DESEMPENHO HIDRÁULICO DE UM PIVÔ CENTRAL DE BAIXA PRESSÃO
EM TERRENO COM TOPOGRAFIA VARIÁVEL

CLAUDIO TOMAZELA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

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

PIRACICABA

Estado de São Paulo

Março-1991

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

Tomazela, Claudio

T665d Desempenho hidráulico de um pivô central de baixa
pressão em terreno com topografia variável. Piracic
caba, 1991.

98p. ilustr.

Diss. (Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Irrigação - Equipamento - Ensaio 2. Irrigação -
Equipamento - Desempenho hidráulico 3. Pivô central -
Desempenho hidráulico 4. Terreno - Topografia. I. Es-
cola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piraci-
caba

CDD 631.7

**DESEMPENHO HIDRÁULICO DE UM PIVÔ CENTRAL DE BAIXA PRESSÃO
EM TERRENO COM TOPOGRAFIA VARIÁVEL**

CLAUDIO TOMAZELA

Aprovada em: 11.04.1991

Comissão julgadora:

Prof. Dr. José Antonio Frizzone

ESALQ/USP

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel

ESALQ/USP

Prof. Dr. Manoel Alves de Faria

ESAL/MG

Prof. Dr. José Antonio Frizzone
Orientador

Dedico:

À minha esposa Miriam, pelo amor, carinho,
paciência e incentivo à realização do curso.

Ofereço:

A meus pais Ivo e Leticia

A meus sogros Francisco e Conceição

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pela orientação, apoio, amizade e dedicação.
- Ao Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta, pelo apoio e pela coordenação do curso.
- À CAPES (Coordenadoria de Bolsas No País), pela concessão da bolsa de estudos para a realização do curso.
- A todos os Profs. do Departamento de Engenharia Rural, pelo apoio, consideração e respeito.
- Aos amigos pesquisadores Eng. Agrônomo Alberto Colombo e Eng. Agrícola Sérgio Prates Zaggo, do Centro Nacional de Engenharia Agrícola, pela inestimável ajuda nos trabalhos de campo, apoio e sugestões oferecidas.
- Ao amigo Eng. Agrônomo Moacyr Machado Cardoso Jr., pela ajuda na elaboração dos gráficos.
- Ao amigo Técnico em Eletrotécnica João S. Storer, pelo auxílio na parte experimental da dissertação.
- Ao Prof. Dr. Rodolfo Hoffmann, do Departamento de Economia Agrícola (ESALQ-USP), pela ajuda na análise estatística.
- À família Vaughan, em especial a D. Vina, pelo carinho, amizade, paciência e auxílio prestados e aos irmãos Joseph Addison e Leroy King, pelo empréstimo do sistema de irrigação, o qual permitiu a realização deste trabalho, além da ajuda na parte experimental.

Ao prof. Alfredo A. Eluf e estagiários da Topografia, pelo auxílio na execução do levantamento planialtimétrico da área.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial ao Srs. Hélio de Toledo Gomes e José Figueiredo, pela ajuda no preparo do material de ensaio.

Ao funcionário Jesuino Ferrari, pelo auxílio na elaboração da planta planialtimétrica e outros gráficos.

Aos amigos Profs. Hilton Silveira Pinto e Paulo Mazzafera, CEPAGRI e Inst. de Biologia (UNICAMP), pelo apoio e incentivo à realização do curso.

Aos amigos e colegas do curso de mestrado, em especial a Antonio M. Saad, F. Reinaldo Consiglierio e Roberto A. Boza Arce, pela amizade e sinceridade demonstrados.

Aos amigos das empresas Asbrasil, Carborundum e Fabrimar, pelo incentivo à realização do curso.

Às bibliotecárias Eliana M. Garcia Sabino e Kátia M. de Andrade Ferraz, da Seção de Referências-Divisão de Biblioteca e Documentação da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, pelo auxílio na revisão das citações bibliográficas.

Aos tantos outros amigos não citados aqui por falta de espaço, pela amizade, consideração e apoio prestados.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente tomaram parte nesta dissertação de mestrado, dando sugestões e idéias.

3.3. Caracterização do sistema.....	33
3.4. Caracterização do ensaio.....	36
3.4.1. Levantamento planialtimétrico da área irrigada.....	36
3.4.2. Escolha das posições de ensaio.....	36
3.4.3. Determinação da curvatura dos vãos.....	39
3.4.4. Determinação das cotas do terreno em cada radial.....	40
3.4.5. Instalação das tomadas de pressão.....	40
3.4.5.1. Lateral do pivô.....	40
3.4.5.2. Ponto do pivô.....	41
3.4.5.3. Unidade de bombeamento.....	42
3.5. Realização do ensaio.....	42
3.5.1. Determinação da vazão.....	42
3.5.2. Determinação da perda de carga nos vãos ao longo do pivô.....	48
3.5.3. Determinação da perda de carga na adutora do pivô.....	50
3.5.4. Determinação da pressão.....	51
3.5.4.1. Lateral do pivô central.....	51
3.5.5. Determinação do comprimento equivalente....	53
3.5.5.1. Adutora e sucção.....	53
3.5.6. Determinação do coeficiente de perda de carga.....	55
3.5.6.1. Pivô central.....	55

3.5.6.2. Adutora.....	57
3.5.7. Determinação da altura manométrica total da bomba.....	58
3.6. Uso do programa de simulação de pressão em pivô central.....	59
3.7. Pressões máximas, médias e mínimas na lateral do pivô central.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1. Determinação da vazão.....	63
4.2. Ensaio de perda de carga na lateral do pivô central.....	65
4.3. Ensaio de pressão no pivô central.....	68
4.4. Ajuste dos dados de pressão nas posições de ensaio.....	74
4.5. Coeficiente de perda de carga.....	82
4.6. Altura manométrica total.....	86
4.7. Pressões máxima, média e mínima na lateral do pivô central.....	89
5. CONCLUSÕES.....	92
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Curva de desempenho do regulador de pressão, usado no pivô central (ZAGGO et alii,1990).....	35
2 Planta planialtimétrica da área irrigada pelo sistema pivô central, com as posições do ensaio de pressão.....	37
3 Perfil topográfico das posições 1 a 6 do ensaio de pressão.....	38
4 Coluna de líquido indicador, com reservatório.....	43
5 Seção transversal da tubulação do pivô central, para determinação das velocidades da água.....	45
6 Tubo de pitot instalado no pivô central para determinação das velocidades da água.....	46
7 Diagrama esquemático dos principais passos do programa de simulação de desempenho hidráulico em pivô central.....	61
8 Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 1 do ensaio.....	69
9 Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 2 do ensaio.....	69
10 Distribuição de pressão na lateral do pivô	

Figura

Página

	central, na posição 3 do ensaio.....	70
11	Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 4 do ensaio.....	70
12	Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 5 do ensaio.....	71
13	Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 6 do ensaio.....	71
14	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 1 do ensaio.....	75
15	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 2 do ensaio.....	75
16	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 3 do ensaio.....	76
17	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 4 do ensaio.....	76
18	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 5 do ensaio.....	77
19	Curvas ajustadas da distribuição de pressão, na posição 6 do ensaio.....	77
20	Curvas ajustadas de vazão versus pressão, da bomba WKL 100/4.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Características do sistema pivô central e da tubulação adutora, obtidos em projeto.....	34
2 Características da unidade de bombeamento.....	35
3 Dados referentes à topografia do terreno ao longo da lateral do pivô central, nas posições de ensaio de pressão.....	39
4 Cotas (metros) do terreno, em cada torre, para as seis posições de ensaio escolhidas.....	40
5 Vazões do pivô central (m^3/h), determinadas no campo.....	64
6 Dados de perda de carga na lateral do pivô.....	66
7 Resultados do ajuste polinomial de grau 2 das curvas de distribuição de pressão.....	78
8 Pressões obtidas durante os ensaios de campo.....	80
9 Pressões obtidas durante as determinações de vazão.....	81
10 Diferenças de pressão nos diferentes trechos entre tomadas.....	82
11 Coeficiente de perda de carga na lateral do pivô central.....	84

Tabela

Página

12	Coeficiente de perda de carga na adutora do pivô central.....	84
13	Altura manométrica total da bomba.....	87
16	Valores de pressão ao longo do pivô central.....	89

**DESEMPENHO HIDRÁULICO DE UM PIVÔ CENTRAL DE BAIXA PRESSÃO
EM TERRENO COM TOPOGRAFIA VARIÁVEL**

Autor: CLAUDIO TOMAZELA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

Com o objetivo de caracterizar o desempenho hidráulico de um sistema pivô central de irrigação, operando em terreno com topografia variável ao longo de sua lateral, foi realizado um ensaio de campo no Município de Sumaré-SP, em um sistema de baixa pressão, composto de 8 torres de sustentação e um lance em final de 25 metros, totalizando 406,89 metros de comprimento, cobrindo uma área de 52,04 hectares num período mínimo de 20 horas.

Para a realização do ensaio, foi efetuado o levantamento topográfico da área e escolhidas seis posições de ensaio de pressão onde foram determinados:

- vazões do sistema em oito diferentes situações no campo.
- perda de carga nos vãos da lateral do pivô.
- perda de carga na tubulação adutora do sistema, a partir das pressões no ponto do pivô e unidade de bombeamento.
- coeficiente de perda de carga da equação de

Hazen-Williams, a partir de dados de perda de carga obtidos no primeiro vão entre os tubos lisos e tubos com as juntas de borracha.

- coeficiente de perda de carga da equação de Hazen-Williams ao longo da lateral, com o uso do fator "F" de múltiplas saídas.
- coeficiente de perda de carga da equação de Hazen-Williams na tubulação adutora do sistema.
- alturas manométricas totais, com os dados de pressão na bomba e perda de carga na adutora e conjunto de sucção.
- pressões ao longo da lateral do pivô central, em seis posições da área irrigada, com uso de manômetro de Bourdon.
- distribuição de pressão na lateral do sistema, com uso de programa de simulação, nas seis posições de ensaio e comparação com os dados de campo.

Além disso, foi observado que o sistema pivô central apresentou pressões maiores que a necessária em sua extremidade final, mesmo nas posições em que a lateral se encontrava em aclave em relação ao ponto do pivô.

Os coeficientes de perda de carga da equação de Hazen-Williams, na lateral do pivô e na tubulação adutora, apresentaram valores menores que os de projeto, indicando que para este sistema estudado, as perdas de carga foram maiores.

HYDRAULIC PERFORMANCE OF A LOW PRESSURE CENTER PIVOT SYSTEM OPERATING ON VARIABLE TOPOGRAPHY

Autor: CLAUDIO TOMAZELA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

The objective of the experiment was to characterize the hydraulic performance of a low pressure center pivot irrigation system. It was an eight tower system with a total lenght of 406.89 m and its lateral line had an internal diameter of 163 mm, and operated on a variable topographic land, located in Sumaré (SP), Brazil.

The lateral line had 163 spray emitters not uniformly spaced and without end gun sprinkler. It is able to irrigate 52.04 hectares in a complete revolution during a period of 20 hours at least, with the maximun speed rotation.

A planialtimetric map of the area was made and 6 test sites was chosen in the field, in wich the following were determined:

- the flowrate of the system in 8 different field conditions.
- the pressure head loss at each span of the system in two

field test sites.

- pressure head loss in the mainline of the system.
- pressure head loss coefficient of Hazen-Williams' equation in the first span of the system in smooth tubes and tubes with couplers.
- pressure head loss coefficient of Hazen-Williams' equation along the lateral line using the multiple "F" factor.
- pressure head loss coefficient of Hazen-Williams' equation in the mainline of the system.
- total pump elevation considering pivot pressure, pump pressure and the mainline head loss.
- pressure distribution along the lateral line in 6 test sites of the irrigated area with Bourdon gauge.
- pressure distribution along lateral line for the same 6 test sites, using a pressure distribution simulation program.

Besides that, it was found that the system is over designed with excessive pressure at the end of the lateral line, even on an upward slope.

The head loss coefficient of Hazen-Williams' equation, in both the lateral line and main one, presents low values when compared with the designed values, indicating more head loss than expected.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação tipo pivô central pertencem aos chamados sistemas mecanizados automatizados de irrigação por aspersão, desenvolvido na década de 40, nos Estados Unidos da América (ROLLAND, 1982), e introduzido no Brasil no final da década de 70, tendo sua utilização se expandido rapidamente nos últimos anos, despertando grande interesse nas Universidades, nos Institutos de Pesquisa e em órgãos de extensão rural, além de técnicos em geral e pesquisadores autônomos, quanto a um melhor entendimento do seu mecanismo de irrigação.

Muita ênfase tem sido dada a estes sistemas em eventos técnicos e científicos na área de irrigação, buscando-se obter explicações sobre como conduzir culturas no que se refere a preparo do solo, controle de pragas e doenças, aplicação de fertilizantes e defensivos, além da especial atenção ao manejo de tais sistemas quanto a distribuição de água, observando-se a movimentação e retenção da água nos solos sob seu domínio de cobertura. Ao mesmo tempo que isto ocorre, percebe-se um grande desconhecimento de sua parte funcional quer seja estrutural

ou operacional.

Várias empresas tem procurado desenvolver diferentes modelos de pivô central, com capacidade para irrigar áreas que cobrem desde poucos hectares (10 a 12), até equipamentos que irrigam de 130 a 160 hectares numa revolução completa.

Nota-se também um grande distanciamento entre o produtor rural (consumidor), os fabricantes do sistema e as instituições de pesquisa, talvez em função de serem tais equipamentos oriundos de tecnologias importadas e já acabadas. Mas mesmo assim, existe a necessidade de se conhecer melhor o que vem a ser o pivô central e como ele realmente funciona, tanto no aspecto estrutural quanto operacional, para que se possa tomar qualquer decisão em termos de seu manejo.

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho hidráulico de um sistema de irrigação pivô central de baixa pressão, operando em condições de topografia variável, para verificar seu comportamento em várias posições do terreno com diferentes declividades ao longo da linha lateral.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Componentes do sistema pivô central

O sistema pivô central consiste de uma linha lateral com emissores montados em estruturas sobre rodas, denominadas torres. Ao conjunto de torres e tubulações, denomina-se vãos, os quais apresentam comprimentos variados, dependendo do modelo usado e do fabricante. Vãos adjacentes são unidos por juntas flexíveis, as quais permitem a movimentação do sistema na área irrigada.

A linha lateral apresenta uma de suas extremidades livre, na qual pode ser instalado aspersor canhão. A outra extremidade é fixada numa torre principal denominada ponto do pivô ou simplesmente pivô, alimentada por uma tubulação vertical em relação a qual ela gira, visando cobrir toda a área a ser irrigada.

A água é bombeada a partir da fonte de captação e através de uma tubulação atinge a lateral, onde é distribuída pelos emissores às culturas.

A distribuição dos emissores segue basicamente três configurações principais, podendo ocorrer tipos intermediários (PAIR, 1975; ROLLAND, 1982).

- aspersores de mesmo tipo, com redução no espaçamento a partir do ponto do pivô em direção ao final da lateral.
- aspersores de diferentes tipos (ou de mesmo tipo com diferentes diâmetros de bocais), com espaçamento constante.
- bocais tipo "sprays", instalados com espaçamento constante.

A unidade de bombeamento é responsável pelo fornecimento de água na quantidade certa e à pressões desejadas para superar as perdas de carga que ocorrem na tubulação e acessórios (válvulas, registros e demais peças) e a diferença de topografia até os pontos de interesse na irrigação, além de fornecer pressão aos emissores, para que operem satisfatoriamente.

2.2. Hidráulica do sistema

No Brasil, devido a dificuldade, e em muitos casos, a impossibilidade de se obter água para irrigação a partir de poços artesianos, torna-se necessário a instalação de tubulações de recalque (adutoras), desde a captação da água (rios, açudes, poços) até a lateral do pivô central.

2.2.1. Linha principal

2.2.1.1 Determinação da perda de carga (hf)

As perdas de pressão na linha principal, devido ao atrito com as paredes do tubo e a viscosidade da água, podem ser determinadas por métodos de escoamento uniforme (HEERMANN & KOHL, 1983).

O dimensionamento da linha principal se faz em bases econômicas e/ou quanto a quantidade de perda de energia admissível. A seleção do diâmetro pode ser baseada nos custos fixos anuais da tubulação considerada, juntamente com os custos anuais de bombeamento, que satisfaçam as perdas de carga para os diferentes diâmetros de tubulação analisados (PAIR, 1975).

As perdas de energia em tubulações podem ser determinadas pelo uso de diferentes fórmulas (racionais ou praticas), especificadas para esse fim. AZEVEDO NETO, (1977) cita a fórmula de Darcy-Weissbach ou fórmula universal. Neste caso há a necessidade da determinação do coeficiente de atrito (f), o qual é função do número de Reynolds (Nr) e da rugosidade relativa (ϵ/D), onde ϵ é a rugosidade absoluta e D é o diâmetro da tubulação.

O coeficiente f depende portanto do regime de escoamento da tubulação e sua determinação pode ser feita pelas fórmulas de Von Karman, Nikuradse e Coolebrook,

dependendo do regime de escoamento (laminar ou turbulento) e da rugosidade da parede da tubulação. Pode também ser obtido diretamente do diagrama de Rouse-Moody, elaborado a partir da equação de Coolebrook (SWAMEE & JAIN, 1976).

As fórmulas racionais para cálculo das perdas de energia, nos regimes laminar e turbulento, podem ser generalizadas para qualquer fluido e para qualquer tipo de conduto. Entretanto são pouco usadas, devido a necessidade do controle de fatores como temperatura e ação química e mecânica do fluido sobre a parede da tubulação, além da dificuldade na obtenção de dados reais sobre os valores do coeficiente de atrito f (NEVES, 1977).

Para evitar o uso de fórmulas com coeficiente que inclui mais de uma variável, de difícil obtenção, recorre-se ao uso de fórmulas práticas derivadas da expressão fundamental e que apresentam resultados satisfatórios. Inúmeras fórmulas práticas foram propostas para o problema do escoamento de água e outros fluidos em canalizações. Segundo AZEVEDO NETO (1977), tais fórmulas são empíricas e resultantes de observações, sendo aplicadas satisfatoriamente apenas nos limites que compreendem os dados das próprias observações ou experiências. A equação de Hazen-Williams é uma expressão prática para calcular a perda de carga em canalizações constituídas de qualquer material e para diâmetros entre 50 e 3500 mm. Em unidades métricas pode ser escrita como:

$$J = 10,65 \cdot \frac{1}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \dots\dots\dots (1)$$

onde,

J = perda de carga unitária, em mca/m

Q = vazão (descarga), em m³/s

D = diâmetro da tubulação, em m

C = coef. de perda de carga, dependente do tipo de material e do seu tempo de uso.

NEVES (1977), cita valores de C para diversos materiais, tais como cimento amianto onde C vale 140 a 145; cimento amianto com muitos anos de uso, onde C é igual a 130; condutos lisos (aço soldado) com C igual a 120; condutos de chapas de aço soldadas com C de 115 e condutos novos de aço rebitado onde C vale 110. Este autor relata sobre a vantagem da fórmula de Hazen-Williams ser aplicável a condutos de diversos materiais em diferentes condições, permitindo a fácil comparação e adaptação dos resultados obtidos com os diversos valores de C.

Por outro lado, ASSY (1977) especifica que em redes hidráulicas, formadas de condutos de diferentes diâmetros, ainda que de mesmo material e de mesmo revestimento interno, é observado uma imprecisão da fórmula de Hazen-Williams, pois há uma variação no coeficiente C. Este coeficiente é um número variável com a rugosidade do

conduto, com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds (Nr). Também segundo este autor, valores de $C=158$ e $Nr > 5 \times 10^5$, se ajustam bem aos condutos hidráulicamente lisos. Para C entre 110 e 140, em condutos de pequena rugosidade relativa e escoamento com baixo Nr , o ajuste se faz aproximadamente na zona de transição. Para $C=110$ e para condutos hidráulicamente rugosos, a fórmula de Hazen-Williams não é adequada.

2.2.1.2. Determinação da perda de carga localizada

Nas canalizações, qualquer causa perturbadora, qualquer elemento ou dispositivo que venha estabelecer ou elevar a turbulência, mudar a direção ou alterar a velocidade do fluido, é responsável por uma perda de energia. Na prática, as canalizações se constituem de tubos retilíneos, peças especiais e conexões, as quais elevam a turbulência, provocam atritos e causam choques entre partículas, originando a perda de carga. Há também válvulas, registros e outras peças, responsáveis por perdas dessa natureza. Tais perdas são denominadas de locais, acidentais, singulares ou localizadas e podem ser determinadas através de uma expressão geral (PAIR, 1975).

$$h_f = K \cdot \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$$

onde,

V = velocidade do fluido, em m/s

g = aceleração da gravidade, em m/s²

k = coeficiente de perda de carga localizada

h_f = perda de carga, em metros de coluna de água.

O coeficiente k pode ser obtido experimentalmente para cada caso, e é praticamente constante para determinada peça, desde que o escoamento seja turbulento, independentemente do diâmetro da tubulação e da velocidade e natureza do líquido (AZEVEDO NETO, 1977).

Há fórmulas práticas que podem ser usadas para a determinação das perdas de carga em tubulações, como as de Strickler que é idêntica a de Manning, que por sua vez é idêntica a de Gauckler, e pode ser escrita como:

$$V = K \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

onde,

J = perda de carga unitária, em mca/m

V = velocidade do líquido na canalização, em m/s

R = raio hidráulico da canalização, em m

k = rugosidade da parede do material.

A experiência tem demonstrado que a fórmula de Strickler (ou a de Manning) dá bons resultados tanto para canais quanto para condutos forçados (NEVES,1977).

Uma canalização que compreenda diversas peças especiais e outras singularidades, sob o aspecto de perdas de carga, equivale a um encanamento retilíneo de comprimento maior. Adiciona-se à extensão da canalização, para simples efeito de cálculo, comprimentos tais que correspondam à mesma perda de carga que causariam as peças especiais existentes na canalização (AZEVEDO NETO,1977). Este método é denominado comprimento virtual ou equivalente.

Assim, as perdas de carga ao longo das canalizações podem ser estimadas pela fórmula universal, ou por fórmulas práticas, como Hazen-Williams, Strickler-Manning e outras (LENCASTRE,1972).

2.2.2. Linha lateral

A perda de energia em laterais de aspersão pode ser determinada pela resolução do problema de ramificações da vazão do sistema. No caso de laterais de aspersão, a vazão total do sistema é liberada em intervalos constantes ao longo da lateral, e portanto a perda de carga para um dado diâmetro e comprimento da tubulação será menor que se a vazão fosse constante para todo o comprimento

(SCALOPPI,1988; PEROLD,1977; PAIR,1975).

Segundo CHU & MOE (1972), há dois parâmetros básicos de interesse no dimensionamento e avaliação de um sistema pivô central: primeiro, a perda total de pressão no sistema, a qual é essencial na determinação das necessidades de trabalho da unidade de bombeamento; e segundo, a distribuição da carga de pressão ao longo da linha lateral que é requerida para a seleção do emissor, a fim de fornecer adequada aplicação de água.

A perda de energia nas laterais dos sistemas de irrigação pivô central, as quais podem apresentar tanto diferentes tamanhos de emissores ou bocais, quanto diferentes espaçamentos entre emissores, não pode ser calculada usando os procedimentos normais. De acordo com SCALOPPI (1986), duas condições podem ser bem caracterizadas em tubulações contendo múltiplas derivações. Na primeira delas, as derivações são eqüidistantes e devem proporcionar uma vazão uniforme ao longo de seu comprimento, como o que ocorre com tubos janelados, linhas laterais de aspersores com deslocamento linear, e em irrigação localizada. Na segunda condição, a característica é a de apresentar vazão variável ao longo do comprimento da lateral. Neste caso, segundo este autor, a variação de vazão pode ser obtida em função da modificação do espaçamento entre as derivações, mantendo constante a seção de escoamento (diâmetro ou número de bocais) em cada

derivação ou, mantendo constante o espaçamento entre derivações e variando a seção de escoamento em cada uma delas, ou ambos (variando espaçamento e seção).

O estudo teórico de um pivô central permite a construção de um gráfico da curva de diminuição do fluxo ao longo da lateral, seguido pela curva de distribuição de pressão a partir do pivô em direção ao final da lateral (ROLLAND, 1982). Uma vez que a lateral do pivô gira em relação a um ponto central, a vazão de cada emissor para que a lateral como um todo aplique a mesma lâmina de água, aumenta a partir do ponto do pivô em direção à sua extremidade final. A pressão por sua vez no trecho inicial da lateral é maior que em seu final, o que não é desejado, uma vez que os emissores localizados no fim da lateral, por apresentarem normalmente maiores diâmetros e/ou número de bocais, requerem maiores pressões que no seu início (KINCAID & HEERMANN, 1970). Como resultado de baixas pressões, os maiores aspersores produzem gotas maiores podendo compactar o solo e reduzir sua taxa de infiltração.

Ainda, de acordo com KINCAID & HEERMANN (1970), para se manter adequadas pressões de serviço nos emissores maiores, a pressão no ponto pivô deve exceder a pressão final da lateral, por uma quantidade equivalente da perda de carga ao longo da lateral. Para uma dada pressão final, quanto maior a queda de pressão na lateral, maior a necessidade de bombeamento, e portanto maiores serão os

custos de operação.

De acordo com ROLLAND (1982), o método usado para selecionar a distribuição ótima dos emissores na lateral é como segue:

- a variação de pressão na tubulação equipada com emissores é assumida como sendo decrescente a partir do ponto do pivô em direção a seu final.

- conhecendo a distribuição de pressão na lateral e usando a curva vazão versus pressão dos emissores, escolhem-se os mesmos assumindo que a pressão na saída específica é a suposta pela distribuição de pressão e a vazão é a requerida.

- conhecendo a vazão dos emissores e a seção da tubulação entre eles, a relação linear entre as perdas de carga, a vazão na lateral e a pressão no pivô, pode-se calcular exatamente a pressão nos emissores e suas descargas, as quais podem diferir das pressões e vazões supostas.

O processo pode ser repetido até que resultados satisfatórios sejam obtidos em toda a lateral. Este é um procedimento tedioso e na verdade, deve-se fazer uso de computadores para facilidade, rapidez e precisão nos cálculos.

Vários estudos têm sido feitos para estimar o desempenho de sistemas de irrigação pivô central como um todo, comparando-os com dados de campo. HEERMANN & HEIN

(1968), utilizando expressões obtidas por BITTINGER & LONGENBAUGH (1962), desenvolveram um modelo para simular a lâmina aplicada por aspersores em movimento circular, com sobreposição, considerando perfis de distribuição triangular e elíptico e compararam os resultados com dados de campo. Notaram pequenas diferenças entre a lâmina calculada matematicamente e os resultados de campo. Para a simulação, foram efetuadas medições de pressão em todos os emissores dos sistemas instalados no campo, de forma a possibilitar o cálculo da vazão derivada em cada ponto, e do raio de alcance.

JAMES (1982), generalizou o modelo de HEERMANN & HEIN (1968) para considerar o padrão do aspersor individual simetricamente radial e aspersor com círculo parcial montado no final da lateral, e combinou com o modelo expandido de KINCAID & HEERMANN (1970), o qual passou a considerar a topografia variável do terreno, formando assim um novo modelo, usado para obter dados para avaliação do uso de energia e desempenho de sistema de irrigação pivô central operando em terreno com topografia variável.

O modelo proposto por JAMES (1982) foi comparado com dados experimentais onde se verificaram pequenas diferenças entre os resultados obtidos com perfis triangulares e os reais de campo. Estes resultados, segundo ZAGGO et alii (1990), permitem concluir que não é

necessário considerar perfis reais para se fazer previsões de desempenho em sistemas pivô central. Estes autores, em seus estudos ponderam que a partir dos trabalhos conduzidos por HEERMANN & HEIN (1968) e JAMES (1982), a utilização de perfis teóricos de distribuição de água pode levar a uma estimativa razoavelmente boa da distribuição espacial da água em sistemas pivô central, desde que se disponha de dados relativos às características técnicas dos diversos componentes do sistema.

KINCAID E HEERMANN (1970), usaram técnicas numéricas para calcular a distribuição de pressão em sistemas pivô central com o uso da equação de Darcy-Weissbach. Os resultados mostraram que a perda de carga no pendural pode ser aproximada por:

$$h_r = \frac{v^2}{2g} \exp. (9,2 q_r/Q) \dots \dots \dots (4)$$

onde,

h_r = perda de carga no pendural, em pés de água

q_r = vazão no pendural

Q = vazão na lateral antes do pendural

A perda de carga na ramificação devido a mudança na direção e no fluxo no pendural, foi geralmente menor que 6 kPa e frequentemente desprezível no dimensionamento de sistemas de alta pressão (> 400 kPa).

ESTADOS UNIDOS (1983), sugerem que a perda de carga por atrito na lateral de um pivô central deve ser calculada pela combinação de equações de perda de carga em tubulação sem derivação com as equações de perda de carga em tubulação com derivação, tendo o primeiro emissor um espaçamento normal na lateral. Para laterais que apresentam um grande número de emissores com espaçamento uniforme e com vazões crescentes por unidade de comprimento, o valor do coeficiente F é igual a 0,543. A expressão para o cálculo da perda de carga nestas condições é:

$$Hf_{cp} = 5,7 \cdot L \cdot \left(\frac{1}{D^{4,87}} \right) \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \dots (5)$$

onde,

Hf_{cp} = perda de carga por atrito na lateral do pivô,
em mca

L = comprimento da lateral (máx. raio molhado), em m

Q = vazão na entrada da lateral do sistema, em
 m^3/h

C = coeficiente de atrito, geralmente 130 para aço galvanizado, e 145 para aço revestido com epóxi

D = diâmetro interno da tubulação, em m

ZAGGO et alii (1990), baseado nos trabalhos de JAMES (1982) e ESTADOS UNIDOS (1983), desenvolveram um programa para simular o desempenho de sistemas pivô central

de irrigação, operando em condições de topografia tanto uniforme quanto variável ao longo da lateral. O programa desenvolvido por estes autores compõe-se das seguintes etapas:

- leitura das características dimensionais do sistema, o qual mantém em forma de arquivos, o espaçamento entre saídas, o diâmetro dos bocais, o diâmetro das tubulações e as características da adutora;

- cálculo das cotas do terreno, tubulações (considerando o efeito da curvatura da tubulação nos vãos do pivô) e emissores em cada saída;

- cálculo da pressão e vazão em cada emissor (considerando as características das válvulas reguladoras de pressão), pressão no ponto do pivô, vazão total e altura manométrica total do sistema, além de outras características hidráulicas do sistema (número de Reynolds, regime de escoamento).

- cálculo das lâminas aplicadas em cada posição, bem como o coeficiente de uniformidade de Christiansen.

REDDY & APOLAYO (1988), afirmam que os parâmetros importantes no dimensionamento de sistemas de irrigação são:

- seleção apropriada do diâmetro da tubulação
- distribuição de pressão na tubulação

Estes autores especificam que o coeficiente F de Christiansen para determinação da perda de carga em

pivô central, não é adequado, uma vez que nestes casos a vazão não é constante nos emissores. Para isso, propuseram um novo fator de correção da perda de carga por atrito ao longo da tubulação, para o dimensionamento da lateral de pivô central. Usaram a equação de Hazen-Williams para calcular perda de carga e obtiveram a expressão:

$$Hf_{cp} = \frac{K}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \cdot L \cdot F_{cp}(n) \dots (6)$$

onde,

F_{cp} = fator de correção do atrito para sistemas pivô central, sendo uma função somente do número de emissores na lateral.

Os autores compararam os resultados obtidos pela expressão anterior com resultados obtidos pelo cálculo da perda de carga calculada passo a passo a partir do final da lateral e concluíram serem desprezíveis as diferenças encontradas.

GILLEY (1989), discutindo o trabalho de REDDY & APOLAYO (1988) comenta que o fator F de Christiansen é aplicado a pivô central, contradizendo o que foi dito no trabalho, e cita CHU & MOE (1972), os quais derivaram uma fórmula geral para determinar F em pivô central para qualquer tipo de fórmula de perda de carga.

Ainda, de acordo com GILLEY (1989),

usando-se Hazen-Williams, o fator F é igual a 0,548, uma vez que, para a maioria dos sistemas pivô central há no mínimo vinte emissores. Nos casos de sistemas longos (400 m) há cerca de duzentos emissores (quando usados com pressões reduzidas).

CHU & MOE (1972), apresentaram solução analítica para a perda de carga total e a função de distribuição da perda de carga ao longo da lateral dos sistemas de irrigação pivô central, a partir da equação básica de energia, e checaram com dados obtidos no campo. Obtiveram para a perda de carga na lateral do pivô central a expressão:

$$F = \frac{h_o - h_R}{h_m} = 0,543 \dots \dots \dots (7)$$

onde,

h_o = pressão no ponto do pivô

h_R = pressão na periferia da área irrigada

h_m = perda de carga por atrito na lateral, operando como linha de suprimento

F = fator de correção de perda de carga para tubulação de múltiplas saídas.

O valor F obtido, é para quando se usa a fórmula de Scobey ($m = 1,9$), para perda de energia.

A distribuição da perda de carga de acordo com CHU & MOE (1972) e também citada por ROLLAND (1982),

pode ser determinada pela expressão:

$$H = \frac{(h_r - h_R)}{(h_o - h_R)} = 1 - \left[\frac{\beta_x(m+1, 1/2)}{\beta(m+1, 1/2)} \right] \dots (8)$$

onde,

H = fator de distribuição da perda de carga

h_r = pressão no ponto considerado

$\beta(m+1, 1/2)$ = função beta

$\beta_x(m+1, 1/2)$ = função beta incompleta

Segundo os autores, esta função é considerada não adequada para $m = 1,9$ e por isso foi feita uma aproximação para $m = 2$, tendo-se:

$$H = 1 - \left(\frac{15}{8} \right) - \left[x - \frac{2x^3}{3} + \frac{x^5}{5} \right] \dots (9)$$

onde,

$x = r/R$, sendo r é a distância entre o emissor e o ponto do pivô e R o raio da área irrigada.

Esta equação dá a função de distribuição adimensional da perda de carga na lateral do pivô central.

SCALOPPI (1986), bem como JAMES (1982), fazem referência aos trabalhos de CHU & MOE (1972) e comentam que a distribuição da perda de carga hidráulica

ficou restrita aos casos onde a perda de pressão era calculada pela fórmula de Darcy-Weissbach, nas condições de regime turbulento ($m = 2$).

SCALOPPI (1986), baseando-se na equação geral do gradiente de energia de Christiansen e na expressão para vazão lateral continuamente variável, apresentou um desenvolvimento teórico para a determinação da carga hidráulica em tubulações com múltiplas derivações e com vazão continuamente variável nos sucessivos pontos de derivação, obtendo a expressão:

$$hf_L = \frac{C \cdot G \cdot Q^m}{D^{2m+n}} \int_0^L \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)^m \cdot dx \dots (10)$$

onde,

hf_L = perda de carga por atrito na lateral do pivô,
em mca

C = coeficiente de unidades

G = coeficiente de perda de carga da fórmula
considerada

Q = vazão do sistema, em m^3/s

D = diâmetro da tubulação, em m

m e n = expoentes da velocidade média e do diâmetro
interno da tubulação, respectivamente da
fórmula de perda de carga considerada.

Para $m = 2$ a eq.(10) tem solução imediata.

Para valores de m fracionários, tem-se:

$$hf_L = hf \cdot \left[\frac{\Gamma(0,5) \cdot \Gamma(m+1)}{2 \Gamma(m+1,5)} \right] \dots \dots \dots (11)$$

onde,

hf_L = perda de carga por atrito na lateral do pivô,

em mca

hf = perda de carga na tubulação com vazão uniforme,

em mca

Γ = função Gama,

e o termo fracionário da eq.(11) é coeficiente F para cálculo da perda de carga em tubulações com infinitas derivações, com vazão variável.

Os valores de F , obtidos por SCALOPPI (1986)

são:

m	1,0000	1,7500	1,8520	1,9000	2,0000
F	0,6667	0,5591	0,5482	0,5432	0,5333

Para o cálculo da perda de carga na tubulação com vazão lateral variável e para qualquer valor do expoente m da equação empregada, SCALOPPI (1986) propôs:

$$hf_\ell = hf \cdot \left[\frac{\ell}{L} - \frac{m}{3} \left(\frac{\ell}{L} \right)^3 + \frac{m(m-1)}{5 \cdot 2!} \cdot \left(\frac{\ell}{L} \right)^5 - \frac{m(m-1)(m-2)}{7 \cdot 3!} \cdot \left(\frac{\ell}{L} \right)^7 + \dots \right] \dots (12)$$

onde,

hf_ℓ = perda de carga por atrito num trecho ℓ , a partir do início da lateral, em mca

m = expoente da velocidade média, da fórmula de perda de carga considerada

L = comprimento total da tubulação

2.3. Determinação da vazão em pivô central

Os sistemas pivô central de irrigação se constituem num conjunto de tubos retos com seções circulares, montados sequencialmente. Sabe-se que de todos os tubos que apresentam seções iguais, diferindo apenas quanto a forma, o tubo circular tem o menor perímetro de seção e, portanto a menor área interna, por metro de comprimento. Isto mostra que o tubo circular oferece à vazão do fluido, menor resistência que tubos com qualquer outra forma de seção.

De acordo com LINSLEY & FRANZINI (1978), a determinação da vazão em condutos forçados pode ser feita por vários métodos, sendo que cada um deles tem suas próprias características, devendo-se preferir o que melhor se adapte às condições de cada caso. RUSSEL (1942), pondera que para trabalhos precisos, é melhor fazer determinações separadas da velocidade média a cada nova taxa de fluxo, utilizando tubo de pitot.

SPINK (1967), cita como medidas de vazão em tubulações entre outros, os seguintes métodos :

- placa de orifícios - fácil fabricação , baixo custo , fácil instalação e remoção e elevada precisão. As placas não são adequadas para medir fluxo em fluidos sujos e apresentam perdas de carga maiores que o Venturi e medidores magnéticos.

- tubo Venturi - melhor tipo de medidor para líquidos contendo altas concentrações de sólidos.

- tubo de Pitot - mede a velocidade num ponto do conduto. Portanto, para medição de vazão, deve ser determinada a velocidade média que ocorre no conduto e relacioná-la com sua seção transversal. Para resultados consistentes, o tubo de pitot deve ser instalado a uma distancia de 50 ou mais diâmetros, a partir de curvas, registros, ou qualquer outra singularidade, em tubos lisos e retos. Se houver tubo reto suficiente antes do tubo pitot, a velocidade média aproximada será obtida numa posição a 30 % do raio a partir da parede do tubo, isto é, aproximadamente a 70 % do raio a partir do centro da tubulação.

AZEVEDO NETO (1977), afirma que os orifícios concêntricos instalados nos encanamentos , constituem um dos processos mais simples para medição de vazões. Deve ser instalado em trechos retilíneos horizontais ou verticais, sem qualquer causa perturbadora próxima (derivações,

curvas, registros).

O medidor Venturi deve ser precedido de um trecho de canalização retilíneo de, pelo menos seis vezes o diâmetro da canalização (AZEVEDO NETO,1977), ou a uma distância de 20 a 25 diâmetros a partir de singularidades. (RUSSEL,1942).

Os hidrômetros, segundo LINSLEY & FRANZINI (1978), não são instrumentos precisos e não se prestam para medir valores muito pequenos de fluxo, porque o líquido pode passar através do hidrômetro sem mover as peças móveis. Apresentam elevada perda de carga, não sendo usados para medir vazões superiores a $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

PAIR (1975), diz que o meio mais preciso de medição de vazão em tubulações é com hidrômetros. Tais medidores já se apresentam calibrados para medição de fluxo e m^3/s , ou m^3/h , bem como registram o fluxo acumulado com o tempo.

LINSLEY & FRANZINI (1978), afirmam que os tubos de pitot estáticos podem ser classificados como medidores diferenciais de carga. Eles indicam a carga cinética ou de velocidade em um ponto da seção transversal e com essa carga obtém-se a velocidade. Fazendo a medição em diversas faixas da seção transversal, é possível estabelecer um perfil de velocidades e calcular as vazões para cada uma delas.

STREETER & WYLIE (1982), afirmam que a

determinação da velocidade em vários pontos de uma seção transversal permite a avaliação da vazão. Como a determinação da velocidade é de difícil execução, utiliza-se de um dispositivo que determina uma grandeza mensurável que pode ser relacionada com a mesma. Para isso o tubo de pitot, que trabalha neste princípio é um dos métodos mais precisos de determinação de velocidades.

O tubo de pitot apresenta baixa sensibilidade ao alinhamento em relação ao escoamento, resultando um erro desprezível em termos práticos se tiver um desalinhamento menor que quinze graus (STREETER & WYLIE,1982). Por outro lado, RUSSEL (1942) cita que o efeito da angulação entre o tubo e o eixo da tubulação quando não corretamente instalado, é ainda sujeito a muita discussão.

Combinando o tubo estático com o tubo de pitot, obtém-se o tubo de pitot estático, cuja equação é:

$$V = C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot R' \cdot \left(\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \right)} \dots \dots \dots (13)$$

onde,

V = velocidade do líquido na canalização, em m/s

C = constante do pitot

R' = leitura da coluna de líquido, em mm

γ' = peso específico do líquido indicador, em Kgf/m³

γ = peso específico da água, em Kgf/m³

g = aceleração da gravidade, em m/s^2

De acordo com BRASIL¹, em ensaio de perda de carga em dois sistemas pivô central, foram determinadas as vazões, usando para isso o tubo de pitot estático, medindo as velocidades em áreas concêntricas da seção da tubulação. As variações de vazão obtidas após correção dos problemas nas juntas de borracha dos tubos, mostraram um desvio de apenas 2,07 % entre os dois pivôs.

2.4. Determinação da pressão na lateral do sistema pivô central

Para medir diferenças de pressão, empregam-se os manômetros diferenciais. Na prática se empregam frequentemente os manômetros metálicos (Bourdon) para verificação e controle de pressões. As pressões indicadas são geralmente as relativas (AZEVEDO NETO, 1977; STREETER & WYLIE, 1982).

De acordo com STREETER & WYLIE (1982), o manômetro Bourdon é um dos dispositivos típicos para medida de pressões efetivas (pressão em relação à pressão

¹BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1990. 24p. (Relatório 1130/90 S1)

atmosférica local). Por outro lado, os manômetros diferenciais determinam a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer, quando a pressão real em qualquer ponto do sistema não puder ser determinada.

GILL (1984), cita que os erros usuais encontrados com manômetros tipo Bourdon são:

- erro na zeragem, o que resulta em constante desvio em toda a faixa do manômetro;
- erro devido a histerése;
- multiplicação do erro, quando o manômetro fornece pressões maiores ou menores que as reais;
- erro de angularidade, quando o ponto zero e o ponto mais elevado do manômetro estão de acordo com o real, mas os pontos intermediários se distanciam acima ou abaixo.

Segundo BRASIL², foram usados manômetros diferenciais com coluna de líquido indicador vermelho, de peso específico 2900 Kgf/m³, para determinação de perda de carga entre torres (no vão) em dois sistemas pivô central, bem como entre emissores do primeiro vão dos dois sistemas, visando determinar o coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams.

KINCAID & HEERMANN (1970), usaram manômetro

² BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1990. 24p. (Relatório 1130/90 S1).

metálico tipo Bourdon adaptados a tubo de pitot, para determinação de pressão em bocais de emissores (*vena contracta*) a fim de verificar experimentalmente a distribuição de pressão em sistema de irrigação pivô central. Como resultados, puderam verificar que em um dos pivôs estudados, os reguladores de pressão apresentaram um funcionamento não adequado. Isto foi verificado pela observação da semelhança entre a curva da distribuição teórica da pressão e a curva da distribuição da pressão calculada a partir do cálculo da vazão de cada emissor.

2.5. Caracterização das condições de operação da unidade de bombeamento

Os sistemas pivô central de irrigação são dimensionados para fornecer quantidades controladas de água dentro de períodos relativamente curtos de tempo, possibilitando que se procedam manejos de irrigação com melhor uso, os quais poupam tanto água quanto energia (GILLEY et alii, 1983).

A pressão no emissor na lateral do pivô central pode variar devido às diferenças hidráulicas ou às mudanças na topografia do terreno. Os reguladores de pressão são frequentemente usados em cada emissor, para assegurar uma igual pressão requerida para manter um fluxo uniforme. A uniformidade da pressão mantida, depende das

caraterísticas de desempenho do regulador e do dimensionamento do sistema (BERNUTH & BAIRD, 1990).

De acordo com EDLING (1979), os sistemas de irrigação pivô central são dimensionados para ter a melhor uniformidade de aplicação, quando a superfície do terreno está em nível. Os bocais são dimensionados a uma dada capacidade de vazão e pressão da bomba, sem considerar os efeitos da topografia (elevação ou depressão) do terreno.

O efeito global das mudanças nas condições de operação dos bocais influenciam as condições de operação da bomba. O equilíbrio é alcançado entre as características de operação da bomba e as necessidades de operação dos bocais, a medida que é afetado pela topografia do terreno.

De acordo com BRASIL³, na avaliação do desempenho dos sistemas pivô central, foi concluído que para ambos os pivôs, a pressão de operação das bombas era excessiva, estando os motores trabalhando com potências exigidas inferiores às suas capacidades. Nestes casos, ambos os pivôs poderiam ter suas capacidades de irrigação aumentadas, obtendo-se assim melhor eficiência no uso de energia.

³ BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1990. 24p. (Relatório 1130/90 S1).

EDLING (1979), desenvolveu um modelo matemático que determina a influência de inclinações uniformes do terreno, na operação das bombas e na vazão dos bocais dos sistemas pivô central. Usou este modelo para analisar vinte e nove bombas e sistemas pivô central. As mudanças na inclinação do terreno ao longo do sistema influenciam a vazão de maneira caracterizada pela curva da bomba até que o sistema entre em equilíbrio.

JAMES (1984), desenvolveu curvas adimensionais para representar o desempenho de 125 bombas centrífugas e turbinas. Para isso, modificou seu modelo de simulação desenvolvido em 1982, e usou com tais curvas para examinar o efeito do tipo e tamanho de bomba em nove condições de inclinação do terreno ao longo da lateral, sobre a água aplicada, uso de energia, uniformidade e eficiência dos sistemas pivô central, com diferentes tipos de emissores.

O autor especifica que o desempenho do sistema pivô central é significativamente influenciado pela seleção do tamanho adequado da bomba ou turbina. Para as condições examinadas, concluiu que os sistemas com aspersor de impacto, com bombas subdimensionadas, podem ser usados para obter eficiências na irrigação maior que 80% em todas as condições de terreno, exceto em aclive de 5%. O tamanho da bomba afetou pouco na uniformidade de aplicação.

Para as bombas superdimensionadas, o autor

afirma que os pivôs com aspersor de impacto foram os mais afetados pela inclinação do terreno. A aplicação da água e a eficiência da irrigação variaram amplamente em terrenos inclinados. Quando se usou bocais com vazão constante ao longo do pivô (ou aspersores com regulador de pressão), o tamanho da bomba teve pouco efeito na eficiência ou irrigação para bomba subdimensionada e a uniformidade de aplicação variou um pouco e provavelmente insignificante com o terreno para bomba superdimensionada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local

O estudo foi conduzido na fazenda Sertãozinho, município de Sumaré SP, de propriedade do Sr. Joseph A. Vaughan, a uma latitude de $22^{\circ}48'S$, longitude de $47^{\circ}18'24''W$ de GR e altitude de 600 metros.

3.2. Caracterização do clima

O clima da região é do tipo CWA pela classificação climática de Köppen, ou seja, clima temperado chuvoso, com inverno seco e verão chuvoso, e com a temperatura média do mês mais frio inferior a $18^{\circ}C$ e do mês mais quente superior a $22^{\circ}C$ (clima tropical de altitude) (CAMARGO *et alii*, 1974).

3.3. Caracterização do sistema

Nas Tabelas 1 e 2, são observados as características do sistema pivô central, tubulação adutora e unidade de bombeamento, obtidas no projeto original.

Tabela 1 - Características do sistema pivô central e da tubulação adutora, obtidos em projeto

ITEM	DESCRIÇÃO
Marca.....	Carborundum
Modelo.....	CB 620-8/7/8/, 3m, 3/4/1
Propulsão.....	elétrico
Número de torres.....	8
Canhão final.....	não possui
Comprimentos dos vãos.....	1.º = 51,08 m 2.º, 3.º e 8.º = 51,83 m 4.º, 5.º e 7.º = 44,58 m 9.º (balanço) = 25,00 m
Comprimento total.....	406,89 m
Raio irrigado.....	407,00 m
Altura das torres.....	3,65 m
Altura da tubulação. (medida no centro do vão).....	1.º, 2.º, 3.º e 8.º vãos = 4,60 m 4.º, 5.º, 6.º e 7.º vãos = 4,46 m 9.º (balanço) = 2,97 m
Diam. da tubulação até 8.º vão.....	163 mm
Diam. do lance em balanço.....	135 mm e 96 mm
Coef. de perda de carga (C).....	125
Emissor.....	Spray AF-1 (Fabrimar)
Espaçamento entre saídas.....	variável de 2,155 a 2,741 m média de 2,261 m
Diâmetro do bocais.....	de 2,0 a 7,6 mm intervalos de 0,2 mm
Anel de impacto.....	plano estriado grosso
Relação entre diâmetro do bocal(D)* e o coeficiente de descarga(Cd).....	$Cd = 0,908 + 0,0245D - 0,00339D^2$
Regulador de pressão.....	RP-2 (Fabrimar)
Altura dos emissores.....	2,80 m (pendurais)
Dif. de cotas (pivô-motobomba).....	35,89 m
Dif. de cotas (pivô-ponto+alto).....	8,43 m
Pressão no fim da lateral.....	20,00 mca
Pressão no pivô (a cive máximo).....	39,44 mca
Pressão na motobomba.....	88,00 mca
Tubulação adutora.....	fibrocimento, classe 15
Diâmetro da adutora.....	200 mm
Comprimento total da adutora.....	536 m
Coef. de perda de carga (C).....	140

* Expresso em mm

Tabela 2 - Características da unidade de bombeamento

BOMBA CENTRÍFUGA		MOTOR ELÉTRICO	
Marca.....	KSB	Marca.....	WEG
Modelo.....	WKL 100/4	Modelo.....	IP-54
Diâmetro rotores...	252 mm	Potência nominal...	100 cv
Vazão prevista.....	183 m ³ /hora	Número de fases....	03
Pressão prevista...	88 m.c.a	Numero de pólos....	IV
Rotação.....	1750 rpm	Rotação.....	1760 rpm
Pot.abs.no eixo....	84 cv	Tensão.....	220/380 V

Na Figura 1, apresentam-se as curvas de desempenho dos reguladores de pressão.

Figura 1 - Curva de desempenho do regulador de pressão usado no pivô central (ZAGGO et alii, 1990)

3.4. Caracterização do ensaio

3.4.1. Levantamento planialtimétrico da área irrigada

Foi efetuado o levantamento planialtimétrico da área sob o pivô, com medidor eletrônico de distância, marca Pentax, modelo PX-06D de precisão angular de 6 segundos e precisão linear de $\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$.

A área do pivô foi mapeada em quadrículas de cinquenta metros de lado, durante o levantamento, obtendo-se a partir daí as respectivas cotas do terreno nestes pontos.

3.4.2. Escolha das posições de ensaio

Obtido o mapa com as cotas do terreno, foram escolhidas treze posições potenciais para ensaio do pivô e por interpolação de dados foram obtidas as cotas do terreno em cada uma das torres. A partir desses valores foram feitos os gráficos dos perfis de cada uma das treze posições em relação ao ponto do pivô e analisadas as condições de declividade entre torres e suas respectivas representatividades em relação a área do pivô central, selecionando-se dessa maneira seis radiais características (P.1 a P.6), para a realização do ensaio (Figura 2).

Figura 2 - Planta planialtimétrica da área irrigada pelo sistema pivô central, com as posições do ensaio de pressão

Na figura 3, podem ser observados os perfis de cada uma das seis posições de ensaio.

Figura 3 - Perfil topográfico das posições 1 a 6 do ensaio de pressão

Os perfis da figura 3 representam as seguintes situações ao longo da lateral do pivô, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Dados referentes à topografia do terreno ao longo da lateral do pivô central, nas posições de ensaio de pressão

Posição	Características
1.....	Aproximadamente horizontal
2.....	Aclive uniforme (2,07%) até o final
3.....	Aclive uniforme (1,46%) até metade da lateral , e declive acentuado no final (-8,42%) , tendo um declive médio de -0,49% ao longo da lateral
4.....	Declive suave até a 4. ^a torre (-2,58%) e declive acentuado no final (-8,42%), com declive de -9,35% da 6. ^a torre ao final , ou declive médio de -5,59% ao longo da lateral
5.....	Declive uniforme de -3,81% na lateral
6.....	Declive uniforme de -1,72% até a 7. ^a torre e em nível até o final, com declividade média de -1,40%

3.4.3. Determinação da curvatura dos vãos

Para determinação da curvatura dos vãos, foram medidos no campo as alturas do ponto do pivô em relação à sua base de concreto e as alturas das oito torres da lateral em relação ao nível do solo, bem como alguns pontos intermediários correspondentes à parte mais alta da tubulação (aproximadamente o centro do vão), em relação ao solo. Usando ajuste polinomial de grau 2, foram determinadas as equações da curvatura dos diferentes tipos de vãos.

3.4.4. Determinação das cotas do terreno em cada radial

Tendo sido obtida a planta planialtimétrica da área, e escolhidas as seis radiais de ensaio, foram determinadas as cotas de cada torre em relação a base do pivô por interpolação entre valores medidos. Para maior precisão dos dados, foi efetuado o levantamento altimétrico em cada torre, nas seis radiais, obtendo os dados conforme mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Cotas (metros) do terreno, em cada torre, para as seis posições de ensaio escolhidas

TORRE	POS. 1	POS. 2	POS. 3	POS. 4	POS. 5	POS. 6
Pivô	491,56	491,56	491,56	491,56	491,56	491,56
1	492,16	492,93	492,81	490,49	490,02	490,59
2	492,69	494,28	493,87	489,42	488,40	489,40
3	493,12	495,35	494,69	488,46	486,90	488,34
4	493,11	496,28	495,06	486,46	485,46	487,61
5	493,00	497,27	495,10	484,24	483,83	486,79
6	492,88	498,33	494,09	480,67	481,81	486,14
7	492,68	499,33	492,29	476,67	479,83	485,87
8	492,49	500,05	490,30	471,90	477,28	485,87
L.baL.	492,18	499,99	489,55	468,82	476,04	485,85

3.4.5. Instalação das tomadas de pressão

3.4.5.1. Lateral do pivô

Para a determinação da pressão na tubulação

ao longo da lateral do pivô central, em cada uma das seis radiais escolhidas, foram utilizados dispositivos adaptados de bicos de câmara de pneu, conectados em tubos de PVC de diâmetro de 3/4" e 20 centímetros de comprimento, com rôsca macho paralela de um lado (adaptação ao tubo do pivô) e rôsca macho cônica de outro lado (para adaptação no regulador de pressão) em cada uma das saídas da lateral do pivô.

O sistema pivô central em estudo apresentava tubos pendurais para os emissores tipo sprays e reguladores de pressão, os quais foram retirados um a um, para colocação das tomadas. Cada tomada foi montada com um conjunto regulador de pressão e emissor e rosqueada no tubo do pivô, em suas respectivas posições, conforme mapa dos emissores fornecidos pelo fabricante. Os pendurais foram recolocados nas suas posições originais após o término do ensaio.

3.4.5.2. Ponto do pivô

Foi instalado no ponto do pivô, a 0,55 m de altura em relação à base, uma tomada de pressão semelhante a usada em sua lateral, com manômetro tipo Bourdon, marca WIKA, escala de 0 a 140 psi, precisão de $\pm 0,5\%$, com subdivisão de 1 psi.

Uma segunda tomada foi instalada a 1,10 m de

altura em relação à base, com manômetro tipo Bourdon, escala de 0 a 140 psi e subdivisão de 1 psi, marca René-Graf, para a determinação da perda de carga no pivô e do coeficiente de Hazen-Williams.

3.4.5.3. Unidade de bombeamento

Próximo a saída da bomba foi instalada uma tomada de pressão a 0,9 m em relação à base, com manômetro tipo Bourdon, escala de 0 a 600 psi e subdivisão de 10 psi.

3.5. Realização do ensaio

3.5.1. Determinação da vazão

A determinação da vazão no pivô central foi efetuada em diversas posições da lateral em relação a área irrigada, usando-se o tubo de pitot, o qual mede a velocidade da água na canalização (SPINK, 1967 e STREETER & WYLIE, 1982), conforme eq. (13) e pela equação da continuidade.

O tubo de pitot usado, foi do tipo estático, marca MERIAM, CAMCO 1/8", M-168, FF número 25, com 60 cm de comprimento útil, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, onde se acoplou um manômetro diferencial com coluna de líquido indicador com

reservatório, escala de 0 a 1500 mm, subdivisão de 1 mm (Figura 4), pertencente ao CENEA-MA, para obtenção do diferencial de pressão. O líquido indicador usado foi o tetrabromoetano, com peso específico de 2900 Kg/m^3 .

Figura 4 - Coluna de líquido indicador, com reservatório

Para a estimativa da velocidade média, a seção transversal da tubulação foi imaginariamente dividida em cinco anéis iguais (Figura 5), conforme recomendado por RUSSEL (1942). Essas medições também foram efetuadas em pontos que correspondem a uma distância de 70% do raio da

tubulação a partir do centro (r_3), de acordo com SPINK (1967).

Os pontos para a determinação da velocidade na seção transversal da tubulação, foram definidos conforme segue:

$$r_1 \text{ e } r_1' = \sqrt{0,1} \cdot R$$

$$r_2 \text{ e } r_2' = \sqrt{0,3} \cdot R$$

$$r_3 \text{ e } r_3' = \sqrt{0,5} \cdot R$$

$$r_4 \text{ e } r_4' = \sqrt{0,7} \cdot R$$

$$r_5 \text{ e } r_5' = \sqrt{0,9} \cdot R$$

onde,

R = raio da tubulação, em mm

r e r' = raio para leitura das velocidades, em mm

Na Figura 5, é mostrada a seção transversal da tubulação, com as posições de leitura das velocidades, onde R é o raio da tubulação e r e r' são os pontos de determinação da velocidade da água.

Para a determinação da vazão, foi instalado o tubo pitot na segunda saída do primeiro vão, conforme BRASIL⁴ (Figura 6).

⁴ BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1190.24p. (Relatório 1130/S1).

Figura 5 - Seção transversal da tubulação do pivô central,
para determinação das velocidades da água

Figura 6 - Tubo de pitot instalado no pivô central para para determinação das velocidades da água

A partir do tubo pitot, seguiam duas mangueiras POLY-FLO de 6,35 mm de diâmetro, até o manômetro diferencial para leitura das colunas de líquido indicador. Os valores obtidos foram utilizados para calcular as vazões em cada posição.

Foram determinadas oito vazões no pivô central, sendo quatro delas obtidas pela determinação da

velocidade na seção transversal, e quatro em (r_9).

As vazões determinadas a partir da seção transversal do tubo, foram obtidas com a lateral do pivô central nas seguintes posições do terreno:

- posição 1 (horizontal), durante a determinação do coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams;
- próximo a posição 5 do ensaio de pressão (declive uniforme);
- posição 6 do ensaio (declive, com os tres últimos vãos em nível), com registro da bomba totalmente aberto e também com o mesmo registro semi-aberto.

Usando os pontos de leitura da velocidade em r_9 , foram determinadas as vazões nas seguintes posições do terreno:

- intermediária entre a posição 1 e a posição 2 do ensaio de pressão;
- posição 2 do ensaio de pressão;
- próximos às posições 4 e 6 do ensaio de pressão.

Para a obtenção das vazões, com o uso do tubo de pitot estático, foi usada a equação:

$$Q = 14. \sqrt{R'} \dots \dots \dots (14)$$

onde,

R' = leitura do líquido indicador, em mm

Q = vazão na tubulação, em m^3/h

Em cinco situações de campo, foram determinadas as vazões máximas no centro da tubulação. Nestes casos, foram usados os dados de vazão média, determinados através de anéis concêntricos de acordo com RUSSEL (1942), bem como aqueles obtidos em r_3 conforme SPINK (1967), e divididos pelas vazões máximas, obtendo-se um coeficiente médio ($Q_{\text{média}}/Q_{\text{máxima}}$). Este valor segundo NEVES (1977), é em torno de 0,8 a 0,85, para regime de escoamento turbulento.

Este coeficiente serviu para correção das vazões em cada uma das cinco situações em que foram obtidas as leituras de velocidade no centro da tubulação. Para as condições em que se mediu apenas a velocidade média em r_3 , as vazões determinadas não foram corrigidas por este coeficiente, sendo portanto adotadas como vazões médias da seção transversal da tubulação.

3.5.2. Determinação da perda de carga nos vãos ao longo do pivô.

Foram instaladas tomadas de pressão, na primeira saída do primeiro vão e nas últimas saídas de cada um dos oito vãos do pivô mais o lance final. Foi adaptado um manômetro diferencial entre duas tomadas consecutivas, obtendo assim a perda de carga em cada trecho e em todo o

pivô.

Para a determinação da perda de carga, foi usada uma coluna de líquido tipo U, marca IOPE, Instrumentos de Precisão Ltda, modelo MTU, escala 1100-0-1100 mm, subdivisão 1 mm, usando líquido indicador tetrabromoetano, com peso específico 2900 Kg/m^3 .

As determinações de perda de carga foram efetuadas a partir do lance em balanço em direção ao ponto do pivô, para se evitar que o sistema ficasse operando por tempo muito longo numa única posição, ocasionando problemas à cultura quanto a quantidade de água aplicada, bem como escoamento superficial. Tais determinações foram efetuadas em duas posições da lateral do pivô em relação a área irrigada da seguinte forma:

- intermediária entre a posição 1 e a posição 2 do ensaio de pressão;
- posição 6 do ensaio de pressão.

O procedimento de determinação da perda de carga foi o mesmo usado em BRASIL⁵. A perda de carga total correspondeu à soma das perdas em cada vão.

⁵ BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1990. 24p. (Relatório, 1130/90 S1).

3.5.3. Determinação da perda de carga na adutora do pivô

A determinação da perda de carga na tubulação adutora do pivô, desprezando-se a diferença de carga cinética na saída da bomba, foi efetuada de acordo com a equação:

$$h_f = P_{\text{bomba}} - P_{\text{pivô}} - Dn_{(\text{ad.})} \dots \dots \dots (15)$$

onde,

h_f = perda de carga na tubulação adutora do pivô, em mca

P_{bomba} = pressão na unidade de bombeamento (base), em mca

$P_{\text{pivô}}$ = pressão no ponto do pivô (base), em mca

$Dn_{(\text{ad.})}$ = diferença de cotas entre o ponto do pivô e unidade de bombeamento, em m

As correções das vazões foram efetuadas multiplicando-se a vazão obtida na seção transversal pelo coeficiente médio entre elas. Para os valores estimados em r_3 , onde não foram medidas as velocidades na parte central da seção, as vazões foram assumidas como sendo as médias da seção transversal da tubulação.

3.5.4. Determinação da pressão

As determinações de pressão no sistema foram efetuadas com manômetro tipo Bourdon. Para cada determinação de vazão, perda de carga, coeficiente de perda de carga e pressões na lateral nas várias posições de ensaio, foram efetuadas leituras nos manômetros instalados no ponto do pivô e na unidade de bombeamento.

3.5.4.1. Lateral do pivô central

As pressões na lateral do pivô central, nas seis posições de ensaio foram determinadas com manômetro tipo Bourdon, marca WIKA, escala de 0 a 140 psi, tipo teste, com precisão de $\pm 0.5\%$, subdivisão de escala de 1 psi, adaptado a uma mangueira POLY-FLO de 6,35 mm de diâmetro com 10 metros de comprimento. Na outra extremidade da mangueira foi adaptado um conector de engate rápido, a partir de um bico de calibrador de pneu para realização das leituras de pressão. As leituras foram obtidas por três pessoas a saber: um anotador na planilha, um para adaptar o bico de leitura à tomada do emissor sobre o pivô e um terceiro para efetuar as leituras de pressão no manômetro. Tais leituras foram efetuadas a 1,0 metro de altura do solo.

Muito embora tivessem sido instaladas cento

e sessenta e três tomadas de pressão na lateral do pivô (número total de saídas), não foram efetuadas as leituras em todas elas, porque não foi possível detectar variações mensuráveis de pressão entre as tomadas consecutivas, com manômetro Bourdon. Assim sendo, foram selecionadas algumas tomadas por vão, totalizando quarenta e quatro tomadas de pressão ao longo do pivô, mantendo-se as leituras nas seis posições de ensaio.

As leituras das pressões (pressões relativas) foram obtidas a 1 metro de altura do solo e corrigidas para a o nível da tubulação, em relação a base do pivô, pela expressão:

$$P_{\text{tub.}} = P_{\text{rel.}} - (Cota_{\text{tub.}} - Cota_{\text{terr.}} - 1,0) \dots (16)$$

onde,

$P_{\text{tub.}}$ = pressão na tubulação, em mca

P_{rel} = pressão relativa medida no campo, em mca

$Cota_{\text{terr.}}$ = diferença de cotas entre o ponto estudado e a base do pivô, em m

$Cota_{\text{tub.}}$ = altura da tubulação em relação à base do pivô, em m

Os valores das cotas do terreno foram considerados positivos quando em posição ascendente em relação a base do pivô e negativos quando descendentes em relação a mesma.

3.5.5. Determinação do comprimento equivalente

3.5.5.1. Adutora e sucção

O comprimento equivalente, ou a perda de carga em válvulas, conexões, registros e outras singularidades, igual a que produziria um comprimento equivalente de tubulação, foram determinados pela fórmula de Strickler-Manning, descrita em LENCASTRE (1972), modificada para a obtenção direta do seu valor, conforme a expressão:

$$L_1 = \frac{8 \cdot K \cdot K_s^2}{10,3 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot D_p^4 \cdot D_t^{-5,399}} \dots\dots\dots (17)$$

onde,

K = coeficiente de perda de carga localizada

K_s = coeficiente de rugosidade do material da tubulação

g = aceleração da gravidade, em m/s^2

D_p = diâmetro da peça estudada, em m

D_t = diâmetro da tubulação de interesse, em m

L_1 = comprimento equivalente das peças, em metros de tubulação.

Quando ocorrem trechos de tubulação com diâmetros diferentes, foi usada a equivalência de diâmetros expressa pela relação:

$$L_2 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{-5,333} \cdot \left(\frac{K_{s2}}{K_{s1}} \right)^2 \cdot L_1 \dots \dots \dots (18)$$

onde,

D_1 e D_2 = diâmetros das tubulações em estudo e de interesse, respectivamente, em m

K_{s1} = coeficiente de rugosidade do material com diâmetro D_1

K_{s2} = coeficiente de rugosidade do material com diâmetro D_2

L_2 = comprimento equivalente em metros de tubulação de diâmetro D_2 , em relação ao comprimento da tubulação com diâmetro D_1 .

O comprimento da tubulação para se determinar a perda de carga é o comprimento virtual ou total, que é a soma do comprimento real mais o comprimento equivalente das peças (perda de carga localizada, com diâmetro da tubulação considerada).

3.5.6. Determinação do coeficiente de perda de carga

3.5.6.1. Pivô central

A determinação do coeficiente de perda de carga na lateral do pivô central foi efetuada por dois métodos distintos. No primeiro, foram instaladas tomadas de pressão ao longo do primeiro vão e início do segundo. Estas tomadas foram montadas diretamente na tubulação, no local dos emissores. A distância entre tomadas foi variável, sendo que em alguns trechos haviam juntas de união da tubulação.

As demais saídas do primeiro vão foram fechadas. A primeira tomada de pressão foi instalada na 5.^ª saída do pivô e a última tomada na 23.^ª saída (3.^ª saída do segundo vão), totalizando quatorze tomadas de pressão. Para a obtenção das perdas de pressão entre as tomadas consecutivas, foi usado um manômetro diferencial.

A determinação do coeficiente C de Hazen-Williams, foi efetuada somente com o pivô na posição horizontal da área, podendo-se desprezar a diferença de nível entre as tomadas.

Com os dados de vazão e perda de carga, determinou-se o coeficiente C de Hazen-Williams, pela expressão:

$$C^{1,852} = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \frac{L}{hf} \cdot Q^{1,852} \dots\dots\dots (19)$$

onde,

C = coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams

Q = vazão do sistema, em m³/s

D = diâmetro da tubulação (0,163 m)

hf = perda de carga no primeiro vão, em mca

L = comprimento do primeiro vão, em m

A expressão para a obtenção da altura da coluna de água usando manômetro diferencial é:

$$h = h^* \cdot \left[\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \right] \dots\dots\dots (20)$$

onde,

h = altura de coluna de água, em mm

h* = altura da coluna de líquido indicador, em mm

γ' = peso específico do líquido indicador, em Kgf/m³

γ = peso específico da água, em Kgf/m³

O segundo método de determinação do coeficiente C de perda de carga, envolveu as posições da lateral do pivô em que foram determinadas as perda de carga com manômetro diferencial. Somando os dados de perda de carga nos vãos obteve-se a perda total no sistema, e usando o fator F de múltiplas saídas em pivô central conforme

descritos por SCALOPPI (1986) e CHU & MOE (1972), foram determinados os valores do coeficiente C de Hazen-Williams, pela expressão:

$$C^{1,852} = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \frac{L}{hf} \cdot Q^{1,852} \cdot F \dots \dots (21)$$

onde,

C = coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams

D = diâmetro da tubulação (0,163 m)

L = comprimento da lateral do pivô, em m

hf = perda de carga na lateral do sistema, em mca

Q = vazão do sistema, em m³/s

F = fator de múltiplas saídas em pivô central(0,5482)

3.5.6.2. Adutora

Os valores de pressão lidos no ponto do pivô e unidade de bombeamento, durante as determinações de vazão do pivô central, foram corrigidos para os níveis do solo (respectivas bases de concreto), em metros de coluna de água (mca). Foi também determinado o comprimento equivalente da adutora, pelas equações (17) e (18), e em seguida obtido seu comprimento virtual ou total, pela soma do comprimento equivalente com o comprimento da adutora medido no campo.

Assim, com a diferença de nível entre o ponto do pivô e a unidade de bombeamento, nas bases de

concreto, o comprimento virtual e as perdas de carga da adutora, para as várias determinações de vazão, foi possível a obtenção dos coeficientes de perda de carga pela expressão de Hazen-Williams modificada como segue:

$$C^{1,852} = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \frac{L}{hf} \cdot Q^{1,852} \dots\dots\dots (22)$$

onde,

C = coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams

hf = perda de carga na tubulação adutora, em mca

Q = vazão do sistema, em m³/s

L = comprimento virtual da adutora, em m

D = diâmetro da tubulação adutora (0,200 m)

3.5.7. Determinação da altura manométrica total da bomba

Foram obtidas as alturas manométricas totais na unidade de bombeamento, para cada uma das oito determinações de vazão efetuadas no campo, além daquela obtida com o registro da bomba fechado, totalizando 9 determinações.

As diferenças de cotas medidas no campo em relação ao nível do solo (bases de concreto) são:

- entre ponto do pivô e unidade de bombeamento é de 35,89 metros

- entre a unidade de bombeamento e o nível da água é de 1,55 metros.

Foram consideradas as alturas manométricas totais, obtidas do catálogo do fabricante da bomba, para os diâmetros de 265 mm e 255 mm, obtendo-se as curvas de vazão versus pressão. Essas curvas foram ajustadas pelo modelo polinomial de grau 2 e elaborado um gráfico, onde também foram plotados os dados de altura manométrica total determinados com os dados de pressão obidos no campo, para comparações entre seus valores.

3.6. Uso do programa de simulação de pressão em pivô central

Foi usado para a simulação da distribuição de pressão ao longo da lateral do pivô central, o programa desenvolvido por ZAGGO et alii (1990), o qual se baseia no trabalho de JAMES (1982).

Partindo da pressão no fim da lateral (lida no campo), em cada uma das seis radiais escolhidas (posições de ensaio), foi efetuada toda a simulação do comportamento hidráulico do sistema, usando para tal, a fórmula de Hazen-Williams, para cálculo da perda de carga nos diversos trechos da lateral e na tubulação adutora.

Os dados de entrada para o programa de simulação da distribuição da pressão, são:

- as características dimensionais do sistema como lâmina de água e tempo de irrigação;
- características técnicas do sistema como diâmetro dos bocais, distância entre saídas, composição do pivô (combinação de vãos e torres), coeficiente de descarga dos bocais e curvatura dos vãos;
- declividades entre os vãos em cada posição de ensaio.

Na Figura 7, é mostrado o fluxograma ou diagrama esquemático dos principais passos do programa.

Foi determinada a distribuição de pressão ao longo da lateral do pivô, através do programa de simulação, e comparados os dados com resultados obtidos no campo em saídas especificadas ao longo da lateral do pivô, apresentando-se os resultados em forma de tabelas e gráficos.

Para determinação das equações de ajuste que melhor representassem os dados de campo e os dados obtidos pelo programa de simulação, foi usado um programa estatístico denominado RATS (Regression analysis of time series).

Foram considerados os 44 pontos de pressão obtidos por simulação e mais os 44 pontos lidos no campo, onde foi determinado o teste t (teste da diferença) das regressões das diferenças entre os dados de campo e os dados obtidos por simulação, para cada uma das seis

posições de ensaio de pressão. Foi assumida como hipótese que a regressão das diferenças era igual a zero, apresentando assim a igualdade das curvas.

Figura 7 - Diagrama esquemático dos principais passos do programa de simulação de desempenho hidráulico em pivô central

Foram testados para os mesmos pontos da simulação e os pontos obtidos no campo, os modelos de regressão polinomial e potência, obtendo-se o fator de determinação R^2 . Da mesma maneira procedeu-se para os 88

dados (campo e simulação) agrupados em série de 0 e 1, sequencialmente, e obtidos os coeficientes de determinação.

Em seguida, foi efetuado o teste dos zeros para estes 88 dados de pressão, assumindo-se que as variáveis das equações fossem iguais a zero, indicando serem curvas iguais. Foram também determinados os valores do teste F (teste da variância) entre as curvas obtidas.

Tanto para o teste t quanto para o teste F, consideraram-se níveis de probabilidade de 5% e 1%, assumido-se diferenças entre as curvas para os resultados significativos de cada teste.

Com os resultados destes testes, foi possível escolher o modelo de ajuste para as curvas de pressão versus distância em cada uma das posições de ensaio.

3.7. Pressões máximas, médias e mínimas na lateral do pivô central

Após a escolha do modelo de regressão para as curvas de distribuição de pressão ao longo da lateral do sistema pivô central e determinadas as suas equações, foi possível localizar as cargas de pressão máximas, médias e mínimas em relação ao ponto do pivô.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da vazão

Na Tabela 5, são apresentados os resultados da determinação da vazão em várias situações da lateral do pivô no campo. Pode-se observar que ocorre uma pequena diferença entre os valores de vazão determinados na secção transversal da tubulação e aqueles determinados em r_3 , nas posições em que foram determinadas as vazões em r_3 . A diferença máxima ocorrida é de 2,98% para a vazão de 180 m^3/h (posição A) e a mínima é de 0,87% para a vazão de 194 m^3/h na posição F. Para as outras duas posições, tem-se 1,86% com vazão de 194 m^3/h (posição E) e 1,01% para vazão de 165 m^3/h (posição H). Estas pequenas variações estão de acordo com os relatos de SPINK (1967).

Os valores do coeficiente de velocidade apresentados (0,86 a 0,92), tem como valor médio 0,89. Este valor difere dos descritos por NEVES (1977), de 0,8 a 0,85, em 11,25% a 4,70% respectivamente. Uma vez que as vazões obtidas no centro da tubulação foram corrigidas pelo valor médio do coeficiente (0,89), tem-se a mesma faixa de variação em seus valores. Nas posições E, F, G e H da Tabela

5, é observado uma redução nos valores de vazão adotados após o uso do coeficiente médio, quando comparados com dados de campo, exceto para a posição E com a determinação na seção transversal, onde o valor é praticamente o mesmo.

Tabela 5 - Vazões do pivô central (m^3/h) determinadas no campo

POSIÇÃO *	VAZÃO SEÇÃO	VAZÃO (R3)	VAZÃO CENTRO	COEF. (Q_m/Q_c)	VAZÃO CORR.	POSIÇÃO PIVÔ NA ÁREA
A	174,4	179,6	201,9	0,86/0,89	180	pos.horizantal
B	-----	185,5	-----	-----	186	entre p.1 e p.2
C	-----	187,3	-----	-----	187	pos.2 do ensaio
D	-----	193,5	-----	-----	194	próx. a pos.4
E	193,9	197,5	217,8	0,89/0,91	194	próx. a pos.5
F	194,8	196,5	218,2	0,89/0,90	194	próx. a pos.6
G	-----	195,8	218,0	0.90	194	próx. a pos.6
H	168,6	170,3	185,7	0,91/0,92	165	P.6 c.reg.aber.

* - Posição de medição da vazão no campo

É possível observar pela Tabela 5, que a vazão com o pivô na posição horizontal do terreno ($Q = 180 m^3/h$), é inferior à vazão do pivô quando em aclave na área irrigada ($Q = 187 m^3/h$). Este acréscimo na vazão com o pivô na parte mais alta da área, pode ter ocorrido devido à mudança na maneira de operar o registro da bomba.

Somente algumas determinações de vazão foram efetuadas durante um mesmo dia, e mesmo assim houve a necessidade de se desligar o sistema entre estas determinações, colocando-se o mesmo em operação a seco.

Na unidade de bombeamento há um registro de gaveta comum, de operação manual do sistema e um outro

registro de gaveta de 8" com abertura automática por válvula solenóide, o qual é operado por rádio. Durante o primeiro dia de ensaio esta válvula foi operada automaticamente, tendo sido desativada após isso, e a bomba colocada em operação com o registro de gaveta de operação manual. Pode ter ocorrido a não abertura total do registro no primeiro ensaio ocasionando uma menor vazão para esta posição.

Observa-se também pela Tabela 5, que a medida que o pivô caminha para maiores declives, ocorre um aumento na vazão do sistema (de $187 \text{ m}^3/\text{h}$ para $194 \text{ m}^3/\text{h}$), o que é esperado.

4.2. Ensaio de perda de carga na lateral do pivô central

A determinação da perda de carga na lateral do pivô central foi efetuada em duas posições da área, porque os resultados da primeira determinação, a princípio, não pareciam ser bem representativos da realidade.

Os resultados dos ensaios de perda de carga obtidos com colunas de líquido, em duas condições de campo, são mostrados na Tabela 6.

Analisando os dados, nota-se que no primeiro vão do pivô há uma perda de carga menor que no segundo vão para as duas vazões consideradas. Embora ocorra maior vazão no primeiro vão, esta menor perda de carga é devido ao

comprimento do primeiro vão do pivô neste caso ser menor que o do segundo, e também por não estar sendo considerada uma transição entre vãos neste trecho, como acontece com os demais.

Tabela 6 - Dados de perda de carga na lateral do pivô

POS. PIVÔ (VÃO)	COMPR. VÃO (m)	CONDIÇÃO 1			CONDIÇÃO 2		
		LEITURA (mm)	PERDA DE CARGA (mca)	PERDA DE CARGA (mca/m)	LEITURA (mm)	PERDA DE CARGA (mca)	PERDA DE CARGA (mca/m)
1.º	47,866	1210	2,2990	0,0480	1245	2,3655	0,0494
2.º	50,588	1290	2,4510	0,0485	1425	2,7075	0,0535
3.º	50,588	1070	2,0330	0,0402	1155	2,1945	0,0434
4.º	44,535	729	1,3851	0,0311	750	1,4250	0,0320
5.º	44,535	584	1,1096	0,0249	610	1,1590	0,0260
6.º	44,535	425	0,8075	0,0181	585	1,1115	0,0250
7.º	44,535	84	0,1596	0,0036	210	0,3990	0,0090
8.º	50,588	37	0,0703	0,0014	42	0,0790	0,0016
L.B.	25,827	125	0,2375	0,0092	205	0,3895	0,0151
Perda total.....			10,553 mca.....	11,831mca			

condição 1: Vazão de $186 \text{ m}^3/\text{h}$

condição 2: Vazão de $194 \text{ m}^3/\text{h}$

Observa-se também que a partir do segundo vão do pivô em direção ao final de sua lateral, para ambas as vazões consideradas, há uma diminuição do valor da perda de carga, porque o sistema apresenta um mesmo diâmetro de tubulação até o oitavo vão (163 mm) e a vazão vai diminuindo a partir do pivô até sua extremidade final. Para o 9.º vão (lance em balanço) do sistema, há um acréscimo na perda de carga em ambas as vazões, devido ser este vão composto por tubulações com diâmetros menores (135 mm e 96

mm) que o resto da lateral do sistema. Mesmo sendo a vazão no lance em balanço menor, quando comparada aos outros vãos do sistema, seu menor diâmetro faz com que ocorra uma maior perda de carga.

A perda de carga total do sistema foi de 10,553 mca para vazão de $186 \text{ m}^3/\text{h}$ e de 11,831 mca para vazão de $194 \text{ m}^3/\text{h}$. Nestas condições, houve um aumento de 12,11% na perda de carga total do sistema para um acréscimo de 4,3% na vazão.

Ainda pela Tabela 6, nota-se que no 7.º vão do sistema ocorre uma perda de carga equivalente a 1,51% da perda de carga total para uma vazão de $186 \text{ m}^3/\text{h}$ e de 3,37% da perda de carga total para a vazão de $194 \text{ m}^3/\text{h}$. Pode ter ocorrido algum problema na tomada de pressão neste ponto, considerando que a metodologia usada foi a mesma.

Para o 8.º vão, observou-se haver uma perda de carga correspondente a 0,67% da perda de carga total do sistema para ambas as vazões, devido à pequena quantidade de água que passa pela tubulação do pivô de 163 mm de diâmetro. No lance em balanço, conforme já exposto, ocorre um sensível aumento na perda de carga representando 2,25% da perda de carga total para a vazão de $186 \text{ m}^3/\text{h}$ e 3,29% da perda de carga total para a vazão de $194 \text{ m}^3/\text{h}$.

O valor da perda de carga total estipulado em projeto foi de 6,71 mca para uma vazão de $182 \text{ m}^3/\text{h}$, com a lateral operando em nível no terreno. Ao se comparar com

a vazão de $186 \text{ m}^3/\text{h}$, obtida com a lateral do pivô em condição praticamente em nível, onde o valor da perda de carga foi de 10,553 mca, temos um acréscimo de 57,27% na perda de carga para uma variação de 2,20% a mais na vazão. Para a condição de vazão igual a $194 \text{ m}^3/\text{h}$, onde a perda de carga foi de 11,831 mca, a variação é de 76,32% a mais na perda de carga para um acréscimo de 6,59% de vazão. Não se dispõe de dados para a condição de vazão máxima ou de maior declividade do terreno ao longo da lateral do pivô, mas pode-se observar que ocorre uma variação na vazão e consequentemente na perda de carga no pivô a medida que a lateral caminha em direção a declives mais acentuados, mesmo fazendo-se uso de reguladores de pressão nos emissores.

4.3. Ensaio de pressão no pivô central

As Figuras 8 a 13, representam as distribuições de pressão ao longo da lateral do pivô central, para as seis posições de ensaio, obtidas pelo uso do programa de simulação desenvolvido por ZAGGO et alii (1990), e pelos dados de pressão lidos no campo com manômetro de Bourdon. É possível observar a curvatura dos vãos do pivô nas figuras citadas, tanto para os dados de pressão obtidos pelo programa quanto para os obtidos no campo.

Figura 8 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 1 do ensaio

Figura 9 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 2 do ensaio

Figura 10 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 3 do ensaio

Figura 11 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 4 do ensaio

Figura 12 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 5 do ensaio

Figura 13 - Distribuição de pressão na lateral do pivô central, na posição 6 do ensaio

De maneira geral, nota-se que os dados de pressão fornecidos pelo programa de simulação representam bem os valores medidos no campo, principalmente nas posições 1,2, e 4 (Figuras 8,9 e 11). Na posição 3 (Figura 10), ocorre uma pequena diferença entre as pressões simuladas e as pressões lidas no campo, a partir da metade da lateral do pivô, onde há uma variação na topografia do terreno conforme Figura 3, na qual é mostrado o perfil do terreno nas posições de ensaio.

Na posição 5 do ensaio de pressão (Figura 12), ocorre uma pequena diferença entre as pressões obtidas pelo programa e as pressões lidas no campo, próximo ao ponto do pivô. Esta posição do ensaio, embora não corresponda ao maior declive na área irrigada, representa a situação em que toda a lateral do pivô central se encontra em declive uniforme, permitindo ocorrer uma liberação de água maior em todos os emissores, mesmo sendo eles operados com regulador de pressão.

Mesmo assim, a diferença de pressão ocorrida no ponto do pivô entre a pressão simulada (385,69 kPa) e a obtida no campo (406,71 kPa), é de 21,02 kPa, ou 5,17% menor. Observando a curva de desempenho do regulador de pressão (Figura 1), nota-se que a variação de pressão de 21,02 kPa apresentada no ponto do pivô não altera a pressão de saída do regulador de pressão (próximas aos 172,3 kPa) para a curva de vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{hora}$, que é a requerida

pelos emissores nesta posição da lateral do pivô central, a fim de se aplicar uma lâmina de água uniforme em toda a sua extensão.

A posição 6 do ensaio de pressão (Figura 13), mostra a ocorrência de uma diferença aproximadamente uniforme entre os valores obtidos por simulação e aqueles lidos no campo, ao longo da lateral do pivô central, sendo que no ponto do pivô ela é de 5,38 kPa.

Pode ser observado também pelas Figuras 8 a 13, que o programa de simulação fornece dados de pressão na tubulação bem aproximados aos dados de campo, nas posições de ensaio em que a lateral do pivô se encontra em nível ou em aclave no terreno (posições 1 e 2), principalmente no ponto do pivô, e menores para as posições em que a linha lateral se encontra em condições de declive no terreno (posições 3, 5 e 6).

Uma vez que as pressões na extremidade da linha lateral do pivô determinadas no campo para as várias posições de ensaio, foram usadas no programa de simulação e que tal programa assume que o pivô é composto de válvulas reguladoras de pressão e emissores novos, o resultado das pressões obtidos na simulação devem ser menores ao longo da lateral, nas posições em que o pivô está operando em terreno em declive, pois a extremidade final da lateral se encontra em nível mais baixo que o ponto do pivô. É possível que esteja ocorrendo uma maior liberação de água

pelo pivô como um todo nestas posições, devido ao mau funcionamento dos reguladores de pressão ao longo do pivô.

Para as posições de ensaio onde a lateral do pivô opera em nível ou aclive no terreno, os valores de pressão no ponto do pivô são relativamente os mesmos, havendo uma pequena variação entre seus valores ao longo da lateral.

Na posição 4, há uma pequena diferença entre as pressões no ponto do pivô de 12,68 kPa, ao passo que ao longo da lateral estes valores se apresentam bem próximos entre si.

4.4. Ajuste dos dados de pressão nas posições de ensaio

Nas Figuras 14 a 19, são apresentadas as distribuições de pressão, bem como as respectivas equações de ajuste ao longo da lateral do pivô central, nas seis posições de ensaio.

É observado por estas curvas que o programa de simulação usado representou bem os dados de campo nas posições 1, 2 e 4. Nas posições 3, 5 e 6 os resultados se mostraram diferentes, muito embora as diferenças entre seus valores absolutos tenham sido pequenas.

$$Y(s) = 425,5577 - 0,6993 \cdot X + 0,0011 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,99$$

$$Y(c) = 428,3465 - 0,7572 \cdot X + 0,0012 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,99$$

Figura 14 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 1 do ensaio

$$Y(s) = 457,5989 - 0,8438 \cdot X + 0,0009 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,99$$

$$Y(c) = 453,7901 - 0,8642 \cdot X + 0,0010 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,99$$

Figura 15 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 2 do ensaio

$$Y(s) = 416,8011 - 0,9962 \cdot X + 0,0019 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,98$$

$$Y(c) = 420,7086 - 0,9694 \cdot X + 0,0019 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,97$$

Figura 16 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 3 do ensaio

$$Y(s) = 398,3035 - 0,6425 \cdot X + 0,0022 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,99$$

$$Y(c) = 409,4563 - 0,7162 \cdot X + 0,0023 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,98$$

Figura 17 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 4 do ensaio

$$Y(s) = 387,5614 - 0,3450 \cdot X + 0,0011 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,97$$

$$Y(c) = 408,6817 - 0,4371 \cdot X + 0,0012 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,94$$

Figura 18 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 5 do ensaio

$$Y(s) = 415,0806 - 0,2885 \cdot X + 0,0004 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,94$$

$$Y(c) = 421,9425 - 0,2861 \cdot X + 0,0004 \cdot X^2 \quad R^2 : 0,96$$

Figura 19 - Curvas ajustadas da distribuição de pressão,
na posição 6 do ensaio

Na Tabela 7 são mostrados os resultados dos testes t (comparação de médias) e F (análise de variância), usados para comparação das curvas de ajuste dos dados de pressão obtidos pelo programa de simulação e os dados medidos no campo durante a realização dos ensaios de pressão.

Tabela 7 - Resultados do ajuste polinomial de grau 2 das curvas de distribuição de pressão

PO	TESTE t			TESTE F			
SI	t calc.	t tabela		F calc.	F tabela		COEF.
ção		95%	99%		95%	99%	DETER.
1	-7,94**	2,02	2,70	8,14**	3,11	4,88	0,99
2	-2,91**	2,02	2,70	4,54*	3,11	4,88	0,99
3	13,62**	2,02	2,70	18,60**	3,11	4,88	0,98
4	-0,25	2,02	2,70	5,71**	3,11	4,88	0,99
5	3,10**	2,02	2,70	36,56**	3,11	4,88	0,96
6	8,95**	2,02	2,70	13,04**	3,11	4,88	0,95

Teste t, com 43 graus de liberdade

Teste F, com 82 graus de liberdade

** = Significativo a 1% de probabilidade

* = Significativo a 5% de probabilidade

Observa-se pela Tabela 7 que o teste t indica serem as curvas das posições 1, 2, 3, 5 e 6 diferentes estatisticamente umas das outras a nível de 1% de probabilidade, uma vez que os resultados deste teste foram significativos e a hipótese prevê que a regressão das diferenças entre as curvas é nula. Para a posição 4 o resultado foi não significativo, implicando ser a hipótese da nulidade verdadeira e assim tais curvas não diferem entre si.

Para o teste F, os resultados da Tabela 7

mostram que nas posições 1, 3, 4, 5 e 6 as curvas se apresentam diferentes estatisticamente a nível de 1% de probabilidade e na posição 2 há diferença estatística a nível de 5% de probabilidade. Portanto, estatisticamente pode-se concluir que as curvas de distribuição de pressão baseada nos dados fornecidos pelo programa de simulação não representam os dados obtidos no campo.

Quanto ao aspecto visual das curvas (Figuras 14 a 19) e verificando-se as pequenas diferenças de pressões entre os valores fornecidos pelo programa e os valores medidos, é possível concluir que o programa de simulação representa com precisão razoável o que ocorre no campo.

Os coeficientes de determinação apresentados na Tabela 7 para as curvas polinomiais de grau 2 das distribuições de pressão, a partir dos 88 dados de pressão (simulados e de campo), permitem deduzir que foram bons os ajustes obtidos para as seis posições de ensaio, sendo de 0,99 para as posições 1, 2 e 4 e de 0,98 para a posição 3. Nas posições 5 e 6 os valores são um pouco menores (0,96 e 0,95 respectivamente), mas mesmo assim são aceitáveis.

A Tabela 8 fornece os dados de pressão ao nível do solo, no ponto do pivô e na unidade de bombeamento, para as seis posições de ensaio.

Tabela 8 - Pressões obtidas durante os ensaios de campo

LOCALIZAÇÃO DO MANÔMETRO	POSIÇÕES DE ENSAIO					
	1	2	3	4	5	6
	PRESSÕES ¹					
PONTO DO PIVÔ	461	490	462	449	452	462
UNID. DE BOMBEAMENTO	911	926	901	891	891	901

¹ Expresso em kPa

Nota-se como esperado, que quando o pivô opera em aclives maiores, ocorre um aumento da pressão no ponto do pivô e na unidade de bombeamento, indicando uma redução da vazão (curva da bomba). O oposto ocorre, quando o pivô opera em condições de maiores declives na sua lateral. Há redução da pressão no pivô e na bomba, aumentando assim a vazão do sistema.

O pivô estudado tem reguladores de pressão em cada um dos seus emissores os quais apresentam uma curva de desempenho (Figura 1), e não apresenta aspersor-canhão em sua extremidade final. Portanto é de se esperar um aumento de vazão com a mudança de posição do principalmente para as condições de declividade do terreno, numa faixa de variação admissível da vazão dos reguladores. Esta variação na vazão deve ser de uma ordem de grandeza tal que não interfira nas condições iniciais de operação do sistema.

Na Tabela 9, são observados os valores de pressão no ponto do pivô e na unidade de bombeamento, lidas durante as determinações de vazão, bem como os dados de

perda de carga entre estes dois extremos da tubulação adutora, obtidos conforme eq. (15).

Tabela 9 - Pressões obtidas durante as determinações de vazão

VAZÃO DO SISTEMA (m ³ /h)	PRESSÃO PONTO PIVÔ (kPa)	PRESSÃO UN. BOMBEAMENTO (kPa)	PERDA DE CARGA (mca)
165	246,74	1087,57	49,85
180	448,76	891,44	9,25
186	486,91	920,86	8,36
187	495,54	935,57	9,18
194	446,80	891,44	9,45
194	441,89	891,44	9,95
194	455,62	891,44	8,55
194	445,62	891,44	8,55

A pressão na unidade de bombeamento manteve-se pouco alterada, variando entre 891,44 kPa e 935,57 kPa. O valor referente a vazão de 165 m³/h foi obtido com o registro da bomba parcialmente aberto, o que ocasionou uma perda de carga elevada, da ordem de 450% maior que nas demais situações.

Os valores de pressão obtidos na unidade de bombeamento, são dados aproximados devido a imprecisão do manômetro (escala com subdivisão de 5 mca) e por ocorrer vibração intensa do ponteiro durante a leitura da pressão, em função da operação da bomba.

Também devido a esses problemas, nota-se na Tabela 9, na coluna referente a perda de carga, uma pequena alteração em seus valores relativos a maiores vazões, às

vezes apresentando resultados maiores para perdas de carga quando se tem vazões menores. De maneira geral, como é de se esperar, percebe-se uma tendência de ocorrer maior perda de carga na adutora e menor pressão no ponto do pivô, para vazões mais elevadas.

4.5. Coeficiente de perda de carga

Na Tabela 10 são mostrados os valores das leituras em mm de líquido, obtidas do manômetro diferencial e valores de coluna de água, estimados pela equação (20).

Tabela 10 - Diferenças de pressão nos diferentes trechos entre tomadas

TOMADA	COMPOS. DO TRECHO	JUNTAS POR TRECHO	COMPRIM. TRECHO (mm)	DIFERENÇA DE PRESSÃO	
				mm LIQUIDO	MCA
1 - 2	T+J	1	2541	73	0,139
2 - 3	TL		4880	105	0,200
3 - 4	T+J	1	2741	86	0,163
4 - 5	TL		2540	59	0,112
5 - 6	T+J	1	2341	80	0,152
6 - 7	TL		4880	87	0,165
7 - 8	T+J	1	2741	75	0,143
8 - 9	T+J	1	7623	200	0,380
9 - 10	T+J	1	2541	88	0,167
10 - 11	TL		5080	74	0,141
11 - 12	TRT		2722	88	0,167
12 - 13	TL		5080	115	0,219
13 - 14	T+J	1	2338	47	0,089

T+J = tubo liso + junta entre os tubos

TL = tubo liso

TRT = transição entre os vãos

Os valores das diferenças de pressão para

tubos lisos foram somados, resultando num valor de 440 mm de líquido, bem como os respectivos comprimentos dos trechos com tubo liso, totalizando 22,460 metros. O mesmo foi feito para as leituras entre tubo liso mais junta que resultou num valor de 602 mm de líquido, com um comprimento de 20,528 metros. A partir daí, foi determinado o comprimento equivalente, em tubo liso (tomado como padrão), considerando a tubulação em nível, da seguinte forma:

22,460 metros de tubo liso.....	440 mm de líquido
20,528 metros de tubo liso + junta.....	X mm de líquido

O valor de X é de 402 mm de líquido em tubo liso, num comprimento equivalente de tubo liso + junta.

Do total de 602 mm de líquido em tubo liso + junta, lidos no manômetro diferencial em 20,528 metros de tubo liso + junta, foram subtraídos 402 mm de líquido de tubo liso, obtendo-se 200 mm de líquido em 6 juntas (soma total de juntas consideradas) ou 33 mm/junta.

O comprimento total do 1.º vão (tubos + juntas) do pivô com 8 tubos de 6 metros de comprimento cada um é de 50,021 metros, ou 7 juntas, que resulta num total de 231 mm de líquido referentes a juntas. O valor em tubo liso no 1.º vão corresponde a:

22,460 metros de tubo liso.....	440 mm de líquido
50,021 metros de tubo.....	Y mm de líquido

O valor obtido desta relação foi de 980 mm de líquido em tubo liso, no 1.º vão. Em seguida foram

somados os 980 mm referentes a tubo liso com os 231 mm de líquido referentes a juntas, e obtidos 1211 mm de líquido total, que pela equação (20) dá um valor de 2301 mm de água, ou ainda 2,301 mca.

Nas Tabelas 11 e 12, são apresentados os valores do coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams, obtidos respectivamente pelas eq. (19), (21) e (22), para a linha lateral e tubulação adutora do pivô central.

Tabela 11 - Coeficiente de perda de carga na lateral do pivô central

POSICÃO DA LATERAL NO CAMPO	METODOLOGIA USADA PARA DETERMINAÇÃO	VAZÃO MEDIDA (m ³ /h)	COEFIC. P. CARGA (C)
Horizontal	primeiro vão	180	111,52
Entre a P.1 e a P.2	determ.perda carga	186	113,34
P.6 do ensaio	determ.perda carga	194	111,13

P.1, P.2 e P.6 = posições de ensaio de pressão no campo

Tabela 12 - Coeficiente de perda de carga na adutora do pivô central

VAZÃO (m ³ /h)	165	180	186	187	194	194	194	194
COEF. (C)	45,0	122,0	133,1	127,3	130,0	126,4	137,2	137,2
H.W.								

Como se observa na Tabela 11, entre os valores do coeficiente C (113,34 e 111,13) na lateral do pivô, obtidos pela mesma metodologia, ocorre uma variação de 1,99%. A diferença em termos percentuais entre o valor

máximo obtido (113,34) e o valor obtido quando se usou apenas o primeiro vão do pivô para sua determinação (111,52) é de 1,63%. Como os três valores determinados são bem semelhantes, tem-se uma boa margem de segurança para uso no programa de simulação. O valor do coeficiente C, em termos do estudo foi considerado como a média entre os três, o que resultou em C igual a 112.

O valor médio considerado ($C = 112$) é 10,4% menor que o valor usado no projeto ($C = 125$). Isto mostra que pode estar ocorrendo problemas nas juntas de alguns tubos do pivô conforme relatados por BRASIL⁶. Este valor pode diminuir com o aumento da perda de carga devido ao desalinhamento da tubulação, além do grande número de juntas no pivô, apresentando valores menores que para tubos lisos e novos.

Os valores do coeficiente C de perda de carga da adutora conforme mostrados na Tabela 12, apresentam-se com uma variação de 12,46% entre os valores máximo (137,2) e o mínimo (122) obtidos, excetuando o valor de 45, onde ocorreu uma perda de carga elevada em função do fechamento do registro da bomba. Observa-se também, que para mesmos valores de vazão houve variação no coeficiente

⁶ BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola. Determinação da perda de carga ao longo de dois pivôs centrais marca Dantas de propriedade da Fazenda Bela Vista Ltda. Sorocaba, 1990. 24p. (Relatório 1130/90 S1).

C. Isto ocorreu provavelmente devido às diferenças nos valores de perda de carga obtidos, conforme Tabela 9, onde as maiores perdas de carga representam menores valores para o coeficiente C de Hazen-Williams.

O coeficiente C de perda de carga adotado é um valor médio entre os constantes da Tabela 12, sem considerar o referente à vazão de $165 \text{ m}^3/\text{h}$, que representa uma condição especial de elevada perda de carga no registro da bomba. Assim, valor de C é 130,5, adotando-se para cálculos o valor 131. Este valor difere do adotado em projeto ($C = 140$), para tubo de fibrocimento, numa ordem de grandeza 6,43% menor, o que pode ser explicado pelo grande número de peças especiais que existem no conjunto de saída da bomba e mesmo ao longo da adutora do pivô central, instalados exclusivamente para ocasionar perda de carga, uma vez que o diâmetro do rotor da bomba não foi usinado, conforme solicitado no projeto.

4.6. Altura manométrica total

Na Tabela 13, observam-se os valores de vazão com as respectivas alturas manométricas totais determinadas a partir dos dados de perda de carga no conjunto de sucção e na adutora, obtidos para cada caso e também os dados de catálogo para os rotores 265 mm e 255 mm.

Tabela 13 - Altura manométrica total da bomba

VAZ. ¹	0	165	180	186	187	194	194	194	194
Hman. ²	1564	1106	911	940	955	912	912	912	912
Hman. ³	1475	1000	934	894	890	855	855	855	855
Hman. ⁴	1608	1138	1067	1036	1032	992	992	992	992

¹ vazão expressa em m³/h

² Altura manométrica total da bomba em kPa, lida no campo

³ Altura manométrica total da bomba em kPa, rotor= 255 mm

⁴ Altura manométrica total da bomba em kPa, rotor= 265 mm

Na Figura 20 mostra-se a localização dos pontos referentes às alturas manométricas obtidas durante as determinações de vazão no campo em comparação aos dados fornecidos em catálogo, pelo fabricante da bomba.

Não foi efetuada a determinação do diâmetro dos rotores da bomba, assumindo-se verdadeiros os valores fornecidos pelo proprietário (D = 265 mm). Para efeito de comparação foi feita a curva de pressão versus vazão, referente ao diâmetro de 255 mm.

Conforme se observa na Tabela 13 e na Figura 20, os valores obtidos encontram-se abaixo da curva do diâmetro original de 265 mm. Deve-se novamente frisar que as leituras de pressão na bomba, foram efetuadas com um manômetro de precisão relativamente baixa e que a bomba não é nova, além do conjunto de sucção estar subdimensionado (velocidade da água na faixa de 2,0 a 2,25 m/s).

Figura 20 - Curvas ajustadas de vazão versus pressão, da bomba WKL 100/4

Pela localização dos pontos obtidos no campo, apresentados na Figura 20, nota-se uma certa tendência dos mesmos em acompanhar as curvas referentes aos diâmetros de 255 mm e 265 mm, localizado-se em pontos intermediários. O valor obtido para vazão de 180 m³/h mostra-se discrepante em relação aos demais, vindo reforçar a hipótese de que o registro da bomba não deveria estar totalmente aberto durante a determinação da vazão, conforme discutido no item 4.1.

4.7. Pressões máxima, média e mínima na lateral do pivô central

Na Tabela 14, são mostrados os valores de pressão máxima, média e mínima, bem como suas respectivas posições ao longo da lateral, em relação ao ponto do pivô, determinados pelas curvas de ajuste polinomial de grau 2, para as várias posições de ensaio.

Tabela 14 - Valores de pressão ao longo do pivô central

PO SI ção	PRESSÃO MÁXIMA		PRESSÃO MÍNIMA		PRESSÃO MÉDIA		
	VALOR (kPa)	DIST. (m)	VALOR (kPa)	DIST. (m)	VALOR (kPa)	DISTÂNCIA (m)	
1A	425,56	P.pivô	314,51	317,73	341,57	387,11	248,35
1B	428,35	P.pivô	308,96	315,42	338,84	375,17	255,67
2A	457,60	P.pivô	259,73	468,89	336,92	-----	314,51
2B	453,79	P.pivô	267,17	432,00	334,55	-----	297,23
3A	416,80	P.pivô	286,27	262,11	320,61	330,78	193,43
3B	420,71	P.pivô	297,16	255,00	328,21	317,10	192,91
4A	506,00	405,00	351,57	156,83	391,29	226,08	66,19
4B	498,29	405,00	353,74	155,65	391,19	230,56	80,75
5A	431,71	405,00	360,51	156,82	379,22	194,24	119,40
5B	425,20	405,00	366,89	182,08	384,92	218,14	146,03
6A	415,08	P.pivô	363,24	360,00	380,87	395,26	324,74
6B	421,94	P.pivô	370,82	357,50	385,36	386,59	328,42

A- Dados de pressão simulados pelo programa

B- Dados de pressão lidos no campo

*- Posição de ensaio no campo

Como se pode observar, a pressão máxima na maioria dos casos é obtida na entrada da lateral do pivô

exceto para as posições 4 e 5 que corresponde aos maiores declives na área irrigada. Pode ser observado também pela Tabela 14 que as diferenças entre as pressões máximas obtidas por simulação e as lidas no campo são muito pequenas sendo que seu maior valor é 7,71 kPa para a posição 4 do ensaio.

Quanto às pressões mínimas obtidas, a posição 2 apresenta os menores valores, os quais estão localizados próximos à extremidade final da lateral do pivô conforme já esperado, por ser esta a posição de maior aclave na área ao longo da lateral. As pressões mínimas com valores mais elevados, correspondem à posição 6 do ensaio com uma diferença entre a obtida por simulação e a lida no campo de 7,58 kPa.

Para as pressões médias, tem-se as posições 4, 5 e 6 como aquelas que apresentam os maiores valores, justamente por serem estas posições as que apresentam as mais altas pressões ao longo da lateral. Nestes casos, há normalmente duas posições na lateral com pressões médias, devido as curvas serem do tipo polinomial de grau 2. A posição 2 do ensaio por representar a situação de maior aclave ao longo de toda a lateral do pivô tem um único ponto em que ocorre a pressão média na lateral, sendo que o segundo ponto corresponde a uma posição que se encontra fora do limite correspondente ao raio irrigado do pivô.

Observa-se na Tabela 14 (dados de pressões

simuladas e pressões lidas no campo ao longo da lateral do pivô central), que os valores de pressões máximas, médias e mínimas, bem como as suas respectivas localizações na lateral do pivô central, não se apresentam muito diferentes. Isto prova que o programa de simulação usado representa bem a distribuição de pressão em pivô central operando em condições de topografia variável do terreno.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da análise do desempenho hidráulico do pivô central estudado, operando em condições de topografia variável do terreno, permitem concluir o seguinte:

a) Considerando as posições de aclividade e declividade máximas da linha lateral do pivô na área irrigada, houve uma variação de 3,7% na vazão total do sistema ($187 \text{ m}^3/\text{h}$ e $194 \text{ m}^3/\text{h}$). Para estas condições, as vazões estimadas diferem do valor adotado em projeto ($182 \text{ m}^3/\text{h}$), respectivamente em 2,7% e 6,6%.

b) Houve pequena variação entre os resultados de vazão obtidos usando-se a seção da tubulação como um todo e as vazões usando o raio r_g (raio a 70% do diâmetro) da tubulação. Esta variação foi de 0,87% a 2,98%, para os casos estudados.

c) Ocorreu uma variação nos valores de perda de carga ao longo da lateral do pivô central para um dado vão, quando se mudou a topografia do terreno, e este valor nem sempre

foi proporcional à vazão obtida, o que pode ser ocasionado por uma maior ou menor perda de carga nas juntas de união entre os tubos do vão.

d) Os valores do coeficiente C de perda de carga obtidos, foram sempre menores que os valores fornecidos em projeto ou pelo fabricante da tubulação, o que indica estar ocorrendo uma maior perda de carga no sistema.

e) O sistema pivô central estudado está operando com pressão de 316,96 kPa na extremidade final, quando a linha lateral está em aclave máximo. Isto corresponde a um valor 61,70% maior que a pressão necessária ao funcionamento adequado dos reguladores de pressão nesta posição da lateral (pressão de projeto é de 196,02 kPa), o que ocasiona um maior consumo de energia.

Como sugestão para trabalhos futuros, salienta-se a necessidade de se efetuarem ensaios de desempenho hidráulico em todos os sistemas pivô central instalados, principalmente aqueles com algum tempo de uso, buscando detectar e solucionar os possíveis problemas. Há também a necessidade de caracterizar além do desempenho hidráulico, o desempenho operacional (velocidade, precipitação) do sistema, para um melhor entendimento das causas de operação inadequada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSY, T.M. O emprego da fórmula universal de perda de carga e as limitações das fórmulas empíricas. São Paulo, CETESB, 1977. 64p.

AZEVEDO NETO, J.M. & ALVAREZ, G.A. Manual de hidráulica. 6.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 2v.

BERNUTH, R.D. von & BAIRD, D. Characterizing pressure regulator performance. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 33(1): 145-50, 1990.

BITTINGER, M.W. & LONGENBAUGH, R.A. Theoretical distribuiton of water from a moving irrigation sprinkler. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 5(1): 26-30, 1962.

CAMARGO, A.P.; PINTO, H.S.; BRUNINI, O.J.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R. Climas do estado de São Paulo. In: SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura. Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo. São Paulo, 1974. v.1, cap.2, p.51-87.

CHU, S.T. & MOE, D.L. The hidráulics of a center pivot systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15(5): 894-6, 1972.

EDLING, R.J. Variation of center pivot operation with field slope. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22(5): 1039-43, 1979.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Sprinkle irrigation. Washington, 1983. cap.11, 121p. (National Engineering Handbook. Irrigation, 15).

GILL, A.B. Power plant performance. London, Butterworth, 1984. 638p.

GILLEY, J.R. Friction correction factor for center pivot irrigation systems; discussion. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. New York, 115(4): 769-70, 1989.

GILLEY, J.R.; MIELKE, L.N.; WILHELM, W.W. An experimental center-pivot irrigation system for reduced energy crop production studies. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 26(3): 1375-9, 1385, 1983.

HEERMANN, D.F. & HEIN, P.R. Performance characteristics of self propelled center pivot sprinkler irrigation systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 11(1): 11-5, 1968.

HEERMANN, D.F. & KOHL, R.A. Fluid dynamics of sprinkler systems. In: JENSEN, M.E. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1983. cap.14, p.583-660. (ASAE Monograph, 3).

JAMES, L.G. Modeling the performance of center pivot irrigation systems operating on variable topograph. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(1):143-9, 1982.

JAMES, L.G. Effects of pump selection and terrain on center pivot performance. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(1): 64-8, 72, 1984.

KINCAID, D.C. & HEERMANN, D.F. Pressure distribution on a center pivot sprinkler irrigation systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 13(11): 556-8, 1970.

LENCASTRE, A. Manual de hidráulica geral. São Paulo, Edgard Blücher; EDUSP, 1972. 411p.

LINSLEY, R.K. & FRANZINI, J.B. Engenharia de recursos

- hídricos. São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil; EDUSP, 1978. 768p.
- NEVES, E.T. Curso de hidráulica. 5. ed.. Porto Alegre, Ed. Globo, 1977. 577p.
- PAIR, C.A. Sprinkler irrigation. 4. ed. Maryland, The Irrigation Association, 1975. 615p.
- PEROLD, R.P. Design of irrigation pipe laterals with multiple outlets. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 103(IR 2): 179-95, June 1977.
- REDDY, J.M. & APOLAYO, H. Friction correction factor for center pivot irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 114(1): 183-5, Feb. 1988.
- ROLLAND, L. Mechanized sprinkler irrigation. Rome, FAO, 1982. 409p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 35).
- RUSSEL, G.E. Flow through pipes. In: _____. Hydraulics. 5. ed. New York, Henry Holt, 1942. cap.8, p.180-266.

SCALOPPI, E.J. Hidráulica de tubulações com múltiplas derivações. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. Anais. Brasília, ABID, 1986. p.1085-100.

SCALOPPI, E.J. Adjusted "F" factor for multiple-outlet pipes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 114(1): 169-74, Feb.1988.

SPINK, L.J. Principles and practice of flow meter engineering. 9.ed. Foxboro, The Foxboro Co., 1967. 575p.

STREETER, V.L. & WYLIE, E.B. Mecânica dos fluidos. 7. ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1982. 585p.

SWAMEE, P.K. & JAIN, A.K. Explicit equations for pipe flow problems. Journal of the Hydraulics Division, New York 102(HY5): 657-64, May. 1976.

ZAGGO, S.P.; COLOMBO, A.; GIL, O.F. Desempenho de válvulas reguladoras de pressão utilizadas em sistemas pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., Piracicaba, 1990. Resumos. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Engenharia Rural, 1990. p.38.