rural, pelo acolhimento e ensinamentos oferecidos.

Ao professor José Antônio Frizzone, pela orientação e amizade antes e durante o decorrer do curso.

Aos professores Tarlei Arriel Botrel e José Renato Zanini, pelas sugestões apresentadas na defesa.

Aos professores Gener Tadeu Pereira (UNESP - JABOTICABAL) e Valter Valério Veriano (UNESP - ILHA SOLTEIRA), pelas análises estatísticas.

Ao discente Anderson Soares Pereira, pela inestimável colaboração e dedicação na coleta dos dados de campo.

Aos auxiliares de laboratório de Hidráulica, José Figueiredo ("Zezinho") e Hélio, pelo profissional e descontraído auxílio na operação e manutenção dos equipamentos utilizados nos testes de campo.

As secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Roberta, Maria Inês e Marinete, pelo atendimento sempre afetuoso e objetivo.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse efetivado.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1. Uniformidade de distribuição de água pelos aspersores.....	03
2.2. Custos da irrigação por aspersão.....	10
2.3. Economia de sistemas de irrigação por aspersão relacionado à uniformidade de aplicação de água.....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1. Uniformidade de distribuição da água pelos aspersores em cada configuração do sistema.....	27
3.2. Dimensionamento e determinação do custo anual total do sistema em cada configuração para um hectare de área irrigada.....	29
3.2.1. Metodologia para estimativa do preço de aquisição de cada equipamento do sistema...	40
3.2.2. Metodologia para estimativa do custo fixo anual dos equipamentos nas diversas configurações do sistema.....	41
3.3. Análise e regressão múltipla para a uniformidade de distribuição de água e custo anual total do sistema.....	44

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
APÊNDICE 1 Esquema do aspersor e modelo de planilha.....	75
APÊNDICE 2 Resultados e ilustrações dos testes de uniformidade de distribuição de água pelos aspersores.....	78
APÊNDICE 3 Preço estimado de cada equipamento utilizado no sistema.....	95
APÊNDICE 4 Discriminação, quantificação e preço estimado dos equipamentos nas diversas configurações do sistema.....	101
APÊNDICE 5 Valores observados e estimados do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen do Custo Anual Total do Sistema.....	117

**CUSTOS DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL
EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO, DIÂMETROS
DOS BOCAIS E ESPAÇAMENTOS DOS ASPERORES**

Autor: JOAO LUIS ZOCOLER

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi propor um novo enfoque na determinação de custos da irrigação por aspersão convencional, bem como analisar a influência da pressão de operação, diâmetros dos bocais e espaçamentos dos aspersores (na linha lateral e entre linhas laterais) na uniformidade de distribuição de água e no custo anual total do sistema.

A uniformidade de distribuição foi avaliada pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), tendo sido simuladas combinações de espaçamentos dos aspersores a partir do perfil de distribuição de um aspersor operando isoladamente. Já o custo anual total do sistema por hectare irrigado (CAT) em cada condição de pressão de operação, diâmetro dos bocais e espaçamentos dos aspersores efetuou-se pela soma dos gastos com bombeamento;

mão-de-obra; manutenção e reparos; e equipamentos, sendo os últimos obtidos pelo somatório de funções do tipo potência para cada equipamento.

Os resultados indicaram que o CUC foi influenciado significativamente pelas combinações de espaçamentos, diâmetros dos bocais e pressão de operação, enquanto o CAT foi influenciado somente pela combinação de espaçamentos e pela pressão de operação. Na média, o CUC reduziu à medida que se ampliaram os espaçamentos dos aspersores e quando se diminuíram os diâmetros dos bocais. Já o CAT, na média, aumentou ligeiramente quando se aumentou a distância dos aspersores somente na linha lateral, e reduziu acentuadamente quando se aumentou a distância somente entre linhas laterais. Também, na média, ocorreu um aumento do CAT com o acréscimo da pressão de operação. Uma regressão linear relacionando o CUC (variável independente) com o CAT (variável dependente) foi significativa, porém apresentou um coeficiente de determinação muito baixo.

HAND-MOVE SPRINKLER IRRIGATION COSTS
IN FUNCTION OF NOZZLE PRESSURE,
NOZZLES DIAMETERS AND SPRINKLERS SPACING

Author: JOAO LUIS ZOCOLER

Adviser: PROF. DR. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

SUMMARY

The objective of this work was to propose a new perspective in cost determination of hand-move sprinkler irrigation, and analyse the influence of nozzle pressure, nozzles diameters and sprinklers spacing (on lateral line and between lateral lines) in the uniformity of water distribution and total annual cost systems.

The uniformity of water distribution was evaluated by the Christiansen uniformity coefficient (CUC), by simulating sprinklers spacing combinations, related to distribution profile of one sprinkler operating isolately. The system total annual cost for irrigated hectare (CAT) for each nozzle pressure, nozzles diameters and sprinklers spacing condition was estimated by the addition of pumping, labor, maintenance-repair and equipment costs, but the last one was obtained by the addition of the functions of the

potency type for each equipment.

The results indicated that sprinklers spacing combinations, nozzles diameters and nozzle pressure influenced CUC significantly, while CAT is only influenced by sprinklers spacing combinations and nozzle pressure. CUC, in average, decreased with the increase of sprinklers spacing and decrease of nozzles diameters. CAT, in average, increased slightly with increase of sprinkler spacing on lateral line only, and decreased markedly with increase of sprinklers spacing between lateral lines. CAT, in average, also increased with increase nozzle pressure. A linear regression relating CUC (independent variable) with CAT (dependent variable) was significative; however, presented a low determination coefficient.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma das mais importantes técnicas utilizadas na agricultura para aumentar a produtividade de culturas exploradas pelo homem.

Diversos são os métodos de irrigação utilizados, sendo no entanto a aspersão aquela que provavelmente apresenta maior versatilidade, pois permite um bom controle do volume de água aplicado, uniformidade de aplicação, elevada eficiência do sistema, possibilidade de aplicação de fertilizantes e defensivos diluídos na água de irrigação, além da excelente adaptação a diversos tipos de solo, condições topográficas e exigências culturais.

Entretanto, a adoção deste método ou de qualquer outro para produção comercial requer que o mesmo se faça de maneira econômica, ou seja, com redução dos custos por unidade produzida.

Por sua vez, os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação, entre eles a uniformidade de distribuição, devem ser entendidos como elementos decisórios do processo de planejamento e operação dos sistemas de irrigação.

Em um sistema de irrigação por aspersão convencional, diversas são as maneiras de se dimensionar os equipamentos necessários para provocar a altura da lâmina de irrigação exigida, envolvendo diferentes gastos na aquisição, manutenção e reparos destes equipamentos; bombeamento da água e mão-de-obra.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo propor um novo enfoque na determinação de custos da irrigação por aspersão convencional, bem como analisar a influência da combinação de espaçamentos entre aspersores (na lateral e entre laterais), diâmetros de bocais e pressão de operação dos mesmos, na uniformidade de distribuição de água e no custo anual total do sistema.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PELOS ASPERSORES

Segundo BRANSCHIED & HART (1968) e PAIR (1969), vários fatores exercem influência na distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão, tais como: diâmetro(s) do(s) bocal(is), pressão de operação, espaçamento e velocidade angular dos aspersores; ângulo de inclinação do jato; altura e alinhamento dos tubos de elevação; velocidade e direção do vento; e temperatura e umidade relativa do ar.

É comum expressar a uniformidade de distribuição de água em uma área entre aspersores por um coeficiente de uniformidade, que quando superior a um certo valor arbitrário a qualifica como aceitável. Tais medidas expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo, através de medidas de dispersão, expressas na forma adimensional, pela comparação com o valor médio, descreve FRIZZONE (1992).

Segundo Chaudhry¹, 1975, citado por SILVA (1980), as primeiras pesquisas sobre o desempenho de aspersores datam da década de 30. Embora nessa época numerosos testes tivessem sido feitos nos Estados Unidos da América e Alemanha, as conclusões sobre a distribuição de água pelos aspersores eram expressas apenas qualitativamente.

CHRISTIANSEN (1942), estudando a influência do vento, da pressão, da velocidade de rotação e espaçamento entre aspersores rotativos, foi o primeiro a quantificar a uniformidade de distribuição da água através de seu coeficiente, obtido pela seguinte expressão:

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

sendo:

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen;

X_i - precipitação obtida do pluviômetro de ordem i ;

$\bar{X}$ - média geral das observações;

n - número de observações.

Esse coeficiente é mundialmente conhecido e, como pode ser observado, trabalha com os desvios absolutos em relação à média.

---

¹ CHAUDHRY, F. H. O papel da uniformidade de precipitação na produção. São Carlos, 1975. 80p. (Livre - docência - Escola de Engenharia de São Carlos/USP).

Utilizando o desvio padrão como a medida de dispersão, WILCOX & SWAILES (1947) propuseram outro coeficiente de uniformidade de distribuição de água pelos aspersores, conhecido como coeficiente de uniformidade estatístico, segundo a expressão:

$$CUE = (1 - cv).100 \quad (2)$$

sendo:

CUE - coeficiente de uniformidade estatístico (%);

cv - coeficiente de variação, ou seja $s/\bar{X}$, onde s é o desvio padrão dos dados de precipitação;

$\bar{X}$ - precipitação média.

Sabe-se que no crescimento e desenvolvimento das plantas tanto o excesso quanto a escassez de água são prejudiciais. Preocupados com este fato, Criddle et al², 1956, citados por MATSURA (1987), determinaram um parâmetro que levasse em conta os valores mais baixos, através de eficiência padrão de Criddle (EPC), também denominada de uniformidade de distribuição (UD):

$$EPC \text{ (ou UD)} = 100.X^* / \bar{X} \quad (3)$$

sendo:

X^* - média dos 25% menores valores de precipitação;

$\bar{X}$ - média geral das observações.

---

² CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H. & SHOCKLEY, D. G.
Methods for evaluation irrigation systems. Washington
D. C., Soil Conservation Service, U. S. Department of
Agriculture, 1956, 24p. (Agricultural Handbook, 82).

A uniformidade de distribuição de água (UD) é uma medida frequentemente utilizada como indicador dos problemas de distribuição da irrigação, relata FRIZZONE (1992). Um baixo valor de UD indica perda excessiva de água por percolação profunda, se a lâmina mínima aplicada corresponde à lâmina necessária. Os valores de UD são em geral menores que os valores de CUC.

HART (1961), supondo que a distribuição de água fosse normal, propôs, com o apoio da "Hawaiian Sugar Planters' Association" (HSPA), um coeficiente de uniformidade que também incorpora o desvio padrão, dado pela expressão:

$$CUH = 100. \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot s/\bar{X} \right) \quad (4)$$

sendo:

CUH - coeficiente de uniformidade de Hart (%);

s - desvio padrão dos dados de precipitação;

$\bar{X}$ - média geral das precipitações.

Se a precipitação apresenta distribuição normal, então CUH = CUC. Assim, o desvio padrão das precipitações poderá ser obtido em função do valor de CUC.

Existem muitos métodos para avaliar a distribuição de água pelo aspersor, descreve HART (1961), e que eles são baseados em observações de precipitações com sobreposição. Este arranjo pode ser desenvolvido de várias maneiras. Uma delas é instalar os aspersores em um dado espaçamento a ser investigado. Neste caso, todos os

aspersores devem estar operando durante o teste, de modo que toda água emitida por eles dentro da área em estudo seja incluída nos cálculos da distribuição. Outro método bastante comum consiste em se utilizar apenas um aspersor com pluviômetros dispostos ao redor para coletar a água precipitada. Após a coleta dos dados de precipitação, simulam-se as sobreposições de acordo com diversos espaçamentos e, por meio dos coeficientes de uniformidade calculados, verifica-se qual deles é o mais eficiente. A principal vantagem que este método apresenta é requerer menos tempo e equipamento para a realização dos testes.

BRANSCHIED & HART (1968), efetuaram determinações sobre os métodos que utilizam os modelos de distribuição de água de um único aspersor na predição da distribuição para uma área a ser irrigada, utilizando um sistema fixo de aspersão. Realizaram testes com um único aspersor e com uma linha lateral contendo 13 aspersores espaçados de 9 m, sendo que os dois sistemas, embora independentes, operavam simultaneamente de modo a proporcionar similares condições climáticas. Em seguida foram feitas, para os dois sistemas, as sobreposições das lâminas de água para alguns espaçamentos. Os cálculos da uniformidade de distribuição de água pelo coeficiente de uniformidade da "Hawaiian Sugar Planters' Association" (HSPA) permitiram concluir que a simulação do sistema fixo a partir dos dados de precipitação de apenas um aspersor é perfeitamente válida.

GOMIDE (1978), determinando e analisando a uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão, concluiu, entre outras: *i)* o espaçamento entre aspersores deve ser reduzido à medida que se aumenta a velocidade do vento; *ii)* houve maior efeito do vento para maiores alturas do tubo de elevação do aspersor; *iii)* a uniformidade de distribuição foi mais influenciada pelo vento do que pela altura do tubo de elevação. Por fim, o pesquisador desenvolveu uma equação que estima o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em função da altura do tubo de elevação do aspersor (ATU), que variou de 0,5 a 2,0 m; do espaçamento entre aspersores ao longo da linha lateral (EA), que variou de 12 a 30 m, e entre linhas laterais (EL), que também variou de 12 a 30 m; da velocidade média do vento (VEV), que variou de 0 a 4 m/s; e da pressão de serviço dos aspersores (PS), que variou de 1,5 a 4,5 bares. A equação obtida é válida para o aspersor Asbrasil, modelo ZED - 30, com bocais de diâmetros de 6,0 x 7,5 mm:

$$\begin{aligned} \text{CUC} = & 55,207 + 3,195.EL + 1,614.EA + 5,918.VEV + 2,204.ATU - \\ & 0,103.EL^2 - 0,048.EA^2 + 0,253.VEV^2 - 0,352.EL.VEV - \\ & 0,221.EA.VEV \end{aligned} \quad (5)$$

O coeficiente de uniformidade de Christiansen não foi influenciado significativamente pela pressão para o intervalo de variação usado nos testes; e a análise de regressão, usando 760 observações, apresentou um coeficiente de determinação de 0,96.

Trabalho semelhante ao anterior foi realizado por ARRUDA (1981), que trabalhou com os aspersores Asbrasil, modelo ZED - 30, com diâmetros de bocais 6,0 x 7,5 mm e Ederer, modelo TOP-A, com diâmetros de bocais 6,0 x 7,0 mm. O pesquisador concluiu, entre outras coisas, que: *i)* o coeficiente de uniformidade de Christiansen diminui à medida que se aumenta o espaçamento entre aspersores e a velocidade média do vento; *ii)* os melhores coeficientes (Christiansen e Estatístico) para ambos os aspersores, considerando uma velocidade média do vento em torno de 0,5 m/s, foram obtidos quando o espaçamento entre aspersores variou de 4 a 6 m; *iii)* a pressão de serviço deve ser reduzida à medida que aumenta a velocidade média do vento, principalmente quando acima 1 m/s; e *iv)* não se recomenda o uso do sistema de irrigação por aspersão em linha quando a velocidade média do vento for igual ou superior a 1,5 m/s.

Estudando o efeito da pressão de operação dos aspersores sobre a uniformidade de distribuição de água em diferentes espaçamentos, COELHO (1990), utilizando o aspersor Dantas, modelo MD-20A, com diâmetro de bocais de 4,4 x 2,5 mm, verificou que: *i)* nos espaçamentos de 6 x 12 e 12 x 12 m e pressões de 30 e 40 mca foram obtidos os melhores valores médios do CUC, 89,7% e 92,0%, respectivamente; *ii)* nos espaçamentos de 18 x 18, 18 x 24 e 24 x 24 m e pressão de 20 mca os valores do CUC foram 73,9%, 58,1% e 49,7%, respectivamente, valores estes semelhantes aos obtidos nas pressões de 30 e 40 mca.

2.2. CUSTOS DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

Quando se projetam sistemas de irrigação, os modelos, tipos e tamanho de seus componentes devem ser selecionados de forma a se adequarem às diferentes condições encontradas em cada propriedade. Isso significa que não existem sistemas de irrigação idênticos no projeto, modelo tipo e tamanho de equipamentos ou materiais utilizados. Por essa razão, somente de forma genérica podem-se analisar semelhanças e variações entre sistemas e modo pelo qual fatores individuais ou combinados afetam os custos da irrigação, descreve Stippler³, 1956, citado por MELO (1993).

Segundo PAIR et al (1969), na análise de custos da irrigação por aspersão deve-se considerar além do investimento inicial (custos iniciais) para a adoção da técnica, os custos fixos, operacionais e de manutenção, calculados com base anual e por unidade de área.

Os custos iniciais correspondem aos investimentos na aquisição e implantação do sistema de irrigação e são relevantes na seleção e no uso de determinado sistema de aspersão, pois são relativamente elevados e refletem-se diretamente nos custos operacionais

---

³ STIPPLER, H. H. Sprinkler irrigation in the Pacific Northwest. Washington, D. C., U. S. Department of Agriculture / Agricultural Research Service, 1956. 256p. (Agriculture Information Bulletin, 166).

do sistema utilizado, descreve MELO (1993).

Entre os sistemas de irrigação por aspersão convencional pesquisados por STIPPLER (1956), verificou-se que o investimento inicial médio por hectare decresceu consideravelmente com o aumento da área irrigada. Quanto à composição do investimento, observou-se que a linha principal e o conjunto motobomba foram os itens de maior participação, representando cerca de 65% do total.

Estudando os custos de investimentos para projetos de irrigação públicos e privados implantados no Nordeste do Brasil e em outros países, AGUIRRE et al (1989) também constataram uma redução dos mesmos por unidade de área à medida que se aumenta o porte do projeto.

Conforme HOFFMANN et al (1987) os *custos fixos* são aqueles que não variam com a quantidade produzida (juros sobre capital empatado, impostos fixos, seguros, a parte da alimentação que é utilizada na manutenção dos animais, as despesas de arrendamento e etc.), sendo que para um sistema de irrigação MELO (1993) considera, principalmente, a depreciação dos componentes do sistema e a remuneração do capital neles investido, independentemente do número de horas anuais de operação.

A depreciação é a perda gradual do valor inicial do equipamento ao longo de seu tempo de uso ou vida útil. Essa perda é causada pelos desgastes e avarias que os mesmos sofrem devido ao uso e a obsolescência tecnológica. Por outro lado, a remuneração do capital representa a

rentabilidade desse capital se empregado em outra atividade. Isso significa que a opção pela irrigação inviabiliza ou sacrifica a outra atividade, relata o Programa Nacional de Irrigação - BRASIL (1987).

Segundo relato de HOFFMANN et al (1987), diferentes opiniões tem sido sustentadas pelos autores quanto à maneira de considerar o caráter da depreciação e o método para o seu cálculo. Uma delas sustenta que a amortização se destina a reproduzir, durante o período de utilização do elemento do capital a amortizar, uma soma em dinheiro que representa a despesa inicial suportada. O empresário dela se servirá para substituir o capital sem apelar a seus recursos particulares ou ao crédito. Consequentemente, as anuidades de amortização devem ser consideradas como postas de parte, em aplicações seguras e rendosas, de modo que acumulem, juntamente com seus juros, ao término do período de amortização, a soma correspondente à perda total de valor do bem de capital. A taxa anual de amortização (a) é dada pela fórmula:

$$a = (C_n - C_v) \frac{r}{(1 + r)^n - 1} \quad (6)$$

sendo:

C_n - custo inicial (equipamento novo);

C_v - custo final (equipamento velho);

n - número de anos de duração do capital;

r - taxa anual unitária de juros.

Quanto à remuneração do capital investido (j), os mesmos

autores costumam calculá-los anualmente com base no valor médio do capital empatado, conforme a expressão:

$$j = \frac{(C_n - C_v).r}{2} \quad (7)$$

Segundo o Programa Nacional de Irrigação - BRASIL (1987), a expectativa de vida útil dos componentes de sistemas de irrigação varia em função das condições e período de operação em cada ano, e também do nível de reparos e manutenção. Para uma bomba centrífuga sua expectativa é de 16 a 25 anos; motor elétrico - 20 a 25 anos; tubos de PVC enterrados - 15 a 40 anos; aspersores móveis - 10 a 15 anos; estação de bombeamento (estrutura) - 20 a 40 anos. Já para outros autores, tais como SCALOPPI (1986), ROCHA (1987) e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - BRASIL (s.d.), as expectativas de vida útil são: linha e equipamentos elétricos - 25 anos; obras civis - 25 anos; bomba centrífuga - 14 anos; motor elétrico - 25 anos; tubulação superficial de PVC rígido - 12 anos; aspersores - 8 anos; válvulas e acessórios - 10 anos.

Os *custos variáveis* abrangem os dispêndios com energia, mão-de-obra, lubrificação, reparos dos equipamentos e da infra-estrutura utilizados na operação do sistema, relata MELO (1993) que, analisando os custos da irrigação por aspersão em Minas Gerais, verificou que os gastos com a energia foi o item de maior participação relativa na composição dos custos variáveis de todos os tipos de sistemas estudados (convencional semiportátil,

autopropelido e pivô central). Em particular, os sistemas tipo convencional semiportátil, acionado à energia elétrica e com área irrigada de até 60 ha, a composição dos custos variáveis foi em média: 56,88% (162,95 US\$/ha) com a energia, 21,13% (60,53 US\$/ha) com mão-de-obra e 21,99% (63,00 US\$/ha) com reparos e manutenção.

Segundo SCALOPPI (1986), o volume de água a ser aplicada, a energia hidráulica requerida pelo sistema de irrigação e a eficiência total do sistema de bombeamento definem o requerimento total de energia de uma cultura irrigada.

Conforme PAIR et al (1969), STIPPLER (1956) e THOMPSON et al (1980), a utilização da mão-de-obra na irrigação por aspersão convencional concentra-se basicamente na mudança das linhas laterais na área irrigada, sendo que sua quantidade (mão-de-obra) depende do número e comprimento das linhas laterais; da distância entre posições das mesmas; do peso, diâmetro e tipo de engate dos tubos; e da configuração do sistema na área irrigada. Schulze⁴, 1963, citado por FARIA (1993), avaliou o tempo gasto por um homem para fazer cada mudança de uma linha lateral pela seguinte expressão:

---

⁴ SCHULZE, F. E. Uniformity of water distribution and lateral spacing in sprinkler irrigation. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, CONGRESS, 5., 1963.

$$t_m = 0,97.NT. \left[\sqrt{S_m^2 + 324} + 58 \right] \quad (8)$$

sendo:

t_m - tempo para a mudança da linha lateral (s);

NT - número de tubos que constituem a linha lateral;

S_m - espaçamento entre as linhas laterais (m).

Os gastos anuais com manutenção e reparos tem por finalidade manter o sistema de irrigação em condições adequadas de uso. A manutenção ocorre de maneira preventiva, ou seja, substituição dos componentes em intervalos regulares, enquanto os reparos são de difícil previsão e, conseqüentemente, de difícil estimativa de gastos. Sendo assim, THOMPSON et al (1980) descrevem que é comum considerar os gastos anuais com manutenção e reparos como uma porcentagem do investimento no sistema de irrigação. A porcentagem sugerida por diversos autores, tais como PAIR et al (1969), THOMPSON et al (1980) e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - BRASIL (s.d.), é dada em função de uma jornada anual de 2000 horas, sendo seu valor de 4% a.a. (ao ano) sobre equipamentos de irrigação e 1,25% a.a. sobre obras de infra-estrutura. Já o Programa Nacional de Irrigação - BRASIL (1987) sugere valores mais específicos como 0,5 a 1,5% a.a. para a estação de bombeamento, 3,0 a 5,0% a.a. para a bomba centrífuga, 1,5 a 2,5% a.a. para o motor elétrico, 0,25 a 0,75% a.a. para os tubos de PVC enterrados e 5,0 a 8,0% a.a. para os aspersores móveis.

2.3. ECONOMIA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO RELACIONADOS À UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

Em irrigação por aspersão, altos índices de uniformidade em geral estão relacionados com menores espaçamentos entre aspersores e, conseqüentemente, maior custo do sistema de irrigação, descreve FRIZZONE (1992). Para culturas de alto valor econômico, especialmente aquelas de sistema radicular pouco profundo, o mais econômico sistema de irrigação, geralmente, é aquele que proporciona alta uniformidade de distribuição de água ou seja, UD superior a 80% ou CUC superior a 88%.

O efeito da desuniformidade de aplicação de água no rendimento da cultura pode ser expresso como uma função matemática contínua de média e desvio padrão de aplicação de água (função de distribuição normal), descreve Howell⁵, 1964, citado por GOHRING & WALLENDER (1987).

Usando a pesquisa de Howell, von BERNUTH (1983) desenvolveu um método para a estimativa dos valores do coeficiente de uniformidade de Hart e quantidade de água aplicada na cultura para maximização do lucro em condições de restrição de água. O autor, por um lado, considerou que a produtividade é uma função quadrática da lâmina de água

---

⁵ HOWELL, D. T. Sprinkler nonuniformity characteristics and yield. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 90 (IR3): 55-67, 1964.

utilizada pela cultura, assumindo também que esta lâmina apresenta-se normalmente distribuída. Com isso, chegou a seguinte expressão genérica para a produtividade:

$$\bar{Y} = a + b.\bar{X} - c.\bar{X}^2 - c.\bar{X}^2 . (1 - 0,01.CUH)^2 . \pi/2 \quad (9)$$

sendo:

$\bar{Y}$ - produção média (produtividade) da cultura (kg/ha);

a, b, c - constantes específicas da cultura;

$\bar{X}$ - lâmina total média de água aplicada na área durante o ciclo da cultura (cm);

CUH - coeficiente de uniformidade de Hart (%).

observação: o último termo direito da expressão representa a queda na produção devido à desuniformidade da irrigação.

Por outro lado, o mesmo autor considerou a existência de um ajuste linear entre os valores do CUH e os custos anuais dos equipamentos por unidade de área irrigada (CEQ, em \$/ha), conforme a expressão de Hill⁶, 1980, (válida somente para valores do CUH entre 50 e 95% e para os equipamentos considerados no ajuste):

$$CEQ = - 25 + 3,8.CUH \quad (10)$$

Tendo-se que o lucro máximo para a condição apresentada é dado por:

$$L = P_y.Y.A - P_w.\bar{X}.A - CEQ.A \quad (11)$$

---

⁶ HILL, R. W. & KELLER, J. Irrigation system selection for maximum profit. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 32 (2): 366-72, 1980.

e que está sujeito à restrição de água expressa por:

$$\bar{X}.A = W \quad \text{ou} \quad G(x) = \bar{X}.A - W = 0 \quad (13)$$

sendo:

P_y - preço recebido pela cultura no mercado (\$/kg);

A - área cultivada (ha);

P_w - preço pago pela água (\$/cm.ha);

W - volume total de água utilizada (cm.ha).

Assim, utilizando o operador de Lagrange (λ), a função a maximizar é:

$$F(x) = L - \lambda.G(x) \quad (14)$$

obtendo-se os valores de CUH , $\bar{X}$ e A que maximizam o lucro (L) quando:

$$i) \frac{\partial F(x)}{\partial \lambda} = \bar{X}.A - W = 0 \quad (15)$$

$$ii) \frac{\partial F(x)}{\partial A} = P_y \cdot \left[a + b.\bar{X} + c.\bar{X}^2 \cdot (1 - 0,01.CUH)^2 \right] - P_w.\bar{X} + 25 - 3,8.CUH + \lambda.\bar{X} = 0 \quad (16)$$

$$iii) \frac{\partial F(x)}{\partial CUH} = A \cdot \left[P_y.c.\bar{X}^2.1,570.2.(1 - 0,01.CUH).-0,01.-3,8 \right] = 0 \quad (17)$$

Tendo-se aplicado o procedimento anterior à cultura do algodão, o autor concluiu que embora os valores ótimos do coeficiente de uniformidade dependam das condições locais e dos preços dos produtos e insumos, quando se tem restrição na quantidade de água aplicada seus valores podem ser menores que os valores tradicionais de projeto. Os valores do coeficiente de uniformidade e lâmina média

aplicada variaram de 52,7% e 30,5 cm, respectivamente, quando o preço do algodão era igual a 98,21 \$/t, para 93,3% e 66,0 cm, quando o preço do algodão era igual a 117,86 \$/t.

CHEN & WALLENDER (1984) realizaram um estudo de superfície de resposta considerando a uniformidade, cobertura (área irrigada), taxa de aplicação e custo dos equipamentos como função dos espaçamentos dos aspersores ao longo da lateral e entre laterais, para maximizar a receita líquida por unidade de área (RL), definida como:

$$RL = P_c \cdot \bar{Y} - C_w \cdot \bar{X} - FC(CUC) \quad (18)$$

sendo:

P_c - preço recebido pela cultura no mercado (\$/Kg);

$\bar{Y}$ - produção média da cultura em relação à água (Kg/ha), obtida pela eq. (9), considerando uma distribuição normal das lâminas de água na área ($CUH = CUC$);

C_w - custo da água utilizada (\$/ha.cm);

$FC(CUC)$ - função que relaciona o custo dos equipamentos com a uniformidade (\$/ha), expressa por:

$$FC(CUC) = e^{0,0121 \cdot CUC} \quad (19)$$

observação: esta função fornece o custo dos equipamentos para um sistema fixo de irrigação por aspersão convencional.

Derivando-se RL em relação à $\bar{X}$ e ao CUC, seguindo sugestão de Dillon⁷, 1968, obtém-se a combinação

---

⁷ DILLON, J. L. The analysis of responses in crop and livestock production. Program Press, New York, 1968, 195p.

ótima entre as duas variáveis. Para o caso da cultura do algodão, tem-se:

$$RL = Pc. \left[698,1 + 20,6.\bar{X} - 0,16.\bar{X}^2 - 0,16.\bar{X}^2.(1 - 0,01.CUC)^2 \right. \\ \left. \pi/2 \right] - Cw.\bar{X} - FC(CUC) \quad (20)$$

$$i) \frac{\partial RL}{\partial \bar{X}} = Pc. \left[20,6 - 0,32.\bar{X} - 0,32.\bar{X}.\pi/2.(1 - 0,01.CUC)^2 \right] - Cw = 0 \quad (21)$$

$$ii) \frac{\partial RL}{\partial CUC} = Pc. \left[0,16.\bar{X}^2.(1 - 0,01.CUC)^2 \pi/2 \right] - FC' = 0 \quad (22)$$

O sistema de equações não lineares foi solucionado pelo método de Newton, apresentando os seguintes valores do CUC e $\bar{X}$ na máxima RL para algumas situações de preços e custos (análise de sensibilidade):

Cw (\$/cm.ha)	Pc (\$/Kg)	NP	CUC (%)	$\bar{X}$ (cm)	RB (\$/ha)	CA (\$/ha)	CE (\$/ha)	RL (\$/ha)
2,00	1,30	2	67	51	1636	101	461	1074
2,00	1,30	4	84	57	1731	114	284	1332
2,00	1,30	6	89	58	1749	117	202	1430
4,00	1,30	6	87	53	1729	213	197	1318
8,00	1,30	6	81	43	1652	342	184	1126
8,00	1,60	6	87	47	2089	380	196	1513
8,00	1,90	6	90	50	2514	403	204	1907

NP - número de posições laterais que cada linha lateral irriga em cada turno de rega;

RB - renda bruta por unidade de área;

CA - custo da água por unidade de área;

CEQ - custo dos equipamentos por unidade de área.

O mais econômico dos espaçamentos relativos entre aspersores, quando se tem duas posições laterais para cada linha, é $S1/D = 0,6$ (distância entre aspersores na

linha igual a 60% do diâmetro molhado) por $S_m/D = 0,8$ (distância entre aspersores entre linhas laterais igual a 80% do diâmetro molhado), tendo-se para tal um CUC de 67%. No caso de seis posições laterais para cada linha, o mais econômico dos espaçamentos é $S_l/D = 0,6$ por $S_m/D = 0,65$, tendo-se um CUC de 89%.

Trabalho semelhante ao anterior foi desenvolvido por GOHRING & WALLENDER (1987) que, além da lâmina total média e uniformidade de aplicação de água, incluíram também a pressão de serviço dos aspersores na otimização econômica de sistemas de irrigação por aspersão, uma vez que entre 1975 e 1980 o custo da energia elétrica triplicou em seu país, conforme constatou Jensen⁸, 1980, citado por estes autores. O sistema de irrigação estudado foi o portátil de tubos de alumínio, que é comumente usado no sul do Vale de San Joaquin para irrigação de cultura do algodão; e os aspersores foram o Rain Bird modelo 29 JH e o Nelson modelo 20-02 equipados com 2 bocais (um para pressão padrão e outro para baixa pressão). O lucro a ser otimizado foi definido pela seguinte expressão:

$$L = R - C_{eq} - C_{pump} - C_{energy} - C_{water} \quad (23)$$

sendo:

L - lucro auferido pela cultura do algodão ($\$/m^2$);

R - receita ($\$/m^2$) proveniente da venda da produção $\bar{Y}$ (Kg/m^2)

---

⁸ JENSEN, M. E. Design and operation of farm irrigation systems. St Joseph, MI, 1980. 86pp.

no preço de mercado (\$/Kg), obtido pela expressão:

$$R = \bar{Y} \cdot P_c / 10000 \quad (24)$$

sendo:

$\bar{Y}$ - produção média da cultura em relação à água (Kg/ha), expressa por:

$$\bar{Y} = \left[698,1 + 20,6 \cdot \bar{X} - 0,16 \cdot \bar{X}^2 - 0,16 \cdot \bar{X}^2 \cdot (1 - 0,01 \cdot CUC)^2 \cdot \pi/2 \right] \quad (25)$$

C_{eq} - custo anual dos equipamentos (\$/m²), exclusive bomba e instalação de bombeamento, obtido pelo produto do preço dos equipamentos novos e o fator de recuperação de capital (CRF), dividido pela área total irrigada, considerando uma expectativa de vida econômica dos equipamentos de 15 anos;

C_{pump} - custo anual da bomba e instalação de bombeamento (\$/m²), obtido pela expressão apresentada a seguir, ajustada pela Berkeley Pump Company, que selecionou 53 tipos de bombas operando na máxima eficiência, apresentando um coeficiente de correlação múltipla igual a 0,98:

$$C_{pump} = CRF \cdot \left[17002,1 - 0,000323692 \cdot Q_p^3 + 3,52724 \cdot 10^{-5} \cdot P_p^3 + 98,9725 \cdot Q_p + 0,0418593 \cdot Q_p \cdot P_p \right] \quad (26)$$

sendo:

Q_p - vazão da bomba (l/s);

P_p - pressão na saída da bomba (KPa);

observação: a expressão anterior somente é válida para Q_p entre 16,7 e 200 l/s e P_p entre 12 e 572 KPa;

Cenergia - custo anual da energia ($\$/m^2$) para aplicar a lâmina total média de irrigação ($\bar{X}$), obtida por:

$$Cenergia = EAE(r) \cdot \left[\frac{P \cdot \bar{X} \cdot Ec}{Ep \cdot 360000} + \frac{Q_p \cdot P \cdot DEMANDA}{2 \cdot TL_1 \cdot TL_m \cdot Ep \cdot 1000} \right] \quad (27)$$

sendo:

EAE(r) - fator de escala de energia (Keller⁹, 1965);

P - altura manométrica (KPa), correspondente a $P_p + 61$ m;

Ec - tarifa de energia elétrica ($\$/KW.h$);

Ep - eficiência da bomba assumida igual a 0,75;

DEMANDA - tarifa de demanda anual de potência ($\$/KW$).

Cwater - custo anual da água ($\$/m^2$), dado pela expressão:

$$Cwater = Cw \cdot \bar{X} / 100 \quad (28)$$

sendo:

Cw - custo unitário da água ($\$/m^3$).

As principais conclusões obtidas neste trabalho foram:

i) o máximo lucro é obtido quando a aplicação da lâmina de água for de 5 a 15 cm abaixo do valor necessário para a obtenção da máxima produtividade;

ii) o lucro potencial é altamente sensível ao preço do

---

⁹ KELLER, J. Selection of economic pipe sizes for sprinkler irrigation systems. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 8 (2): 186-190. 1965.

algodão, porém levemente sensível aos custos da água e energia elétrica, diâmetro das laterais e taxa de juros;

iii) para os quatro combinações de aspersores/bocais testados, o lucro potencial foi aproximadamente igual, sendo que a economia devido aos menores custos de operação para os bocais de baixa pressão é compensada pelo aumento nos custos de capital;

iv) os valores ótimos dos espaçamentos relativos entre aspersores com bocais de pressão padrão (280 a 400 KPa) foram $S_l/D = 0,42$ e $S_m/D = 0,85$, enquanto para os de bocais de baixa pressão (190 a 210 KPa) foram $S_l/D = 0,61$ e $S_m/D = 0,70$, sendo que para a maioria dos tratamentos econômicos investigados apresentaram CUC de aproximadamente 80%.

Estudo da uniformidade e sua influência na produção e na economia dos projetos de irrigação por aspersão foi realizado por FARIA (1993). Tal pesquisador utilizou aspersores da marca Asbrasil, modelo ZE-30 D, com seis diferentes combinações de bocais, obtendo-se a uniformidade de distribuição por simulação, em condição de velocidade média máxima do vento de 3,3 Km/h. A cultura analisada foi o feijão, cuja curva de produção foi obtida por Frizzone¹⁰, 1986, para a região de Ilha Solteira (SP).

---

¹⁰ FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação. Piracicaba, 1985. 133p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

Algumas das principais conclusões verificadas foram:

i) o espaçamento é altamente determinante na uniformidade de aplicação, que diminui com o seu aumento. Também verificou que os arranjos quadrados conduzem a melhores distribuições que arranjos retangulares de mesma área;

ii) os melhores espaçamentos em termos de uniformidade dependem, no entanto, do bocal do aspersor e da pressão utilizada, em estreita relação com tais variáveis;

iii) a produção mostrou ser altamente sensível à uniformidade, sendo sua taxa de variação maior para menores uniformidades;

iv) contrariamente ao afirmado por alguns autores, neste estudo, o custo do sistema por unidade de área diminuiu com a redução dos espaçamentos em quase todas as alternativas obtidas das simulações, sendo verificado também que os custos da mão-de-obra tiveram pouca importância não chegando a 1% do total, enquanto os custos com a energia representaram parcela maior, podendo chegar aos 25% do custo total para o caso dos aspersores com bocais maiores.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho procedeu-se em três etapas:

- i) determinação da uniformidade de distribuição de água em cada *configuração do sistema*¹, através de ensaios de desempenho do aspersor no campo, seguido de processamento dos dados coletados e simulação das sobreposições dos mesmos;
- ii) levantamento de custos e dimensionamento teórico de projetos para cada configuração;
- iii) modelagem estatística de regressão múltipla para a uniformidade de distribuição de água pelo sistema, custo anual total do mesmo e relação entre ambos.

As configurações do sistema analisadas neste estudo perfazem um total de 80, ou seja, combinações de 5 combinações de espaçamentos entre aspersores na linha e entre linhas laterais (6 x 12; 12 x 12; 12 x 18; 18 x 18 e

---

¹entenda-se por configuração do sistema, a combinação de espaçamentos entre aspersores na linha (E1) e entre linhas laterais (E2), com os diâmetros de bocais e pressões de operação dos mesmos.

18 x 24 m), com 4 combinações de diâmetros de bocais (2,4 x 3,2; 2,4 x 4,0; 2,4 x 5,0 e 2,4 x 6,2 mm) e 4 níveis de pressão de operação (20; 30; 40 e 50 mca).

3.1. UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PELOS ASPERORES EM CADA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Os testes para determinação da uniformidade de distribuição de água pelos aspersores foram realizados numa área plana e gramada, nas proximidades do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ). A metodologia utilizada nos testes cumprem as exigências da NBR 8988 de agosto de 1985.

Os aspersores utilizados neste estudo são da marca Fabrimar, modelo A-1823, cujas características construtivas são apresentadas na Figura 1.1., do Apêndice 1.

O monitoramento da pressão foi obtido por meio de um transdutor de pressão que ficou conectado, de um lado, à base do aspersor por meio de uma mangueira flexível e, de outro lado, a um aparelho indicador digital para transdutores, sendo que, para a alimentação do conjunto, utilizou-se uma bateria de 12 volts.

A velocidade média do vento e sua direção foram medidas por um anemógrafo totalizador de canecas e uma "biruta".

O método empregado para determinar a uniformidade de distribuição baseou-se no perfil de

distribuição de água de um aspersor, operando pelo período de 1 hora. A precipitação foi coletada em pluviômetros (latas de alumínio cilíndricas de diâmetro igual a 0,105 m) colocados sobre suportes a 0,30 m de altura do solo, dispostos ao redor do aspersor (elevado 1 m em relação aos pluviômetros) em forma de malha quadrada de 2 m de lado, perfazendo um total de 324 pluviômetros. A água coletada em cada pluviômetro foi medida com o uso de provetas de 100 ml, graduadas de 1 ml, e anotadas em planilha confeccionada para este fim. Um exemplar desta planilha, que também ilustra a disposição dos pluviômetros no campo, pode ser vista na Figura 1.2., do Apêndice 1.

Foram realizados 16 testes de campo com este tipo de aspersor, sendo combinados para tal, 4 combinações de bocais (2,4 x 3,2; 2,4 x 4,0; 2,4 x 5,0 e 2,4 x 6,2 mm) e 4 níveis de pressão de operação (20; 30; 40 e 50 mca).

Uma vez coletados os dados referentes aos 16 testes realizados no campo, o passo seguinte foi processar e simular sobreposições das precipitações nas configurações do sistema e determinar para cada uma o valor do coeficiente de uniformidade de Christiansen, trabalhos estes desenvolvidos em computador, através do programa aplicativo denominado Catch-3D, versão 4.02, elaborado na Universidade de Utah, Estados Unidos da América.

A representação gráfica destes testes e seus valores correspondentes de uniformidade pode ser vista nas Figuras 2.1. a 2.16. do Apêndice 2.

3.2. DIMENSIONAMENTO E DETERMINAÇÃO DO CUSTO ANUAL TOTAL DO SISTEMA EM CADA CONFIGURAÇÃO PARA UM HECTARE DE ÁREA IRRIGADA

Para realizar o estudo comparativo dos custos de implantação e operação de um sistema de irrigação por aspersão convencional entre suas configurações, foi necessário estabelecer algumas condições para proporcionar uniformidade nos critérios de dimensionamento. Tais condições estão descritas a seguir:

- o sistema opera por 1024 horas anuais, com jornada diária de trabalho efetivo (tempo que o conjunto motobomba permanesse ligado) de 8 horas, o que corresponde a uma utilização do sistema em 128 dias por ano;

- a lâmina líquida de irrigação necessária (DRA) é igual a 32 mm, com uma evapotranspiração diária de 4 mm e, portanto, um turno de rega de 8 dias;

- o período de irrigação é igual ao turno de rega máximo, consistindo em maior economia de equipamentos;

- utilizou-se um acréscimo de 25% sobre a lâmina líquida para compensar as perdas;

- as tubulações são de PVC rígido, engate rápido tipo EMS, marca Tigre;

- o comprimento da linha lateral (LL) é 108 m, ou seja, múltiplo do espaçamento máximo estudado entre aspersores nesta linha (18 m);

- o comprimento da linha principal (LP) é 360 m, ou seja, múltiplo do espaçamento máximo estudado entre linhas laterais (24 m);

- a linha principal localiza-se no centro do terreno a ser irrigado, proporcionando uma área total irrigada de 7,776 ha;

- os diâmetros das tubulações são obtidos pela equação de Hazen-Williams, com o critério de perda de carga de 5% da pressão de operação dos aspersores para a linha lateral (108 m) e 15% para a linha principal (360 m), tendo, portanto, uma variação máxima de 20% da pressão de operação entre os aspersores extremos do sistema, o que garante uma boa uniformidade de vazão do mesmo, sem a necessidade de utilização de reguladores de pressão;

- o primeiro aspersor da primeira linha lateral trabalha com um acréscimo de 15% da pressão de operação (pressão de operação mais $\frac{3}{4}$ da perda de carga total do sistema), enquanto o último aspersor da última linha lateral trabalha com um decréscimo de 5% da mesma (pressão de operação menos $\frac{1}{4}$ da perda de carga total do sistema);

- a altura de elevação dos aspersores é igual a 1 m, o recalque devido à topografia é igual a 11 m e a altura de sucção é igual a 2 m, participando com 14 m na altura manométrica;

- a perda de carga na sucção é desprezível e o diâmetro de sua tubulação é igual ao da linha principal;

- a energia utilizada para acionamento do conjunto motobomba é a elétrica, sendo que, no entanto, não são considerados no estudo os custos dos componentes elétricos "secundários", tais como cabos elétricos, postes, isoladores, pára-raios, etc...;

- o rendimento global da unidade de bombeamento (bomba hidráulica, unidade motora e sistema de transmissão) é 65%;

- por se tratar de um estudo teórico, os valores obtidos nos dimensionamentos não sofrem "arredondamentos", proporcionando assim um caráter contínuo aos mesmos (exemplo: se o número de linhas laterais necessárias para suprir as exigências do sistema for igual a 2,7, não se arredonda este valor para 3);

- a vida média útil dos equipamentos é igual a 15 anos, sendo que após este período os mesmos não tem valor comercial;

- os gastos com mão-de-obra no sistema são devidos às mudanças das linhas laterais. Conforme testes efetuados no campo, verificou-se que um homem gasta, em média, $27,8 \times 10^{-3}$ horas para a mudança de um tubo (6 m) da linha lateral o que corresponde a 0,5 horas para a linha toda (108 m $\Rightarrow$ 18 tubos), ou seja, em 8 horas de trabalho diário ele pode mudar até 16 linhas. Sabendo-se que o preço de 1 HD (Homem $\times$ Dia) é 4,00 US\$ (custo regional de serviços de volantes), o gasto para a mudança de cada linha lateral é 0,25 US\$. Salienta-se o fato que as distâncias entre linhas

laterais testadas (12, 18 e 24 m) não proporcionaram diferenças consideráveis no tempo de mudança das mesmas, uma vez que do tempo total para mudança de uma linha lateral, a maior parcela corresponde ao tempo de desacoplamento e acoplamento dos tubos, cabendo pouca participação ao tempo de transporte (carregamento dos tubos), o que permitiu considerar o tempo de mudança constante para todas elas;

- os gastos com serviços de manutenção dos equipamentos, tais como lubrificações e etc, são considerados iguais a 3% ao ano sobre o valor investido em equipamentos. Diversos autores, tais como PAIR et al (1969), THOMPSON et al (1980) e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - BRASIL (s.d.), já citados anteriormente, sugerem 4% ao ano sobre o investimento em equipamentos de irrigação e 1,25% sobre o investimento em obras/instalações de infra-estrutura, quando se opera o sistema 2000 horas anuais. Tendo em vista as dificuldades de se obter um índice preciso nestes tipos de gastos e como o sistema deste estudo opera por 1024 horas anuais, decidiu-se pelo valor de 3% a.a. sobre o investimento total em equipamentos.

O dimensionamento teórico dos equipamentos em cada configuração do sistema foi realizado com auxílio de planilha eletrônica, através da elaboração de uma tabela padrão, cujo cabeçalho ilustra-se a seguir.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES																
NA LATERAL								ENTRE LATERAIS								
D B	P S	Q	I	T I P	N P L	N P L I P	N M P D	N L L N	D L L	D L P	E A B	G A B O	G A M O	G A M R	C F A E	C A T

DB - diâmetros dos bocais do aspersor, em mm;

PS - pressão de operação do aspersor, em mca;

Q - vazão do aspersor, em $m^3.h^{-1}$;

I - intensidade de aplicação de água pelo sistema na configuração, em $mm.h^{-1}$, obtido pela expressão;

$$I = Q \cdot E1^{-1} \cdot E2^{-1} \quad (29)$$

sendo:

E1 - espaçamento entre aspersores na linha lateral, em m;

E2 - espaçamento entre aspersores entre linhas laterais, em m;

TIP - tempo de irrigação por posição, em horas, obtido pela expressão:

$$TIP = DRA \cdot 1,25 \cdot I^{-1} \quad (30)$$

sendo:

DRA - disponibilidade real de água pela cultura (lâmina líquida necessária), assumida como igual a 32 mm;

1,25 - fator de acréscimo na lâmina líquida para compensar as perdas;

NPL - número total de posições de laterais existentes na área (7,776 ha), obtido pela expressão:

$$NPL = CLP \cdot E2^{-1} \cdot 2 \quad (31)$$

sendo:

CLP - comprimento da linha principal, assumida como igual a 360 m;

2 - número de lados existentes na linha principal;

NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia, obtido por:

$$NPLID = NPL \cdot TR^{-1} \quad (32)$$

sendo:

TR - turno de rega, em dias, determinado pelas condições estabelecidas como igual a 8;

NMPD - número de mudanças possíveis por dia para cada linha lateral, obtido por:

$$NMPD = JD \cdot TIP^{-1} \quad (33)$$

sendo:

JD - jornada diária de trabalho efetivo, assumido como sendo igual a 8 horas;

NLLN - número de linhas laterais necessárias para aplicar a lâmina líquida de irrigação na área (7,776 ha), obtido da expressão;

$$NLLN = NPLID \cdot NMPD^{-1} \quad (34)$$

DLL - diâmetro da linha lateral, em mm, obtido pela seguinte expressão (Hazen-Williams):

$$DLL = 1000 \cdot 0,615^{-1} \cdot QLL^{0,38} \cdot C^{-0,38} \cdot JLL^{-0,205} \quad (35)$$

sendo:

0,615 - coeficiente da fórmula de Hazen-Williams para perda de carga;

QLL - vazão da linha lateral, em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, obtido pela expressão:

$$QLL = Q \cdot CLL \cdot E1^{-1} \cdot 3600^{-1} \quad (36)$$

sendo:

CLL - comprimento da linha lateral, assumido como igual a 108 m;

C = 150 - coeficiente de rugosidade do PVC na fórmula de Hazen-Williams;

JLL - perda de carga unitária na linha lateral, em $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$, obtida pela expressão:

$$JLL = HFL \cdot CLL^{-1} \cdot FLL^{-1} \quad (37)$$

sendo:

HFL - perda de carga na linha lateral, em m, para uma saída, obtida pela expressão:

$$HFL = 5 \cdot PS \cdot 100^{-1} \quad (38)$$

sendo:

5 - porcentagem sobre a pressão de operação assumida para a linha lateral;

FLL - fator de Christiansen (tubulações de múltiplas saídas equidistantes) para a linha lateral, obtido pela expressão:

$$FLL = \frac{1}{(m + 1)} + \frac{1}{2 \cdot NA} + \frac{(m - 1)^{0,5}}{6 \cdot NA^2} \quad (39)$$

sendo:

$m = 1,852$ - expoente da velocidade na
fórmula de Hazen-Williams;

NA - número de aspersores na linha
lateral, obtido pela expressão:

$$NA = CLL \cdot E1^{-1}; \quad (40)$$

DLP - diâmetro da linha principal, em mm, obtido pela
seguinte expressão (Hazen-Williams):

$$DLP = 1000 \cdot 0,615^{-1} \cdot QLP^{0,38} \cdot C^{-0,38} \cdot JLP^{-0,205} \quad (41)$$

sendo:

QLP - vazão da linha principal, em $m^3.s^{-1}$, obtido pela
expressão:

$$QLP = QLL \cdot NLLN \quad (42)$$

JLP - perda de carga unitária na linha principal, em
 $m.m^{-1}$, obtida pela expressão:

$$JLP = HFLP \cdot CLP^{-1} \cdot FLP^{-1} \quad (43)$$

sendo:

HFLP - perda de carga na linha principal para
uma saída, em m, obtida pela expressão:

$$HFLP = 15 \cdot PS \cdot 100^{-1} \quad (44)$$

sendo:

15 - porcentagem sobre a pressão de
operação assumida para a linha
principal;

FLP - fator de Christiansen para a linha
principal, obtido pela expressão:

$$FLP = \frac{1}{(m + 1)} + \frac{1}{2 \cdot NLLN} + \frac{(m - 1)^{0,5}}{6 \cdot NLLN^2} \quad (45)$$

EAB - consumo anual de energia no bombeamento, em $\text{KWh} \cdot \text{ha}^{-1}$, obtida pela seguinte expressão:

$$\text{EAB} = \text{HM} \cdot \text{QLP} \cdot \rho_a \cdot g \cdot T \cdot A^{-1} \cdot \eta^{-1} \cdot 1000^{-1} \quad (46)$$

sendo:

HM - altura manométrica total, em m, obtida pela expressão:

$$\text{HM} = \text{Hs} + \text{Hr} + \text{He} + \text{HFLP} + \text{HFLI} + 95 \cdot \text{PS} \cdot 100^{-1} \quad (47)$$

sendo:

Hs - altura de sucção, assumida como sendo igual a 2 m;

Hr - altura de recalque, assumida como sendo igual a 11 m;

He - altura de elevação dos aspersores, assumida como sendo igual a 1 m;

95 - porcentagem sobre a pressão de operação que atua sobre o aspersor na posição mais desfavorável;

ρ_a - massa específica da água, assumida como sendo igual a $1000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

g - aceleração da gravidade terrestre, igual a $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;

T - número de horas anual de trabalho do sistema, assumido como sendo igual a 1024;

A - área total irrigada pelo sistema, igual a 7,776 ha;

η - rendimento global da unidade de bombeamento, assumida como igual a 65%;

GABO - gasto anual com o consumo de energia elétrica e demanda de potência do sistema, em dólar comercial por ha ($\text{US}\$. \text{ha}^{-1}$), utilizando-se a tarifa convencional aplicada aos consumidores do Grupo A, conforme o Comitê de Distribuição de Energia Elétrica - BRASIL (1988), dado pela expressão:

$$\text{GAB} = \text{EAB} \cdot \text{Tc} + \text{DP} \cdot \text{Td} \cdot 6 + \text{DP} \cdot \text{Td} \cdot 0,6 \quad (48)$$

sendo:

Tc - tarifa de consumo de energia elétrica, cujo valor é $0,05333641 \text{ US}\$. \text{KWh}^{-1}$ (Companhia Energética de São Paulo - 16.09.93);

DP - demanda de potência em $\text{KW} \cdot \text{ha}^{-1}$, obtido da expressão:

$$\text{DP} = \text{HM} \cdot \text{QLP} \cdot \rho_a \cdot g \cdot A^{-1} \cdot \eta^{-1} \cdot 1000^{-1} \quad (49)$$

Td - tarifa de demanda de potência, cujo valor é $3,64345505 \text{ US}\$/\text{KW}$ (Companhia Energética de São Paulo - 16.09.93);

6 - número de meses que o sistema opera pelo menos uma vez (fato suficiente para o medidor registrar 100% da potência instalada, valor que é utilizado pela concessionária de energia como demanda faturável do mês);

0,6 - número de meses por ano que o sistema permanece desligado (6) vezes o coeficiente aplicado à demanda faturável para estes meses (0,1 ou 10% da maior demanda verificada por medição nos últimos 11 meses);

Observação: o fator de potência do sistema será assumido como sendo igual a 0,85, o que lhe confere isenção de ajuste sobre o faturamento normal.

GAMO - gasto anual com a mão-de-obra, em $\text{US}\$.ha^{-1}$, obtido pela expressão:

$$GAMO = NMPD \cdot NLLN \cdot 0,25 \cdot 128 \cdot A^{-1} \quad (50)$$

sendo:

0,25 - gasto para a mudança de uma linha lateral, em US\$;

128 - número de dias por ano que o sistema opera;

GAMR - gasto anual com manutenção e reparos, assumido como 3% a.a. do investimento em equipamentos, em $\text{US}\$.ha^{-1}$, dado pela expressão:

$$GAMR = PE \cdot A^{-1} \cdot 0,03 \quad (51)$$

sendo:

PE - preço dos equipamentos novos, em US\$, cuja metodologia utilizada para sua determinação está descrita no item 3.2.1. e 3.2.2.;

CFAE - custo fixo anual dos equipamentos, em $\text{US}\$.ha^{-1}$, obtido pela seguinte expressão:

$$CFAE = \left[\frac{(PE - PE_v) \cdot r}{(1 + r)^{v_u} - 1} + \frac{PE_n \cdot r}{2} \right] \cdot A^{-1} \quad (52)$$

sendo:

PE - preço estimado dos equipamentos novos, em US\$;

PEv - preço estimado dos equipamentos usados após o período de sua vida útil, assumido como sendo igual a zero;

r - taxa de juros anual, igual a 12%;

Vu - vida útil dos equipamentos, assumida como sendo igual 15 anos;

CAT - custo anual total do sistema, em US\$.ha⁻¹, obtido da adição:

$$CAT = GABO + GAMO + GAMR + CFAE \quad (53)$$

3.2.1. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO PREÇO DE AQUISIÇÃO DE CADA EQUIPAMENTO DO SISTEMA

Verifica-se que o comportamento dos preços dos equipamentos para irrigação em função de seu diâmetro ou potência segue uma função do tipo potencial, ou seja:

$$PEQ_{iB} = m_i \cdot B^{n_i} \quad (54)$$

sendo:

PEQ_{iB} - preço, em US\$, do equipamento i no diâmetro ou potência B;

n_i e m_i - constantes de ajuste da regressão para o equipamento i;

B - diâmetro (para tubos, válvulas e etc) ou potência (para transformador e etc) do equipamento i.

Sendo assim, cada equipamento utilizado no dimensionamento do projeto teve sua função de preço ajustada desta forma, permitindo que o estudo da configuração mais

econômica fosse possível, uma vez que mesmo não existindo comercialmente um determinado diâmetro ou potência do equipamento, estima-se seu preço por tal função.

A obtenção dos valores do coeficiente m_i e do expoente n_i da função potencial ajustada foi realizada aplicando-se o operador logaritmo nos preços e nos diâmetros ou potências nominais comerciais do equipamento i , procedendo-se, em seguida, a regressão linear dos valores obtidos. Quando o equipamento i possui apenas dois diâmetros ou potências nominais comerciais, os valores de m_i e n_i , após a aplicação do operador logaritmo, foram determinados pelo método da inclinação e da intersecção. Os dados e resultados do ajuste feito para cada equipamento, de um total de 23, podem ser vistos no Apêndice 3. Os elevados valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos justificam a utilização deste tipo de função para estimativa de preços dos equipamentos.

3.2.2. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO CUSTO FIXO ANUAL DOS EQUIPAMENTOS NAS DIVERSAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

Uma vez definido o coeficiente e o expoente de cada equipamento, estimou-se o custo fixo anual dos equipamentos pela equação 52.

O valor estimado de PE foi obtido da seguinte maneira:

i) confecção de uma tabela onde foram discriminados e quantificados todos os equipamentos necessários para se montar uma linha lateral, a linha principal completa (incluindo a sucção e acessórios) e os componentes elétricos (conjunto motobomba, chave de partida e transformador) do sistema em cada combinação de espaçamentos entre aspersores (CE_1 , CE_2 , CE_3 , CE_4 e CE_5) somente, uma vez que o diâmetro de bocais e pressão de operação dos mesmos não influem na discriminação e quantificação dos equipamentos necessários para montar o sistema, mas sim em seus diâmetros ou potências. O cabeçalho desta tabela apresenta-se a seguir:

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL	ENTRE LATERAIS
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
LINHA LATERAL	
LINHA PRINCIPAL	
COMPONENTES ELÉTRICOS	

ii) uma vez discriminados e quantificados os equipamentos necessários em cada espaçamento, equacionou-se o preço dos equipamentos (PE) em cada configuração do sistema, da seguinte forma:

$$PE_k = PLL_k \cdot NLLN_k + PLP_k + PMBEE_k \quad (55)$$

sendo:

PE_k - preço estimado dos equipamentos , em US\$, na configuração k;

PLL_k - preço estimado de uma linha lateral, em US\$, na configuração k, obtido pela expressão:

$$PLL_k = \sum X_{ki} . m_i . D^{n_i} \quad (56)$$

sendo:

X_{ki} - número de unidades do equipamento i na configuração k;

$m_i . D^{n_i}$ - função potencial ajustada de preço (versus diâmetro) do equipamento i, em US\$;

$NLLN_k$ - número de linhas laterais necessárias na configuração k;

PLP_k - preço estimado da linha principal, em US\$, na configuração k, dado pela expressão:

$$PLP_k = \sum X_{ki} . m_i . D^{n_i} \quad (57)$$

$PMBEE_k$ - preço estimado dos equipamentos elétricos, em US\$, na configuração k, obtido pela expressão:

$$PMBEE_k = \sum m_i . P^{n_i} \quad (58)$$

sendo:

$m_i . P^{n_i}$ - função potencial ajustada de preço (versus potência) do equipamento i, com preço em US\$;

A equação de preço estimado de equipamentos definida para cada espaçamento entre aspersores ($E1 \times E2$) é apresentada, após a respectiva tabela de discriminação e quantificação destes equipamentos (Tabelas 4.1. a 4.5.), no Apêndice 4.

3.3. ANÁLISE E REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA A UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E CUSTO ANUAL TOTAL DO SISTEMA

Tal qual a proposição de um novo enfoque na determinação de custos da irrigação por aspersão convencional, o presente trabalho teve como objetivo analisar a influência de alguns dos principais parâmetros de projeto (combinação dos espaçamentos entre aspersores - CE; diâmetros dos bocais - DB; e pressão de operação dos mesmos - PS) na uniformidade de distribuição de água, medida pelo coeficiente de uniformidade de distribuição de Christiansen (CUC), e no custo anual total do sistema (CAT). Para isso, procurou-se ajustar, através do método dos mínimos quadrados, um modelo polinomial quadrático que representasse o comportamento dos mesmos (CUC e CAT, respectivamente).

A expressão do modelo é dada por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_{1i} . X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{2i} . X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^3 \beta_{3ij} . X_i . X_j \quad (59)$$

sendo:

Y - CUC (%) ou CAT (US\$.ha⁻¹);

β_0 - coeficiente de intersecção;

$\sum_{i=1}^3 \beta_{1i} . X_i$ - componentes lineares;

$\sum_{i=1}^3 \beta_{2i} . X_i^2$ - componentes quadráticos;

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^3 \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j - \text{componentes das interações lineares.}$$

Por fim, efetuou-se um estudo estatístico de regressão linear para verificar a existência de uma relação funcional entre o CUC (variável independente) e o CAT (variável dependente), o que permitiria fazer estimativas do CAT para cada valor do CUC desejado, dentro das condições estudadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados referentes ao teste de uniformidade de distribuição de água pelos aspersores (Tabelas 1 a 5) e o custo anual total com a irrigação por aspersão convencional para um hectare (Tabelas 6 a 10), conforme a metodologia descrita nos itens 3.1. e 3.2.. Nas Tabelas de 1 a 5, além da combinação de espaçamentos, diâmetros dos bocais, pressão de operação e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), também são apresentados os valores da vazão, diâmetro molhado e intensidade de aplicação de água pelo aspersor. Nas tabelas de 6 a 10, as colunas 5 (TIP - tempo de irrigação por posição), 6 (NPL - número de posições de laterais), 7 (NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia), 8 (NMPD - número de mudanças possíveis por dia), 9 (NLLN - número de linhas laterais necessárias), 10 (DLL - diâmetro da linha lateral) e 11 (DLP - diâmetro da linha principal) correspondem aos valores obtidos para o dimensionamento de sistema na área toda (7,776 ha).

Tabela 1. Coeficiente de uniformidade de Christiansen em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 6 x 12 m.

DB	PS	Q	DM	I	CUC
2,4 x 3,2	20	0,83	21	11,53	90,0
	30	1,04	21	14,44	94,7
	40	1,21	22	16,81	96,8
	50	1,36	24	18,89	97,2
2,4 x 4,0	20	1,12	22	15,56	89,3
	30	1,39	23	19,31	93,2
	40	1,62	24	22,50	92,5
	50	1,81	25	25,14	92,2
2,4 x 5,0	20	1,58	23	21,94	91,2
	30	1,95	24	27,08	93,0
	40	2,28	25	31,67	95,0
	50	2,56	26	35,56	95,2
2,4 x 6,2	20	2,22	25	30,83	87,3
	30	2,75	26	38,19	92,2
	40	3,18	27	44,17	93,6
	50	3,52	27	48,89	97,4

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

DM - diâmetro molhado pelo aspersor (m);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

Tabela 2. Coeficiente de uniformidade de Christiansen em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 12 x 12 m.

DB	PS	Q	DM	I	CUC
2,4 x 3,2	20	0,83	21	5,76	82,9
	30	1,04	21	7,22	93,6
	40	1,21	22	8,40	93,2
	50	1,36	24	9,44	92,6
2,4 x 4,0	20	1,12	22	7,78	76,2
	30	1,39	23	9,65	90,6
	40	1,62	24	11,25	91,6
	50	1,81	25	12,57	89,9
2,4 x 5,0	20	1,58	23	10,97	87,2
	30	1,95	24	13,54	90,3
	40	2,28	25	15,83	94,4
	50	2,56	26	17,78	94,1
2,4 x 6,2	20	2,22	25	15,42	83,7
	30	2,75	26	19,10	90,0
	40	3,18	27	22,08	93,1
	50	3,52	27	24,44	96,5

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

DM - diâmetro molhado pelo aspersor (m);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

Tabela 3. Coeficiente de uniformidade de Christiansen em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 12 x 18 m.

DB	PS	Q	DM	I	CUC
2,4 x 3,2	20	0,83	21	3,84	68,9
	30	1,04	21	4,81	72,9
	40	1,21	22	5,60	63,6
	50	1,36	24	6,30	61,1
2,4 x 4,0	20	1,12	22	5,19	75,3
	30	1,39	23	6,44	86,0
	40	1,62	24	7,50	76,9
	50	1,81	25	8,38	70,2
2,4 x 5,0	20	1,58	23	7,31	87,2
	30	1,95	24	9,03	93,6
	40	2,28	25	10,56	89,9
	50	2,56	26	11,85	92,2
2,4 x 6,2	20	2,22	25	10,28	86,8
	30	2,75	26	12,73	93,0
	40	3,18	27	14,72	95,0
	50	3,52	27	16,30	94,9

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

DM - diâmetro molhado pelo aspersor (m);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

Tabela 4. Coeficiente de uniformidade de Christiansen em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 18 x 18 m.

DB	PS	Q	DM	I	CUC
2,4 x 3,2	20	0,83	21	2,56	63,4
	30	1,04	21	3,21	66,3
	40	1,21	22	3,73	53,8
	50	1,36	24	4,20	52,4
2,4 x 4,0	20	1,12	22	3,46	67,8
	30	1,39	23	4,29	81,4
	40	1,62	24	5,00	69,8
	50	1,81	25	5,59	60,5
2,4 x 5,0	20	1,58	23	4,88	76,3
	30	1,95	24	6,02	87,3
	40	2,28	25	7,04	85,9
	50	2,56	26	7,90	87,6
2,4 x 6,2	20	2,22	25	6,85	73,5
	30	2,75	26	8,49	85,8
	40	3,18	27	9,81	89,2
	50	3,52	27	10,86	91,9

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

DM - diâmetro molhado pelo aspersor (m);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

Tabela 5. Coeficiente de uniformidade de Christiansen em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 18 x 24 m.

DB	PS	Q	DM	I	CUC
2,4 x 3,2	20	0,83	21	1,92	39,2
	30	1,04	21	2,41	35,9
	40	1,21	22	2,80	25,4
	50	1,36	24	3,15	24,6
2,4 x 4,0	20	1,12	22	2,59	51,6
	30	1,39	23	3,22	54,5
	40	1,62	24	3,75	40,6
	50	1,81	25	4,19	33,2
2,4 x 5,0	20	1,58	23	3,66	63,1
	30	1,95	24	4,51	65,2
	40	2,28	25	5,28	60,3
	50	2,56	26	5,93	66,2
2,4 x 6,2	20	2,22	25	5,14	59,1
	30	2,75	26	6,37	70,5
	40	3,18	27	7,36	72,2
	50	3,52	27	8,15	74,3

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

DM - diâmetro molhado pelo aspersor (m);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

Tabela 6. Composição do custo anual total de um hectare irrigado em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 6 x 12 m.

DB	PS	Q	I	TIP	NPL	NPLID	NMPD	NLLN	DLL	DLP	EAB	GABO	GAMO	GAMR	CFAE	CAT
	20	0.83	11.53	3.47	60	7.5	2.31	3.25	64.50	110.04	992.74	76.26	30.86	34.19	98.96	240.28
2.4	30	1.04	14.44	2.77	60	7.5	2.89	2.60	64.66	103.09	1301.29	99.96	30.86	31.42	90.94	253.19
3.2	40	1.21	16.81	2.38	60	7.5	3.36	2.23	64.57	98.54	1609.85	123.67	30.86	29.87	86.44	270.84
	50	1.36	18.89	2.12	60	7.5	3.78	1.99	64.49	95.25	1918.40	147.37	30.86	28.87	83.55	290.66
	20	1.12	15.56	2.57	60	7.5	3.11	2.41	72.28	112.76	992.74	76.26	30.86	33.21	96.11	236.45
2.4	30	1.39	19.31	2.07	60	7.5	3.86	1.94	72.20	106.01	1301.29	99.96	30.86	30.84	89.26	250.93
4.0	40	1.62	22.50	1.78	60	7.5	4.50	1.67	72.14	101.69	1609.85	123.67	30.86	29.50	85.39	269.42
	50	1.81	25.14	1.59	60	7.5	5.03	1.49	71.88	98.48	1918.40	147.37	30.86	28.66	82.93	289.82
	20	1.58	21.94	1.82	60	7.5	4.39	1.71	82.37	116.87	992.74	76.26	30.86	32.78	94.87	234.78
2.4	30	1.95	27.08	1.48	60	7.5	5.42	1.38	82.11	110.44	1301.29	99.96	30.86	30.76	89.03	250.62
5.0	40	2.28	31.67	1.26	60	7.5	6.33	1.18	82.15	106.45	1609.85	123.67	30.86	29.64	85.79	269.96
	50	2.56	35.56	1.13	60	7.5	7.11	1.05	82.01	103.52	1918.40	147.37	30.86	28.94	83.76	290.94
	20	2.22	30.83	1.30	60	7.5	6.17	1.22	93.74	122.22	992.74	76.26	30.86	33.04	95.63	235.80
2.4	30	2.75	38.19	1.05	60	7.5	7.64	0.98	93.57	116.30	1301.29	99.96	30.86	31.32	90.64	252.78
6.2	40	3.18	44.17	0.91	60	7.5	8.83	0.85	93.22	112.44	1609.85	123.67	30.86	30.36	87.86	272.75
	50	3.52	48.89	0.82	60	7.5	9.78	0.77	92.56	109.46	1918.40	147.37	30.86	29.73	86.05	294.02

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

TIP - tempo de irrigação por posição (h);

NPL - número de posições de laterais;

NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia;

NMPD - número de mudanças possíveis por dia por linha lateral;

NLLN - número de linhas laterais necessárias;

DLL - diâmetro da linha lateral (mm);

DLP - diâmetro da linha principal (mm);

EAB - energia consumida anualmente com bombeamento ($KWh \cdot ha^{-1}$);

GABO - gasto anual com bombeamento ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMO - gasto anual com mão-de-obra ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMR - gasto anual com manutenção e reparos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CFAE - custo fixo anual com equipamentos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CAT - custo anual total com a irrigação ($US\$ \cdot ha^{-1}$).

Tabela 7. Composição do custo anual total de um hectare irrigado em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 12 x 12 m.

DB	PS	Q	I	TIP	NPL	NPLID	NMPD	NLLN	DLL	DLP	EAB	GABO	GAMO	GAMR	CFAE	CAT
	20	0.83	5.76	6.94	60	7.5	1.15	6.51	50.34	105.94	992.74	76.26	30.86	38.13	110.36	255.62
2.4	30	1.04	7.22	5.54	60	7.5	1.44	5.19	50.47	98.47	1301.29	99.96	30.86	34.28	99.22	264.33
3.2	40	1.21	8.40	4.76	60	7.5	1.68	4.46	50.40	93.56	1609.85	123.67	30.86	32.10	92.91	279.55
	50	1.36	9.44	4.24	60	7.5	1.89	3.97	50.33	89.99	1918.40	147.37	30.86	30.68	88.78	297.69
	20	1.12	7.78	5.14	60	7.5	1.56	4.82	56.41	107.40	992.74	76.26	30.86	36.12	104.53	247.77
2.4	30	1.39	9.65	4.14	60	7.5	1.93	3.88	56.35	100.06	1301.29	99.96	30.86	32.82	94.98	258.63
4.0	40	1.62	11.25	3.56	60	7.5	2.25	3.33	56.31	95.30	1609.85	123.67	30.86	30.92	89.48	274.93
	50	1.81	12.57	3.18	60	7.5	2.51	2.98	56.11	91.79	1918.40	147.37	30.86	29.70	85.95	293.89
	20	1.58	10.97	3.65	60	7.5	2.19	3.42	64.29	109.66	992.74	76.26	30.86	34.53	99.94	241.60
2.4	30	1.95	13.54	2.95	60	7.5	2.71	2.77	64.09	102.53	1301.29	99.96	30.86	31.71	91.77	254.30
5.0	40	2.28	15.83	2.53	60	7.5	3.17	2.37	64.12	97.98	1609.85	123.67	30.86	30.08	87.05	271.65
	50	2.56	17.78	2.25	60	7.5	3.56	2.11	64.01	94.66	1918.40	147.37	30.86	29.03	84.03	291.30
	20	2.22	15.42	2.59	60	7.5	3.08	2.43	73.16	112.67	992.74	76.26	30.86	33.63	97.33	238.08
2.4	30	2.75	19.10	2.09	60	7.5	3.82	1.96	73.03	105.89	1301.29	99.96	30.86	31.17	90.21	252.21
6.2	40	3.18	22.08	1.81	60	7.5	4.42	1.70	72.76	101.46	1609.85	123.67	30.86	29.78	86.19	270.50
	50	3.52	24.44	1.64	60	7.5	4.89	1.53	72.24	98.13	1918.40	147.37	30.86	28.89	83.61	290.73

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

TIP - tempo de irrigação por posição (h);

NPL - número de posições de laterais;

NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia;

NMPD - número de mudanças possíveis por dia por linha lateral;

NLLN - número de linhas laterais necessárias;

DLL - diâmetro da linha lateral (mm);

DLP - diâmetro da linha principal (mm);

EAB - energia consumida anualmente com bombeamento ($KWh \cdot ha^{-1}$);

GABO - gasto anual com bombeamento ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMO - gasto anual com mão-de-obra ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMR - gasto anual com manutenção e reparos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CFAE - custo fixo anual com equipamentos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CAT - custo anual total com a irrigação ($US\$ \cdot ha^{-1}$).

Tabela 8. Composição do custo anual total de um hectare irrigado em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 12 x 18 m.

	DB	PS	Q	I	TIP	NPL	NPLID	NMPD	NLLN	DLL	DLP	EAB	GABO	GAMO	GAMR	CFAE	CAT
2.4	30	20	0.83	3.84	10.41	40	5.0	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		30	1.04	4.81	8.31	40	5.0	0.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.2	40	40	1.21	5.60	7.14	40	5.0	1.12	4.46	50.40	93.56	1609.85	123.67	20.58	29.98	86.78	261.01
		50	1.36	6.30	6.35	40	5.0	1.26	3.97	50.33	89.99	1918.40	147.37	20.58	28.59	82.75	279.28
2.4	30	20	1.12	5.19	7.71	40	5.0	1.04	4.82	56.41	107.40	992.74	76.26	20.58	33.87	98.02	228.72
		30	1.39	6.44	6.22	40	5.0	1.29	3.88	56.35	100.06	1301.29	99.96	20.58	30.64	88.66	239.84
		40	1.62	7.50	5.33	40	5.0	1.50	3.33	56.31	95.30	1609.85	123.67	20.58	28.78	83.29	256.32
		50	1.81	8.38	4.77	40	5.0	1.68	2.98	56.11	91.79	1918.40	147.37	20.58	27.60	79.87	275.41
2.4	30	20	1.58	7.31	5.47	40	5.0	1.46	3.42	64.29	109.66	992.74	76.26	20.58	32.26	93.37	222.47
		30	1.95	9.03	4.43	40	5.0	1.81	2.77	64.09	102.53	1301.29	99.96	20.58	29.50	85.38	235.43
		40	2.28	10.56	3.79	40	5.0	2.11	2.37	64.12	97.98	1609.85	123.67	20.58	27.91	80.79	252.95
		50	2.56	11.85	3.38	40	5.0	2.37	2.11	64.01	94.66	1918.40	147.37	20.58	26.90	77.86	272.71
2.4	30	20	2.22	10.28	3.89	40	5.0	2.06	2.43	73.16	112.67	992.74	76.26	20.58	31.33	90.68	218.85
		30	2.75	12.73	3.14	40	5.0	2.55	1.96	73.03	105.89	1301.29	99.96	20.58	28.93	83.74	233.22
		40	3.18	14.72	2.72	40	5.0	2.94	1.70	72.76	101.46	1609.85	123.67	20.58	27.59	79.84	251.66
		50	3.52	16.30	2.45	40	5.0	3.26	1.53	72.24	98.13	1918.40	147.37	20.58	26.72	77.34	272.01

DB - diâmetros dos bocais (mm);
 PS - pressão de operação dos aspersores (mca);
 Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);
 I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);
 TIP - tempo de irrigação por posição (h);
 NPL - número de posições de laterais;
 NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia;
 NMPD - número de mudanças possíveis por dia por linha lateral;
 NLLN - número de linhas laterais necessárias;
 DLL - diâmetro da linha lateral (mm);
 DLP - diâmetro da linha principal (mm);
 EAB - energia consumida anualmente com bombeamento ($KWh \cdot ha^{-1}$);
 GABO - gasto anual com bombeamento ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 GAMO - gasto anual com mão-de-obra ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 GAMR - gasto anual com manutenção e reparos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 CFAE - custo fixo anual com equipamentos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 CAT - custo anual total com a irrigação ($US\$ \cdot ha^{-1}$).

Tabela 9. Composição do custo anual total de um hectare irrigado em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 18 x 18 m.

DB	PS	Q	I	TIP	NPL	NPLID	NMPD	NLLN	DLL	DLP	EAB	GABO	GAMO	GAMR	CFAE	CAT
	20	0.83	2.56	15.61	40	5.0	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.04	3.21	12.46	40	5.0	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.2	40	1.21	3.73	10.71	40	5.0	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	1.36	4.20	9.53	40	5.0	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	1.12	3.46	11.57	40	5.0	0.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.39	4.29	9.32	40	5.0	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	40	1.62	5.00	8.00	40	5.0	1.00	5.00	48.88	87.68	1609.85	123.67	20.58	29.21	84.54	258.00
	50	1.81	5.59	7.16	40	5.0	1.12	4.48	48.71	84.25	1918.40	147.37	20.58	27.84	80.57	276.36
	20	1.58	4.88	8.20	40	5.0	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.95	6.02	6.65	40	5.0	1.20	4.15	55.64	93.95	1301.29	99.96	20.58	29.63	85.74	235.91
5.0	40	2.28	7.04	5.68	40	5.0	1.41	3.55	55.66	89.45	1609.85	123.67	20.58	27.78	80.41	252.44
	50	2.56	7.90	5.06	40	5.0	1.58	3.16	55.57	86.15	1918.40	147.37	20.58	26.61	77.01	271.56
	20	2.22	6.85	5.84	40	5.0	1.37	3.65	63.51	102.92	992.74	76.26	20.58	31.19	90.28	218.31
2.4	30	2.75	8.49	4.71	40	5.0	1.70	2.95	63.40	96.18	1301.29	99.96	20.58	28.45	82.33	231.32
6.2	40	3.18	9.81	4.08	40	5.0	1.96	2.55	63.16	91.77	1609.85	123.67	20.58	26.90	77.85	248.99
	50	3.52	10.86	3.68	40	5.0	2.17	2.30	62.71	88.48	1918.40	147.37	20.58	25.92	75.07	268.88

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de operação dos aspersores (mca);

Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);

I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);

TIP - tempo de irrigação por posição (h);

NPL - número de posições de laterais;

NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia;

NMPD - número de mudanças possíveis por dia por linha lateral;

NLLN - número de linhas laterais necessárias;

DLL - diâmetro da linha lateral (mm);

DLP - diâmetro da linha principal (mm);

EAB - energia consumida anualmente com bombeamento ($KWh \cdot ha^{-1}$);

GABO - gasto anual com bombeamento ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMO - gasto anual com mão-de-obra ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

GAMR - gasto anual com manutenção e reparos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CFAE - custo fixo anual com equipamentos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);

CAT - custo anual total com a irrigação ($US\$ \cdot ha^{-1}$).

Tabela 10. Composição do custo anual total de um hectare irrigado em função do bocal e pressão dos aspersores para o espaçamento 18 x 24 m.

DB	PS	Q	I	TIP	NPL	NPLID	NMPD	NLLN	DLL	DLP	EAB	GABO	GAMO	GAMR	CFAE	CAT
	20	0.83	1.92	20.82	30	3.75	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.04	2.41	16.62	30	3.75	0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.2	40	1.21	2.80	14.28	30	3.75	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	1.36	3.15	12.71	30	3.75	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	1.12	2.59	15.43	30	3.75	0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.39	3.22	12.43	30	3.75	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	40	1.62	3.75	10.67	30	3.75	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	1.81	4.19	9.55	30	3.75	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	1.58	3.66	10.94	30	3.75	0.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	30	1.95	4.51	8.86	30	3.75	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.0	40	2.28	5.28	7.58	30	3.75	1.06	3.55	55.66	94.88	1609.85	52.30	15.43	27.89	80.73	176.35
	50	2.56	5.93	6.75	30	3.75	1.19	3.16	55.57	91.38	1918.40	62.33	15.43	26.68	77.21	181.65
	20	2.22	5.14	7.78	30	3.75	1.03	3.65	63.51	109.17	992.74	32.25	15.43	31.48	91.10	170.26
2.4	30	2.75	6.37	6.28	30	3.75	1.27	2.95	63.40	102.02	1301.29	42.28	15.43	28.64	82.89	169.24
6.2	40	3.18	7.36	5.43	30	3.75	1.47	2.55	63.16	97.34	1609.85	52.30	15.43	27.04	78.25	173.02
	50	3.52	8.15	4.91	30	3.75	1.63	2.30	62.71	93.86	1918.40	62.33	15.43	26.02	75.30	179.08

DB - diâmetros dos bocais (mm);
 PS - pressão de operação dos aspersores (mca);
 Q - vazão do aspersor ($m^3 \cdot h^{-1}$);
 I - intensidade de aplicação ($mm \cdot h^{-1}$);
 TIP - tempo de irrigação por posição (h);
 NPL - número de posições de laterais;
 NPLID - número de posições de laterais irrigadas por dia;
 NMPD - número de mudanças possíveis por dia por linha lateral;
 NLLN - número de linhas laterais necessárias;
 DLL - diâmetro da linha lateral (mm);
 DLP - diâmetro da linha principal (mm);
 EAB - energia consumida anualmente com bombeamento ($KWh \cdot ha^{-1}$);
 GABO - gasto anual com bombeamento ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 GAMO - gasto anual com mão-de-obra ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 GAMR - gasto anual com manutenção e reparos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 CFAE - custo fixo anual com equipamentos ($US\$ \cdot ha^{-1}$);
 CAT - custo anual total com a irrigação ($US\$ \cdot ha^{-1}$).

As Tabelas 11 e 12, apresentadas a seguir, resumem as estatísticas de ajuste do modelo proposto (equação 59), que foi obtido através do PROC RSREG do pacote estatístico SAS (1988).

Tabela 11. Valores de F, nível mínimo de significância (NMS), coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de variação (C.V.) para o CUC e CAT.

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L.	CUC			CAT		
		F	NMS	R^2	F	NMS	R^2
LINEAR	3	229,00	0,0000	0,7228	131,70	0,0000	0,7116
QUADRAT.	3	25,49	0,0000	0,0805	34,65	0,0000	0,1872
INTER.	3	38,98	0,0000	0,1230	1,72	0,1742	0,0093
TOTAL REG.	9	97,80	0,0000	0,9263	56,01	0,0000	0,9081
CE (1)	4	175,10	0,0000	-	77,35	0,0000	-
DB (2)	4	64,84	0,0000	-	1,05	0,3904	-
PS (3)	4	9,46	0,0000	-	41,98	0,0000	-
C.V. (%)			6,72			4,22	

(1) - combinação de espaçamentos entre aspersores;

(2) - diâmetros dos bocais dos aspersores;

(3) - pressão de operação dos aspersores.

Tabela 12. Coeficientes estimados (β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij}) da regressão ajustada e nível mínimo de significância (NMS) no teste T para CUC e CAT.

PARÂMETRO	G.L.	CUC		CAT	
		COEFICIENTE	NMS	COEFICIENTE	NMS
CE	1	- 6,2403	0,0439	46,3079	0,0000
DB	1	7,0332	0,2437	- 12,3631	0,4084
PS	1	0,6455	0,1843	0,8683	0,4483
CE ²	1	- 2,6536	0,0000	- 8,0139	0,0000
DB ²	1	- 1,9717	0,0015	1,2129	0,4268
PS ²	1	- 0,0173	0,0044	0,0143	0,3022
CE x DB	1	3,5075	0,0000	- 1,6856	0,2223
CE x PS	1	- 0,1058	0,0059	- 0,2345	0,0392
DB x PS	1	0,2070	0,0000	0,0618	0,6161
INTERCEPTO		68,2702	0,0003	209,0895	0,0000

Conforme a Tabela 11, pode-se verificar que, no modelo ajustado para o CUC, os componentes lineares, quadráticos e as interações lineares apresentam significância ($P < 0,01$), ou seja, há indícios de existência de relação funcional (linear, quadrática e das interações) entre os parâmetros de projeto estudados (combinação de espaçamentos - CE, diâmetros dos bocais - DB e pressão de operação dos aspersores - PS) e os valores do CUC. O mesmo acontece com o modelo ajustado para o CAT, diferindo apenas nos componentes das interações lineares, que neste caso não foram significativos ($P < 0,1742$), ou seja, não influem na resposta da variável CAT.

Seguindo a Tabela 11 e analisando-se cada parâmetro de projeto individualmente, pode-se observar que os três influem significativamente ($P < 0,01$) no comportamento do CUC, enquanto que no comportamento do CAT não há indícios que os diâmetros dos bocais alterem significativamente seu valor ($P < 0,3904$).

Diante dessas colocações, pode-se dizer que, em termos de projeto para um sistema nas configurações apresentadas, a uniformidade de distribuição da água, representada pelo CUC, depende da combinação dos espaçamentos entre aspersores, dos diâmetros dos bocais e da pressão de operação, enquanto o custo anual total do sistema depende somente da combinação dos espaçamentos entre aspersores e da pressão de operação.

Na Tabela 12, os coeficientes estimados dos parâmetros de projeto para a regressão ajustada e nível mínimo de significância no teste T para o CUC e CAT mostram, no primeiro caso, que todos os coeficientes estimados foram significativos ($P < 0,01$) exceto os lineares dos diâmetros dos bocais ($P < 0,2437$) e da pressão de operação ($P < 0,1843$). No segundo caso, somente foram significativos ($P < 0,01$) os coeficientes linear e quadrático da combinação de espaçamentos e ($P < 0,05$) o coeficiente da interação combinação de espaçamentos com pressão de operação.

Com isso, apresentam-se a seguir os modelos ajustados para o CUC e CAT, enquanto que no Apêndice 5 podem ser comparados seus valores observados com os estimados.

$$\begin{aligned} \text{CUC} = & 68,2702 - 6,2403.\text{CE} + 7,0332.\text{DB} + 0,6455.\text{PS} - \\ & 2,6536.\text{CE}^2 - 1,9717.\text{DB}^2 - 0,0173.\text{PS}^2 + \\ & 3,5075.\text{CE}.\text{DB} - 0,1058.\text{CE}.\text{PS} + 0,2070.\text{DB}.\text{PS} \quad (60) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CAT} = & 209,0895 - 46,3079.\text{CE} - 12,3631.\text{DB} + 0,8683.\text{PS} - \\ & 8,0139.\text{CE}^2 + 1,2129.\text{DB}^2 + 0,0143.\text{PS}^2 - \\ & 1,6856.\text{CE}.\text{DB} - 0,2345.\text{CE}.\text{PS} + 0,2070.\text{DB}.\text{PS} \quad (61) \end{aligned}$$

As figuras apresentadas a seguir mostram o comportamento do CUC e CAT em relação aos parâmetros de projeto.

Figura 1. Comportamento do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), na média, em relação à combinação de espaçamentos (CE).

A Figura 1, apresentada na página anterior, mostra o comportamento do CUC em relação às combinações de espaçamentos (CE). Verifica-se que seu valor médio reduz à medida que aumentam-se as distâncias entre os aspersores na linha e entre linhas laterais, ou seja, com a combinação dos espaçamentos maiores. Tal comportamento, já esperado e encontrado por outros pesquisadores, pode ser explicado pelo fato de que o afastamento entre aspersores provoca redução na sobreposição da precipitação dos aspersores, tornando o perfil de distribuição mais irregular, com consequente diminuição dos valores do CUC.

Figura 2. Comportamento do custo anual total (CAT), na média, em relação à combinação de espaçamentos (CE).

A Figura 2 mostra o comportamento do CAT, na média, em relação à combinação de espaçamentos (CE). Neste caso, pode-se verificar que da CE₁ (6 x 12 m) para a CE₂ (12 x 12 m) ocorre um ligeiro aumento do CAT; da CE₂ para a CE₃ (12 x 18 m) ocorre uma acentuada redução; da CE₃ para a CE₄ (18 x 18 m) novamente ocorre um ligeiro aumento; e, finalmente, da CE₄ para a CE₅ volta a acentuar-se a redução do CAT. A explicação para os ligeiros aumentos do CAT (de CE₁ para CE₂ e de CE₃ para CE₄) é que o aumento da distância entre aspersores na linha lateral somente, ou seja, menor número deles em cada linha lateral, promove um aumento do número de linhas laterais necessárias (NLLN) no sistema, devido ao maior tempo despendido para irrigar cada posição. Com isso, maiores serão os gastos com equipamentos, manutenção e reparos. Este efeito é atenuado parcialmente pelo fato que o maior número de linhas laterais necessárias (NLLN) significa um menor fator de Christiansen (múltiplas saídas) para linha principal e, conseqüentemente, menor diâmetro e custo da mesma.

Por outro lado, a explicação para as acentuadas reduções do CAT (de CE₂ para CE₃ e de CE₄ para CE₅) é devido ao fato que aumentando-se a distância entre aspersores entre linhas laterais somente, ou seja, mesmo número de aspersores na linha lateral porém maior distância entre as linhas laterais, promove redução nos gastos com mão-de-obra para a mudança das mesmas, uma vez que cada linha lateral fica mais tempo irrigando em cada posição, ou

seja, é rotacionada menos vezes e sem necessidade de acréscimo em seu número.

Figura 3. Comportamento do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), na média, em relação ao ao diâmetro dos bocais (DB).

A figura anterior revela uma tendência de aumento do CUC, na média, à medida que se aumentam os diâmetros dos bocais. Este comportamento apresenta-se mais evidenciado nas combinações de espaçamentos mais amplas (CE₃, CE₄ e CE₅). A atribuição a isto deve-se, provavelmente, a menor pulverização do jato de água que passa pelo bocal de maior diâmetro, aumentando, com isso, seu alcance e, conseqüentemente, melhoria nas condições de

sobreposição da precipitação dos aspersores nestes espaçamentos.

Figura 4. Comportamento do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), na média, em relação à pressão de serviço (PS).

De uma maneira geral o CUC apresentou comportamento aproximadamente constante em relação à variação da pressão de serviço (PS), embora esta influa significativamente ($P < 0,01$) seu valor. A explicação plausível é que isto tenha ocorrido em virtude dos níveis de pressões utilizadas nos testes estarem dentro dos limites sugeridos pelo fabricante. Mesmo assim, o nível de pressão de serviço de 30 mca foi o que proporcionou os melhores

resultados do CUC, provavelmente por fracionar o jato em gotas menores que na pressão de 20 mca, e maiores que nas demais pressões, promovendo uma distribuição mais adequada para as condições do estudo.

Figura 5. Comportamento do custo anual total (CAT), na média, em relação à pressão de serviço (PS).

Observa-se pela Figura 5, que o CAT, na média, aumenta com o acréscimo da pressão de serviço (PS). Tal comportamento é atribuído a maior demanda de potência instalada e consumo de energia, o que causa maior gasto anual com bombeamento (GABO). Parcialmente este efeito é atenuado devido ao fato que o diâmetro da linha principal reduz-se sensivelmente com o aumento da pressão de serviço

(o diâmetro das linhas laterais também sofrem redução, porém quase insignificante) numa mesma combinação de espaçamentos (CE) e diâmetros de bocais (DB), uma vez que a perda de carga assumida para dimensionamento da linha principal é 15% da pressão de serviço.

Em relação ao gasto anual com bombeamento (GABO), verifica-se que o mesmo sofre um acréscimo médio de 0,6217% para cada ponto percentual de acréscimo na pressão de serviço (PS), quando esta vai de 20 até 50 mca ($\Delta = 150\%$), respectivamente a um GABO que vai de 76,26 até 147,37 US\$.ha⁻¹ ($\Delta = 93,25\%$).

Como fora já descrito no início deste estudo, a irrigação deve ser feita de maneira mais econômica possível, porém sem perder a qualidade, que está intimamente relacionada à uniformidade de distribuição da água. Portanto, de um lado tem-se como critério de seleção o custo anual total (CAT), que deve ser mínimo e, de outro lado, a uniformidade de distribuição da água, medida pelo CUC, que deve ser máxima. Em termos do CUC, a recomendação básica para a seleção da configuração do sistema, segundo FRIZZONE (1992), é que seu valor seja em torno de: 70% para plantas com sistema radicular profundo e extenso, como as árvores frutíferas; 75 a 83% para culturas com sistema radicular relativamente profundo, como alfafa, milho e feijão; e mais de 85% para culturas delicadas com sistema radicular pouco profundo, como as hortaliças. Salienta-se o fato de que estes valores recomendados para o CUC são empíricos,

servindo apenas como orientação. A Tabela 13, apresentada a seguir, seleciona as melhores configurações do sistema no presente estudo de acordo com o desempenho do CUC e CAT.

Tabela 13. Configurações do sistema que apresentam o menor custo anual total (CAT) diante dos níveis mínimos exigidos do CUC.

CUC (%)	CONFIGURAÇÃO (CE-DB-PS)	CAT (US\$.ha ⁻¹)
≥ 70	CE ₅ = 18 x 24 m DB ₄ = 2,4 x 6,2 mm PS ₂ = 30 mca	169,24
≥ 80	CE ₃ = 12 x 18 m DB ₄ = 2,4 x 6,2 mm PS ₁ = 20 mca	218,85
≥ 90	CE ₃ = 12 x 18 m DB ₄ = 2,4 x 6,2 mm PS ₂ = 30 mca	233,22

Finalmente, efetuou-se um estudo estatístico de regressão linear relacionando o CUC (variável independente) com o CAT (variável dependente) obtendo-se, assim, estimativas do CAT para cada valor do CUC desejado. O resumo deste estudo encontra-se na Tabela 14, apresentada a seguir.

Tabela 14. Análise de variância para a regressão linear relacionando o CUC com CAT.

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REG. LINEAR	1	18748.8591	25.3861	0.00004
RESÍDUO	59	738.5492		
TOTAL	60	62323.2638		
COEF. DETERMINAÇÃO		0.3008		

De acordo com a tabela, a regressão linear apresenta-se significativa ($P < 0,01$) mostrando haver uma relação funcional entre os valores do CUC (variável independente) com os valores do CAT (variável dependente). Com isso, o modelo ficou expresso da seguinte maneira:

$$\text{CAT} = 110,03 + 1,64.\text{CUC} \quad (62)$$

sendo: CAT - custo anual total estimado em $\text{US}\$.ha^{-1}$;

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen em %.

Os coeficientes da expressão ajustada anteriormente apresentaram significância ($P < 0,01$) no teste T, evidenciando suas contribuições na determinação do CAT.

Embora a regressão linear tenha apresentado significância, seu coeficiente de determinação é baixo ($R^2 = 0,3008$), indicando que somente parte da variação na resposta do CAT é explicada pela regressão em questão.

5. CONCLUSÕES

Conforme as proposições do trabalho, material e métodos aplicados e resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a uniformidade de distribuição da água, medida pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), foi influenciada significativamente ($P < 0,01$) pelos três parâmetros de projeto estudados, ou seja, combinação de espaçamentos (CE), diâmetro dos bocais (DB) e pressão de serviço dos aspersores (PS); enquanto o custo anual total do sistema (CAT) foi influenciado significativamente ($P < 0,01$) somente pela CE e pela PS;

- na média, o CUC sofreu redução à medida que ampliaram-se as distâncias entre os aspersores, encontrando-se valores de: 93,2% para CE₁ (6 x 12 m), 90,0% para CE₂ (12 x 12 m), 81,7% para CE₃ (12 x 18 m), 74,6% para CE₄ (18 x 18 m) e 52,2% para CE₅ (18 x 24 m);

- na média, o CAT aumentou ligeiramente com o aumento da distância dos aspersores na linha lateral somente, enquanto que, por outro lado, diminuiu acentuadamente com o aumento da distância entre linhas laterais somente, fatos

estes relacionados ao custo da mão-de-obra;

- na média, o CUC aumentou com o aumento dos diâmetros dos bocais, especialmente nas CE₃, CE₄ e CE₅, o que foi atribuído, provavelmente, a menor pulverização do jato que passa pelo bocal de maior diâmetro, melhorando com isso o alcance e, conseqüentemente, as sobreposições;

- na média, o CUC manteve-se aproximadamente constante em relação à variação da PS, embora esta tenha influído significativamente ($P < 0,01$) seu valor. Isto, possivelmente, ocorreu devido às pressões utilizadas nos testes estarem dentro dos limites sugeridos pelo fabricante;

- na média, o CAT aumentou com o acréscimo da PS devido a maior demanda de potência instalada e consumo de energia, causando maior gasto anual com bombeamento (GABO);

- o modelo polinomial quadrático ajustado para o CUC e CAT apresentou, na análise de regressão, coeficientes de determinação (R^2) de 0,9263 e 0,9081 respectivamente; podendo-se recomendar a utilização das mesmas para condições semelhantes as observadas no estudo;

- a configuração do sistema mais viável economicamente para um CUC $\geq 70\%$ apresentou um CAT de 169,24 US\$. ha⁻¹; para um CUC $\geq 80\%$ um CAT de 218,85 US\$. ha⁻¹; e para um CUC $\geq 90\%$ um CAT de 233,22 US\$. ha⁻¹;

- a regressão linear relacionando o CUC (variável independente) com o CAT (variável dependente) foi significativa ($P < 0,01$) e apresentou um coeficiente de determinação de 0,3008.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, B.; BIANCHI, A.M.; MOLDAU, J.H.; MOLINA, A.
Projetos de irrigação; o custo da transformação social.
São Paulo, PRONI/FIPE, 1989. 160p. (Relatórios de
Pesquisa, 45).
- ARRUDA, N.T. Análise de uniformidade da distribuição da
água no sistema de irrigação por aspersão em linha.
Viçosa, 1981. 80p. (M.S. - Universidade Federal de
Viçosa).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aspersores para
irrigação. Avaliação de características operacionais
- Método de ensaio; NBR 8988. São Paulo, 1985, 9p.
- BERNUTH, R.D. Uniformity design criteria under limited
water. Transactions of the ASAE, St Joseph, 26 (5):
1418-21, 1983.
- BRANSCHIED, V.O. & HART, W.E. Predicting field
distributions of sprinklers systems. Transaction of the
ASAE, St Joseph, 11 (6): 801-3, 808, 1968.
- BRASIL. Comitê de Distribuição de Energia Elétrica.
Tarifas horo-sazonais, manual de orientação ao
consumidor. Rio de Janeiro, (CODI), 1988. 28p.

- BRASIL. Companhia do Desenvolvimento do Vale do São Francisco. Custos e benefícios da irrigação. Brasília, (CODEVASF), s.d. 23p.
- BRASIL. Ministério da Irrigação. Programa Nacional de Irrigação. Tempo de irrigar: manual do irrigante. São Paulo, Ed. Mater, 1987. 160p.
- CHEN, D. & WALLENDER, W.W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27 (3): 737-743, 1984.
- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinklers. Berkeley, University of California Experiment Station, 1942. 124p. (Bulletin, 670).
- COELHO, R.D. Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas. Piracicaba, 1990. 141p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- FARIA, J.E. Estudo da uniformidade e de sua influência na produção e na economia dos projetos de irrigação por aspersão, através de simulação. São Carlos, 1993. 147p. (Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos/USP).
- FRIZZONE, J.A. Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência. Piracicaba, ESALQ - Depto. Engenharia Rural, 1992. 53p. (Série Didática, 3).
- GOHRING, T.R. & WALLENDER, W.W. Economics of sprinkle irrigation systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 30 (4): 1083-89, 1987.

- GOMIDE, R.L. Determinação e análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. Viçosa, 1978. 87p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 42 (7): 354-55, 1961.
- HOFFMANN, R.; ENGLER, J.J.C.; SERRANO, O.; THAME, A.C.M.; NEVES, E.M. *Administração da empresa agrícola*. 5 ed. São Paulo, Pioneira, 1987. 325p.
- MATSURA, E.E. Eficiência de irrigação e uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão. Piracicaba, 1987. 124p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz"/USP).
- MELO, J.F. Custos da irrigação por aspersão em Minas Gerais. Viçosa, 1993. 147p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa).
- OLITTA, A.F.L. *Os métodos de irrigação*. São Paulo, Livraria Nobel, 1987. 267p.
- PAIR, C.H.; HINZ, W.W.; REID, C.; FROST, K.R. *Sprinkler irrigation*. 3.ed. Washington, Sprinkler Irrigation Association, 1969. 444p.
- ROCHA, V. Projetos de irrigação. In: CURSO DE ENGENHARIA DA IRRIGAÇÃO. Brasília, ABEAS, 1987. módulo 12, 89p.
- SAS INSTITUTE INC. *SAS/STAT User's Guide: release 6.03 edition*. Cary, SAS Institute Inc., 1988. 1028p.

- SCALOPPI, E.J. Exigências de energia para irrigação. ITEM:
- Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, 12 (2):
13-7, 1985.
- SCALOPPI, E.J. Critérios básicos para seleção de sistemas
de irrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte,
139 (12): 54-63, 1986.
- SILVA, J.B.D. Uniformidade de aplicação de água abaixo da
superfície do solo utilizando irrigação por aspersão.
São Carlos, 1980. 333p. (Mestrado - Escola de
Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo).
- STIPPLER, H.H. Sprinkler irrigation in the Pacific
Northwest. Washington, U.S. Department of Agriculture /
Agricultural Reserch Service. 256p. (Agriculture
Information Bulletin, 166).
- THOMPSON, G.T.; SPIESS, L.B.; KRIDER, J.N. Farm resources
system selection. In: _____. Design and operation of
farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1980, p.
45-73.
- WILCOX, J.C. & SWAILES, G.E. Uniformity of water
distribution by some undertree orchard sprinklers.
Scientific Agriculture, Ottawa, 27 (11): 565-83, 1947.

APÊNDICE 1
ESQUEMA DO ASPERSOR
MODELO DE PLANILHA

Figura 1.1. Esquema do aspersor A-1823 Fabrimar, mostrando suas características construtivas.

TESTE Nº :	CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO:																	
DATA:	PRESSÃO DE SERVIÇO (mca):																	
INÍCIO:	DIÂMETROS DOS BOCAIS (mm × mm)																	
TÉRMINO:	VELOCIDADE DO VENTO (m/s):																	
DURAÇÃO (min):	ALTURA DA HASTE (m):																	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
7	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
8	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
9	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
										*→	aspersor							
10	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
11	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
12	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
13	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
14	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
15	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
16	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
17	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
18	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

→ tubos de aço galvanizado
com engate rápido

↪ pluviômetros

OBSERVAÇÕES:

Figura 1.2. Modelo de planilha utilizada para anotação dos dados obtidos no campo.

APÊNDICE 2
RESULTADOS E ILUSTRAÇÕES DOS TESTES
DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA PELOS ASPERSORES

Figura 2.1. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 3,2 mm e sob pressão de operação de 20 mca.

Figura 2.2. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 3,2 mm e sob pressão de operação de 30 mca.

Figura 2.3. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 3,2 mm e sob pressão de operação de 40 mca.

Figura 2.4. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 3,2 mm e sob pressão de operação de 50 mca.

Figura 2.5. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 4,0 mm e sob pressão de operação de 20 mca.

Figura 2.6. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 4,0 mm e sob pressão de operação de 30 mca.

Figura 2.7. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 4,0 mm e sob pressão de operação de 40 mca.

Figura 2.8. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 4,0 mm e sob pressão de operação de 50 mca.

Figura 2.9. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 5,0 mm e sob pressão de operação de 20 mca.

Figura 2.10. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 5,0 mm e sob pressão de operação de 30 mca.

Figura 2.11. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 5,0 mm e sob pressão de operação de 40 mca.

Figura 2.12. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 5,0 mm e sob pressão de operação de 50 mca.

Figura 2.13. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 6,2 mm e sob pressão de operação de 20 mca.

Figura 2.14. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 6,2 mm e sob pressão de operação de 30 mca.

Figura 2.15. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 6,2 mm e sob pressão de operação de 40 mca.

Figura 2.16. Distribuição espacial de água e valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen nas 5 combinações de espaçamentos entre aspersores ($E_1 \times E_2$) com bocais de 2,4 x 6,2 mm e sob pressão de operação de 50 mca.

APÊNDICE 3
PREÇO ESTIMADO DE CADA EQUIPAMENTO
UTILIZADO NO SISTEMA

Tabela 3.1. Diâmetros comerciais versus preços de cada equipamento do sistema.

Nº	EQUIPAMENTO	DIÂMETRO (mm)	PREÇO (US\$/unidade)
01.	VÁLVULA de Pé em ferro fundido com vedação de borracha	25.4	4.3287
		31.8	5.4941
		38.1	6.1601
		50.8	10.4887
		63.5	13.4023
		76.2	17.2315
		101.6	25.6392
		127.0	31.9657
		152.4	44.1193
02.	MANGOTE	25.4	7.6584
		31.8	8.9904
		38.1	12.2369
		50.8	15.9828
		63.5	21.6434
		76.2	29.1354
		101.6	46.2004
		127.0	59.6027
		152.4	80.4137
		203.2	136.7699
03.	NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	25.4	1.8314
		31.8	2.3308
		38.1	2.9135
		50.8	4.1622
		63.5	4.7449
		76.2	5.9103
		101.6	8.2412
		127.0	9.6563
		152.4	15.3169
04.	NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	50.8	10.4887
		76.2	12.9861
		101.6	19.8953
		127.0	29.3851
		152.4	46.4502
		203.2	76.5845
05.	REDUÇÃO EXCÊNTRICA flangeada em ferro fundido	76.2	30.3008
		101.6	38.8749
		127.0	55.1908
		152.4	70.3412
		203.2	91.5684

Tabela 3.1. (contin.). Diâmetros comerciais versus preços de cada equipamento do sistema.

Nº	EQUIPAMENTO	DIÂMETRO (mm)	PREÇO (US\$/unidade)
06.	BRAÇADEIRA	25.4	1.9979
		31.8	2.0811
		38.1	3.2465
		50.8	3.3298
		63.5	3.6627
		76.2	3.9125
		101.6	4.2454
		127.0	4.7449
		152.4	5.4109
07.	REGISTRO de GAVETA em bronze	38.1	23.8078
		50.8	37.4598
		63.5	91.5684
		76.2	129.0282
		101.6	258.0564
		127.0	399.5712
		152.4	499.4640
08.	CURVA de 90 GRAUS flangeada com bujão de escorva e rosca	50.8	23.3916
		76.2	35.3787
		101.6	51.3615
		127.0	57.6881
09.	INICIAL FÊMEA com rosca gas	76.2	5.4941
		101.6	7.9082
		127.0	11.6542
		152.4	16.2326
10.	VÁLVULA de RETENÇÃO com by pass e engate rápido	76.2	93.2333
		101.6	162.3258
		127.0	240.5752
		152.4	377.0121
11.	TUBO IRRIGA EMS - 6 metros	50.8	23.3370
		76.2	35.7933
		101.6	57.0840
12.	TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 metros	50.8	26.3280
		76.2	42.3308
		101.6	71.1664
13.	VÁLVULA de LINHA EMS com haste de latão	76.2	50.2740
		101.6	56.9234

Tabela 3.1. (contin.). Diâmetros comerciais versus preços de cada equipamento do sistema.

Nº	EQUIPAMENTO	DIÂMETRO (mm)	PREÇO (US\$/unidade)
14.	CURVA de DERIVAÇÃO EMS	50.8	17.1538
		76.2	18.4660
15.	CURVA de NIVELAMENTO EMS	50.8	18.3109
		76.2	25.2275
16.	CAP MACHO EMS	50.8	11.9036
		76.2	14.7493
		101.6	24.0860

Tabela 3.2. Potências comerciais versus preços dos equipamentos elétricos.

Nº	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA (WATT)	PREÇO (US\$/unidade)
17.	CHAVE COMPENSADORA ENERG 220 volts	11025	630.14
		18375	706.85
		36750	917.81
18.	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	15000	926.03
		30000	1156.17
		45000	1536.99

Observação: o número anotado a esquerda de cada equipamento corresponde a sua ordem e identificação para utilização no Apêndice 4.

Tabela 3.3. Preços dos modelos de CONJUNTOS MOTOBOMBA KSB - BLOC e preço médio estimado da unidade de potência (equipamento número de ordem 19).

MODELO	POTÊNCIA ^(*) (WATT)	PREÇO (US\$/unid.)	PREÇO/POT. (US\$/WATT)
40 - 160	12495	1487.68	0.119062
50 - 125	10290	1397.27	0.135789
50 - 200	28665	3753.43	0.130941
(*) POTÊNCIA DA BOMBA NO MÁXIMO RENDIMENTO.		PREÇO MÉDIO DO WATT = 0.128597 PEQ ₁₉ = 0.128597 × POT ₁₉	

Tabela 3.4. Preços dos equipamentos que possuem preços fixos.

Nº	EQUIPAMENTO	PREÇO (US\$/unidade)
20.	ASPELOR FABRIMAR modelo A-1823	7.92
21.	MANÔMETRO de BOURDON com glicerina de 01 a 20 Kgf.cm ⁻² (com torneira)	46.70
22.	TUBO de SUBIDA para aspersor de aço galvanizado de 1" × 1 m	4.83
23.	VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor de aço galvanizado de 1"	5.83

Tabela 3.5. Valores do coeficiente (m_i) e expoente (n_i) da função potencial de preço versus diâmetro ou potência do equipamento, ajustada conforme metodologia descrita no item 3.2.1..

NO	EQUIPAMENTO	m	n	R ²
01.	VÁLVULA de PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	0.05865	1.31049	0.99571
02.	MANGOTE	0.07516	1.38799	0.99287
03.	NIPLE em ferro f. com rosca e ranhuras para mangueira	0.05052	1.10782	0.98878
04.	NIPLE FLANGEADO em ferro f. com ranhuras para mangueira	0.02409	1.48994	0.94964
05.	REDUÇÃO EXCÊNTRICA flangeada em ferro fundido	0.18037	1.17718	0.98925
06.	BRAÇADEIRA	0.40290	0.51938	0.91181
07.	REGISTRO de GAVETA em bronze	0.00537	2.30844	0.98508
08.	CURVA de 90 GRAUS flangeada com bujão de escorva e rosca	0.42327	1.02397	0.98645
09.	INICIAL FÊMEA com rosca gas	0.00599	1.56623	0.99230
10.	VÁLVULA de RETENÇÃO com by pass e engate rápido	0.01714	1.98169	0.99607
11.	TUBO IRRIGA EMS - 6 metros	0.15195	1.27501	0.98495
12.	TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 metros	0.09772	1.14731	0.98478
13.	VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	7.73970	0.43180	—
14.	CURVA de DERIVAÇÃO EMS	8.39930	0.18180	—
15.	CURVA de NIVELAMENTO EMS	0.82140	0.79030	—
16.	CAP MACHO EMS	0.23560	0.98480	0.90092
17.	CHAVE COMPENSADORA ENERG 220 volts	32.6907	0.31610	0.98222
18.	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	12.4113	0.44600	0.95176

APÊNDICE 4
DISCRIMINAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E PREÇO
ESTIMADO DOS EQUIPAMENTOS NAS DIVERSAS
CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

Tabela 4.1. Discriminação e quantificação dos equipamentos na primeira combinação de espaçamentos entre aspersores - CE1.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 6 m	ENTRE LATERAIS = 12 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA PRINCIPAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	60
→ VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	30
→ CAP MACHO EMS	1
→ VÁLVULA DE PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	1
→ MANGOTE - 10 m	1
→ NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	1
→ NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	1
→ BRAÇADEIRA para mangote	2
→ REDUÇÃO EXCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ AMPLIAÇÃO CONCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ REGISTRO DE GAVETA em bronze	1
→ CURVA FLANGEADA DE 90 GRAUS com bujão de escorva e rosca	1
→ MANÔMETRO DE BOURDON com glicerina	1
→ INICIAL FÊMEA com rosca gás	1
→ VÁLVULA DE RETENÇÃO com by pass e engate rápido	1

Tabela 4.1. (contin.). Discriminação e quantificação dos equipamentos na CE1.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 6 m	ENTRE LATERAIS = 12 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA LATERAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 m	18
→ ASPERSOR A-1823 FABRIMAR	18
→ VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor 1"	18
→ SUBIDA para aspersor 1" x 1 m	18
→ CAP MACHO EMS	1
→ CURVA DE DERIVAÇÃO EMS	1
→ CURVA DE NIVELAMENTO EMS	1
<u>COMPONENTES ELÉTRICOS</u>	
→ MOTOBOMBA KSB BLOC	1
→ CHAVE DE PARTIDA COMPENSADORA	1
→ TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	1

Com isso, o preço estimado dos equipamentos para cada configuração do sistema nesta combinação de espaçamentos entre aspersores é definido pela expressão apresentada a seguir:

$$PE (6 \times 12) = \left[18.PEQ_{12} + 18.PEQ_{20} + 18.PEQ_{23} + 18.PEQ_{22} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_{14} + 1.PEQ_{15} \right].NLLN + \left[60.PEQ_{11} + 30.PEQ_{13} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_1 + 1.PEQ_2 + 1.PEQ_3 + 1.PEQ_4 + 2.PEQ_5 + 2.PEQ_6 + 1.PEQ_7 + 1.PEQ_8 + 1.PEQ_{21} + 1.PEQ_9 + 1.PEQ_{10} \right] + \left[1.PEQ_{19} + 1.PEQ_{17} + 1.PEQ_{18} \right]$$

Substituindo os PEQ_{ni} pelas respectivas funções de preço estimado ($mi.DEQ^{ni}$), tem-se:

$$PE (6 \times 12) = \left[(18 \times 0,09772 \times (DE_{12})^{1.14731}) + (18 \times 7.92) + (18 \times 5.83) + (18 \times 4.83) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 8.3993 \times (DE_{14})^{0.1818}) + (1 \times 0.8214 \times (DE_{15})^{0.7903}) \right] \times NLLN + \left[(60 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (30 \times 7.7397 \times (DE_{13})^{0.4318}) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 0.05865 \times (DE_1)^{1.31049}) + (1 \times 0.07516 \times (DE_2)^{1.38799}) + (1 \times 0.05052 \times (DE_3)^{1.10782}) + (1 \times 0.02409 \times (DE_4)^{1.48994}) + (2 \times 0.18037 \times (DE_5)^{1.17718}) + (2 \times 0.40290 \times (DE_6)^{0.51938}) + (1 \times 0.00537 \times (DE_7)^{2.30844}) + (1 \times 0.42327 \times (DE_8)^{1.02397}) + (1 \times 46.70) + (1 \times 0.00599 \times (DE_9)^{1.56623}) + (1 \times 0.01714 \times (DE_{10})^{1.98169}) \right] + \left[(1 \times 0.12978039 \times POT_{19}) + (1 \times 32.6907 \times (POT_{17})^{0.3161}) + (1 \times 12.4113 \times (POT_{18})^{0.4460}) \right]$$

Tabela 4.2. Discriminação e quantificação dos equipamentos na segunda combinação de espaçamentos entre aspersores - CE2.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 12 m	ENTRE LATERAIS = 12 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA PRINCIPAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	60
→ VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	30
→ CAP MACHO EMS	1
→ VÁLVULA DE PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	1
→ MANGOTE - 10 m	1
→ NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	1
→ NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	1
→ BRAÇADEIRA para mangote	2
→ REDUÇÃO EXCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ AMPLIAÇÃO CONCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ REGISTRO DE GAVETA em bronze	1
→ CURVA FLANGEADA DE 90 GRAUS com com bujão de escorva e rosca	1
→ MANÔMETRO DE BOURDON com glicerina	1
→ INICIAL FÊMEA com rosca gás	1
→ VÁLVULA DE RETENÇÃO com by pass e engate rápido	1

Tabela 4.2. (contin.). Discriminação e quantificação dos equipamentos na CEz.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 12 m	ENTRE LATERAIS = 12 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA LATERAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 m	9
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	9
→ ASPERSOR A-1823 FABRIMAR	9
→ VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor 1"	9
→ SUBIDA para aspersor 1" x 1 m	9
→ CAP MACHO EMS	1
→ CURVA DE DERIVAÇÃO EMS	1
→ CURVA DE NIVELAMENTO EMS	1
<u>COMPONENTES ELÉTRICOS</u>	
→ MOTOBOMBA KSB BLOC	1
→ CHAVE DE PARTIDA COMPENSADORA	1
→ TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	1

Com isso, o preço estimado dos equipamentos para cada configuração do sistema nesta combinação de espaçamentos entre aspersores é definido pela expressão apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}
 PE (12 \times 12) = & \left[9.PEQ_{12} + 9.PEQ_{11} + 9.PEQ_{20} + \right. \\
 & 9.PEQ_{23} + 9.PEQ_{22} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_{14} + 1.PEQ_{15} \left. \right] .NLLN + \\
 & \left[60.PEQ_{11} + 30.PEQ_{13} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_1 + 1.PEQ_2 + 1.PEQ_3 + \right. \\
 & 1.PEQ_4 + 2.PEQ_5 + 2.PEQ_6 + 1.PEQ_7 + 1.PEQ_8 + 1.PEQ_{21} + \\
 & 1.PEQ_9 + 1.PEQ_{10} \left. \right] + \left[1.PEQ_{19} + 1.PEQ_{17} + 1.PEQ_{18} \right]
 \end{aligned}$$

Substituindo os PEQ_{ij} pelas respectivas funções de preço estimado ($mi.DEQ^{ni}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
 PE (12 \times 12) = & \left[(9 \times 0.09772 \times \right. \\
 & (DE_{12})^{1.14791}) + (9 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (9 \times 7.92) \\
 & + (9 \times 5.83) + (9 \times 4.83) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \\
 & \times 8.3993 \times (DE_{14})^{0.1818}) + (1 \times 0.8214 \times (DE_{15})^{0.7903}) \left. \right] \times \\
 & NLLN + \left[(60 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (30 \times 7.7397 \times \right. \\
 & (DE_{13})^{0.4318}) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 0.05865 \times \\
 & (DE_1)^{1.31049}) + (1 \times 0.07516 \times (DE_2)^{1.38799}) + (1 \times 0.05052 \\
 & \times (DE_3)^{1.10782}) + (1 \times 0.02409 \times (DE_4)^{1.48994}) + (2 \times \\
 & 0.18037 \times (DE_5)^{1.17718}) + (2 \times 0.40290 \times (DE_6)^{0.51998}) + (1 \\
 & \times 0.00537 \times (DE_7)^{2.30844}) + (1 \times 0.42327 \times (DE_8)^{1.02397}) + \\
 & (1 \times 46.70) + (1 \times 0.00599 \times (DE_9)^{1.56623}) + (1 \times 0.01714 \times \\
 & (DE_{10})^{1.98169}) \left. \right] + \left[(1 \times 0.12978039 \times POT_{19}) + (1 \times 32.6907 \right. \\
 & \times (POT_{17})^{0.3161}) + (1 \times 12.4113 \times (POT_{18})^{0.4460}) \left. \right]
 \end{aligned}$$

Tabela 4.3. Discriminação e quantificação dos equipamentos na terceira combinação de espaçamentos entre aspersores - CEa.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 12 m	ENTRE LATERAIS = 18 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA PRINCIPAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	60
→ VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	20
→ CAP MACHO EMS	1
→ VÁLVULA DE PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	1
→ MANGOTE - 10 m	1
→ NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	1
→ NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	1
→ BRAÇADEIRA para mangote	2
→ REDUÇÃO EXCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ AMPLIAÇÃO CONCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ REGISTRO DE GAVETA em bronze	1
→ CURVA FLANGEADA DE 90 GRAUS com bujão de escorva e rosca	1
→ MANÔMETRO DE BOURDON com glicerina	1
→ INICIAL FÊMEA com rosca gás	1
→ VÁLVULA DE RETENÇÃO com by pass e engate rápido	1

Tabela 4.3. (contin.). Discriminação e quantificação dos equipamentos na CE3.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 12 m	ENTRE LATERAIS = 18 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA LATERAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 m	9
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	9
→ ASPERSOR A-1823 FABRIMAR	9
→ VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor 1"	9
→ SUBIDA para aspersor 1" x 1 m	9
→ CAP MACHO EMS	1
→ CURVA DE DERIVAÇÃO EMS	1
→ CURVA DE NIVELAMENTO EMS	1
<u>COMPONENTES ELÉTRICOS</u>	
→ MOTOBOMBA KSB BLOC	1
→ CHAVE DE PARTIDA COMPENSADORA	1
→ TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	1

Com isso, o preço estimado dos equipamentos para cada configuração do sistema nesta combinação de espaçamentos entre aspersores é definido pela expressão apresentada a seguir:

$$PE (12 \times 18) = \left[9.PEQ_{12} + 9.PEQ_{11} + 9.PEQ_{20} + 9.PEQ_{23} + 9.PEQ_{22} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_{14} + 1.PEQ_{15} \right].NLLN + \left[60.PEQ_{11} + 20.PEQ_{13} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_1 + 1.PEQ_2 + 1.PEQ_3 + 1.PEQ_4 + 2.PEQ_5 + 2.PEQ_6 + 1.PEQ_7 + 1.PEQ_8 + 1.PEQ_{21} + 1.PEQ_9 + 1.PEQ_{10} \right] + \left[1.PEQ_{19} + 1.PEQ_{17} + 1.PEQ_{18} \right]$$

Substituindo os PEQ_{18} pelas respectivas funções de preço estimado ($m_i.DEQ^{ni}$), tem-se:

$$PE (12 \times 18) = \left[(9 \times 0.09772 \times (DE_{12})^{1.14731}) + (9 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (9 \times 7.92) + (9 \times 5.83) + (9 \times 4.83) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 8.3993 \times (DE_{14})^{0.1818}) + (1 \times 0.8214 \times (DE_{15})^{0.7903}) \right] \times NLLN + \left[(60 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (20 \times 7.7397 \times (DE_{13})^{0.4318}) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 0.05865 \times (DE_1)^{1.31049}) + (1 \times 0.07516 \times (DE_2)^{1.38799}) + (1 \times 0.05052 \times (DE_3)^{1.10782}) + (1 \times 0.02409 \times (DE_4)^{1.48994}) + (2 \times 0.18037 \times (DE_5)^{1.17718}) + (2 \times 0.40290 \times (DE_6)^{0.51938}) + (1 \times 0.00537 \times (DE_7)^{2.30844}) + (1 \times 0.42327 \times (DE_8)^{1.02397}) + (1 \times 46.70) + (1 \times 0.00599 \times (DE_9)^{1.56623}) + (1 \times 0.01714 \times (DE_{10})^{1.98169}) \right] + \left[(1 \times 0.12978039 \times POT_{19}) + (1 \times 32.6907 \times (POT_{17})^{0.3161}) + (1 \times 12.4113 \times (POT_{18})^{0.4460}) \right]$$

Tabela 4.4. Discriminação e quantificação dos equipamentos na quarta combinação de espaçamentos entre aspersores - CE4.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 18 m	ENTRE LATERAIS = 18 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA PRINCIPAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	60
→ VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	20
→ CAP MACHO EMS	1
→ VÁLVULA DE PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	1
→ MANGOTE - 10 m	1
→ NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	1
→ NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	1
→ BRAÇADEIRA para mangote	2
→ REDUÇÃO EXCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ AMPLIAÇÃO CONCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ REGISTRO DE GAVETA em bronze	1
→ CURVA FLANGEADA DE 90 GRAUS com bujão de escorva e rosca	1
→ MANÔMETRO DE BOURDON com glicerina	1
→ INICIAL FÊMEA com rosca gás	1
→ VÁLVULA DE RETENÇÃO com by pass e engate rápido	1

Tabela 4.4. (contin.). Discriminação e quantificação dos equipamentos na CE4.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 18 m	ENTRE LATERAIS = 18 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA LATERAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 m	6
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	12
→ ASPERSOR A-1823 FABRIMAR	6
→ VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor 1"	6
→ SUBIDA para aspersor 1" x 1 m	6
→ CAP MACHO EMS	1
→ CURVA DE DERIVAÇÃO EMS	1
→ CURVA DE NIVELAMENTO EMS	1
<u>COMPONENTES ELÉTRICOS</u>	
→ MOTOBOMBA KSB BLOC	1
→ CHAVE DE PARTIDA COMPENSADORA	1
→ TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	1

Com isso, o preço estimado dos equipamentos para cada configuração do sistema nesta combinação de espaçamentos entre aspersores é definido pela expressão apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}
 PE (18 \times 18) = & \left[6.PEQ_{12} + 12.PEQ_{11} + 6.PEQ_{20} + \right. \\
 & 6.PEQ_{23} + 6.PEQ_{22} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_{14} + 1.PEQ_{15} \left. \right] .NLLN + \\
 & \left[60.PEQ_{11} + 20.PEQ_{13} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_1 + 1.PEQ_2 + 1.PEQ_3 + \right. \\
 & 1.PEQ_4 + 2.PEQ_5 + 2.PEQ_6 + 1.PEQ_7 + 1.PEQ_8 + 1.PEQ_{21} + \\
 & 1.PEQ_9 + 1.PEQ_{10} \left. \right] + \left[1.PEQ_{19} + 1.PEQ_{17} + 1.PEQ_{18} \right]
 \end{aligned}$$

Substituindo os PEQ_{ij} pelas respectivas funções de preço estimado ($m.DEQ^{ni}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
 PE (18 \times 18) = & \left[(6 \times 0.09772 \times \right. \\
 & (DE_{12})^{1.14791}) + (12 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (6 \times 7.92) \\
 & + (6 \times 5.83) + (6 \times 4.83) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \\
 & \times 8.3993 \times (DE_{14})^{0.1818}) + (1 \times 0.8214 \times (DE_{15})^{0.7903}) \left. \right] \times \\
 & NLLN + \left[(60 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (20 \times 7.7397 \times \right. \\
 & (DE_{13})^{0.4348}) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 0.05865 \times \\
 & (DE_1)^{1.31049}) + (1 \times 0.07516 \times (DE_2)^{1.38799}) + (1 \times 0.05052 \\
 & \times (DE_3)^{1.10782}) + (1 \times 0.02409 \times (DE_4)^{1.48994}) + (2 \times \\
 & 0.18037 \times (DE_5)^{1.17718}) + (2 \times 0.40290 \times (DE_6)^{0.51938}) + (1 \\
 & \times 0.00537 \times (DE_7)^{2.30844}) + (1 \times 0.42327 \times (DE_8)^{1.02397}) + \\
 & (1 \times 46.70) + (1 \times 0.00599 \times (DE_9)^{1.56623}) + (1 \times 0.01714 \times \\
 & (DE_{10})^{1.98169}) \left. \right] + \left[(1 \times 0.12978039 \times POT_{19}) + (1 \times 32.6907 \right. \\
 & \times (POT_{17})^{0.3161}) + (1 \times 12.4113 \times (POT_{18})^{0.4460}) \left. \right]
 \end{aligned}$$

Tabela 4.5. Discriminação e quantificação dos equipamentos na quinta combinação de espaçamentos entre aspersores - CEs.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERSORES	
NA LATERAL = 18 m	ENTRE LATERAIS = 24 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA PRINCIPAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	60
→ VÁLVULA DE LINHA EMS com haste de latão	15
→ CAP MACHO EMS	1
→ VÁLVULA DE PÉ em ferro fundido com vedação de borracha	1
→ MANGOTE - 10 m	1
→ NIPLE em ferro fundido com rosca e ranhuras para mangueira	1
→ NIPLE FLANGEADO em ferro fundido com ranhuras para mangueira	1
→ BRAÇADEIRA para mangote	2
→ REDUÇÃO EXCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ AMPLIAÇÃO CONCÊNTRICA FLANGEADA	1
→ REGISTRO DE GAVETA em bronze	1
→ CURVA FLANGEADA DE 90 GRAUS com bujão de escorva e rosca	1
→ MANÔMETRO DE BOURDON com glicerina	1
→ INICIAL FÊMEA com rosca gás	1
→ VÁLVULA DE RETENÇÃO com by pass e engate rápido	1

Tabela 4.5. (contin.). Discriminação e quantificação dos equipamentos na CE.

ESPAÇAMENTO ENTRE ASPERORES	
NA LATERAL = 18 m	ENTRE LATERAIS = 24 m
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
<u>LINHA LATERAL</u>	
→ TUBO IRRIGA EMS com saída para aspersor - 6 m	6
→ TUBO IRRIGA EMS - 6 m	12
→ ASPERSOR A-1823 FABRIMAR	6
→ VÁLVULA AUTOMÁTICA para aspersor 1"	6
→ SUBIDA para aspersor 1" x 1 m	6
→ CAP MACHO EMS	1
→ CURVA DE DERIVAÇÃO EMS	1
→ CURVA DE NIVELAMENTO EMS	1
<u>COMPONENTES ELÉTRICOS</u>	
→ MOTOBOMBA KSB BLOC	1
→ CHAVE DE PARTIDA COMPENSADORA	1
→ TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	1

Com isso, o preço estimado dos equipamentos para cada configuração do sistema nesta combinação de espaçamentos entre aspersores é definido pela expressão apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}
 PE (18 \times 24) = & \left[6.PEQ_{12} + 12.PEQ_{11} + 6.PEQ_{20} + \right. \\
 & 6.PEQ_{23} + 6.PEQ_{22} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_{14} + 1.PEQ_{15} \left. \right] .NLLN + \\
 & \left[60.PEQ_{11} + 15.PEQ_{13} + 1.PEQ_{16} + 1.PEQ_1 + 1.PEQ_2 + 1.PEQ_3 + \right. \\
 & 1.PEQ_4 + 2.PEQ_5 + 2.PEQ_6 + 1.PEQ_7 + 1.PEQ_8 + 1.PEQ_{21} + \\
 & 1.PEQ_9 + 1.PEQ_{10} \left. \right] + \left[1.PEQ_{19} + 1.PEQ_{17} + 1.PEQ_{18} \right]
 \end{aligned}$$

Substituindo os PEQ_{ij} pelas respectivas funções de preço estimado ($mi.DEQ^{ni}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
 PE (18 \times 24) = & \left[(6 \times 0.09772 \times \right. \\
 & (DE_{12})^{1.14731}) + (12 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (6 \times 7.92) \\
 & + (6 \times 5.83) + (6 \times 4.83) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \\
 & \times 8.3993 \times (DE_{14})^{0.1818}) + (1 \times 0.8214 \times (DE_{15})^{0.7903}) \left. \right] \times \\
 & NLLN + \left[(60 \times 0.15195 \times (DE_{11})^{1.27501}) + (15 \times 7.7397 \times \right. \\
 & (DE_{13})^{0.4318}) + (1 \times 0.2356 \times (DE_{16})^{0.9848}) + (1 \times 0.05865 \times \\
 & (DE_1)^{1.31049}) + (1 \times 0.07516 \times (DE_2)^{1.38799}) + (1 \times 0.05052 \\
 & \times (DE_3)^{1.10782}) + (1 \times 0.02409 \times (DE_4)^{1.48994}) + (2 \times \\
 & 0.18037 \times (DE_5)^{1.17718}) + (2 \times 0.40290 \times (DE_6)^{0.51938}) + (1 \\
 & \times 0.00537 \times (DE_7)^{2.30844}) + (1 \times 0.42327 \times (DE_8)^{1.02397}) + \\
 & (1 \times 46.70) + (1 \times 0.00599 \times (DE_9)^{1.56623}) + (1 \times 0.01714 \times \\
 & (DE_{10})^{1.98169}) \left. \right] + \left[(1 \times 0.12978039 \times POT_{19}) + (1 \times 32.6907 \right. \\
 & \times (POT_{17})^{0.3161}) + (1 \times 12.4113 \times (POT_{18})^{0.4460}) \left. \right]
 \end{aligned}$$

APÊNDICE 5
VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS
DO CUC E CAT

Tabela 5.1. Valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen observados em testes de campo (CUCo) versus os estimados pelo modelo (CUCe); e valores do custo anual total observados (determinados) pela aplicação da metodologia (CATo) versus os estimados pelo modelo (CATE).

ESPAÇAMENTO			DB	PS	CUCo	CUCe	CATo	CATE
E1	E2	CE						
(m)	(m)		(mm)	(mca)	(%)	(%)	(US\$/ha.A)	(US\$/ha.A)
6	12	1	3.2	20	90.0	90.0	240.28	237.20
6	12	1	3.2	30	94.7	93.4	253.19	252.66
6	12	1	3.2	40	96.8	93.3	270.84	270.98
6	12	1	3.2	50	97.2	89.7	290.66	292.16
6	12	1	4.0	20	89.3	90.4	236.45	233.93
6	12	1	4.0	30	93.2	95.4	250.93	249.89
6	12	1	4.0	40	92.5	97.0	269.42	268.71
6	12	1	4.0	50	92.2	95.1	289.82	290.38
6	12	1	5.0	20	91.2	87.4	234.78	232.04
6	12	1	5.0	30	93.0	94.4	250.62	248.61
6	12	1	5.0	40	95.0	98.1	269.96	268.05
6	12	1	5.0	50	95.2	98.2	290.94	290.34
6	12	1	6.2	20	87.3	78.5	235.80	232.96
6	12	1	6.2	30	92.2	88.0	252.78	250.28
6	12	1	6.2	40	93.6	94.1	272.75	270.46
6	12	1	6.2	50	97.4	96.8	294.02	293.49
12	12	2	3.2	20	82.9	84.9	255.62	249.38
12	12	2	3.2	30	93.6	87.2	264.33	262.50
12	12	2	3.2	40	93.2	86.1	279.55	278.48
12	12	2	3.2	50	92.6	81.4	297.69	297.31
12	12	2	4.0	20	76.2	88.1	247.77	244.77
12	12	2	4.0	30	90.6	92.1	258.63	258.38
12	12	2	4.0	40	91.6	92.6	274.93	274.85
12	12	2	4.0	50	89.9	89.6	293.89	294.18
12	12	2	5.0	20	87.2	88.6	241.60	241.19
12	12	2	5.0	30	90.3	94.6	254.30	255.42
12	12	2	5.0	40	94.4	97.2	271.65	272.51
12	12	2	5.0	50	94.1	96.3	291.30	292.45
12	12	2	6.2	20	83.7	83.9	238.08	240.09
12	12	2	6.2	30	90.0	92.4	252.21	255.06
12	12	2	6.2	40	93.1	97.5	270.50	272.89
12	12	2	6.2	50	96.5	99.0	290.73	293.58

Tabela 5.1. (contin.). Valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen observados em testes de campo (CUCo) versus os estimados pelo modelo (CUCe); e valores do custo anual total observados (determinados) pela aplicação da metodologia (CATo) versus os estimados pelo modelo (CATE).

ESPAÇAMENTO			DB	PS	CUCo	CUCe	CATo	CATE
E1	E2	CE						
(m)	(m)		(mm)	(mca)	(%)	(%)	(US\$/ha.A)	(US\$/ha.A)
12	18	3	3.2	20	68.9	74.5	-	245.54
12	18	3	3.2	30	72.9	75.8	-	256.31
12	18	3	3.2	40	63.6	73.6	261.01	269.94
12	18	3	3.2	50	61.1	67.9	279.28	286.43
12	18	3	4.0	20	75.3	80.5	228.72	239.57
12	18	3	4.0	30	86.0	83.4	239.84	250.84
12	18	3	4.0	40	76.9	82.9	256.32	264.97
12	18	3	4.0	50	70.2	78.8	275.41	281.95
12	18	3	5.0	20	87.2	84.5	222.47	234.31
12	18	3	5.0	30	93.6	89.5	235.43	246.19
12	18	3	5.0	40	89.9	91.0	252.95	260.94
12	18	3	5.0	50	92.2	89.0	272.71	278.54
12	18	3	6.2	20	86.8	84.0	218.85	231.19
12	18	3	6.2	30	93.0	91.5	233.22	243.82
12	18	3	6.2	40	95.0	95.5	251.66	259.30
12	18	3	6.2	50	94.9	96.0	272.01	277.65
18	18	4	3.2	20	63.4	58.8	-	225.66
18	18	4	3.2	30	66.3	59.0	-	234.09
18	18	4	3.2	40	53.8	55.7	-	245.38
18	18	4	3.2	50	52.4	49.0	-	259.53
18	18	4	4.0	20	67.8	67.6	-	218.35
18	18	4	4.0	30	81.4	69.5	-	227.28
18	18	4	4.0	40	69.8	67.9	258.00	239.06
18	18	4	4.0	50	60.5	62.8	276.36	253.70
18	18	4	5.0	20	76.3	75.1	-	211.40
18	18	4	5.0	30	87.3	79.0	235.91	220.94
18	18	4	5.0	40	85.9	79.5	252.44	233.34
18	18	4	5.0	50	87.6	76.4	271.56	248.60
18	18	4	6.2	20	73.5	78.8	218.31	206.26
18	18	4	6.2	30	85.8	85.2	231.32	216.54
18	18	4	6.2	40	89.2	88.2	248.99	229.68
18	18	4	6.2	50	91.9	87.6	268.88	245.68

Tabela 5.1. (contin.). Valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen observados em testes de campo (CUCo) versus os estimados pelo modelo (CUCe); e valores do custo anual total observados (determinados) pela aplicação da metodologia (CATo) versus os estimados pelo modelo (CATE).

ESPAÇAMENTO			DB	PS	CUCo	CUCe	CATo	CATE
E1	E2	CE						
(m)	(m)		(mm)	(mca)	(%)	(%)	(US\$/ha.A)	(US\$/ha.A)
18	24	5	3.2	20	39.2	37.8	-	189.76
18	24	5	3.2	30	35.9	36.9	-	195.85
18	24	5	3.2	40	25.4	32.6	-	204.79
18	24	5	3.2	50	24.6	24.8	-	216.59
18	24	5	4.0	20	51.6	49.4	-	181.10
18	24	5	4.0	30	54.5	50.2	-	187.68
18	24	5	4.0	40	40.6	47.5	-	197.12
18	24	5	4.0	50	33.2	41.4	-	209.42
18	24	5	5.0	20	63.1	60.4	-	172.46
18	24	5	5.0	30	65.2	63.2	-	179.66
18	24	5	5.0	40	60.3	62.6	176.35	189.72
18	24	5	5.0	50	66.2	58.6	181.65	202.63
18	24	5	6.2	20	59.1	68.3	170.26	165.30
18	24	5	6.2	30	70.5	73.7	169.24	173.24
18	24	5	6.2	40	72.2	75.6	173.02	184.04
18	24	5	6.2	50	74.3	74.0	179.08	197.69

E1 - distância entre aspersores na linha lateral (m);

E2 - distância entre aspersores entre linhas laterais (m);

CE - combinação de espaçamentos entre aspersores (E1 x E2);

DB - diâmetros dos bocais (mm);

PS - pressão de serviço dos aspersores (mca);

CUCo - coeficiente de uniformidade de Christiansen observado em testes de campo (%);

CUCe - coeficiente de uniformidade de Christiansen estimado pelo modelo ajustado (%);

CATo - custo anual total observado (determinado) de um hectare irrigado ($\text{US}\$. \text{ha}^{-1} . \text{A}^{-1}$);

CATE - custo anual total estimado pelo modelo ajustado de um hectare irrigado ($\text{US}\$. \text{ha}^{-1} . \text{A}^{-1}$);