

**OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, LOCALIZAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO MECANIZADOS TIPO PIVÔ-CENTRAL**

RENATO SOLIANI

Orientador: Prof. Dr. MIGUEL TAUBE NETTO

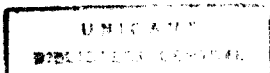
Co-orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

**Tese de Doutorado apresentada ao Departamento
de Matemática Aplicada do Instituto de
Matemática, Estatística e Ciência da
Computação da Universidade Estadual de
Campinas como requisito parcial para a
obtenção do título de DOUTOR em Ciências em
Matemática Aplicada.**

C A M P I N A S

Estado de São Paulo - Brasil

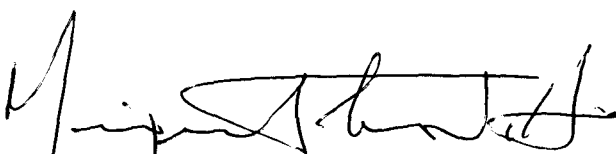
Março - 1995



OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO, LOCALIZAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO MECANIZADOS TIPO PIVÔ-CENTRAL

Este exemplar corresponde a redação final da tese devidamente corrigida e defendida pelo Sr. Renato Soliani e aprovada pela Comissão Julgadora.

Campinas, 10 de março de 1995.



Prof. Dr. Miguel Taube Netto
Orientador

Tese apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, como requisito parcial para obtenção do Título de DOUTOR em Ciências em Matemática Aplicada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel Taube Netto pela orientação sempre segura, amizade e confiança;

Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzzone pelo auxílio e incentivo recebidos;

Ao pessoal técnico da Carborundum S/A, em especial ao Eng^o Fernando S. Mantoanelli, pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho;

A todos que nos auxiliaram e incentivaram nesta caminhada.

SUMÁRIO

	p.
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. O problema e sua importância.....	2
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo geral.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
2. Revisão da literatura.....	9
2.1. Considerações gerais.....	9
2.2. Histórico.....	10
3. Material e Métodos.....	15
3.1. Pressupostos de trabalho.....	15
3.2. Hipóteses de trabalho.....	15
3.3. Características gerais do equipamento pivô-central....	16
3.4. Lay-out de um pivô-central.....	17
3.5. Hidráulica do pivô-central.....	21
3.6. Otimização do diâmetro da adutora.....	33
3.6.1. A função objetivo.....	34
3.6.1.1. A componente da tubulação adutora.....	41
3.6.1.2. A componente de ponto pivô.....	43
3.6.1.3. A componente da linha lateral.....	43

3.6.1.4. A componente do motor.....	44
3.6.1.5. A componente da bomba centrífuga.....	45
3.6.1.6. A componente da rede elétrica.....	46
3.6.1.7. A componente da energia.....	47
3.6.2. Restrições do modelo.....	49
3.7. Localização ótima de pivôs-centrais.....	61
3.7.1. As restrições do modelo.....	61
3.7.2. A função objetivo.....	67
3.8. Planejamento da irrigação para setores de pivôs-centrais	79
3.8.1. Elementos básicos para a formulação do problema de planejamento da irrigação para setores de pivôs-centrais	80
3.8.2. O balanço hídrico diário para o pivô-central.....	82
3.8.3. Formulação do problema de planejamento da irrigação para setores de pivôs-centrais.....	84
3.8.4. Um modelo discreto para a programação da irrigação de setores de pivôs-centrais.....	100
3.9. Gerenciamento da água destinada à irrigação.....	111
3.9.1. O problema do gerenciamento da água disponível.....	112
3.9.2. Formulação do problema do gerenciamento da água disponível para a irrigação.....	112
4. Resultados e discussão.....	117
4.1. Sobre a metodologia de calculo da perda de carga em	

linhas laterais e dimensionamento econômico de	
adutoras de pivôs-centrais.....	117
4.2. Sobre a localização de pivôs-centrais.....	119
4.3. Sobre o planejamento da irrigação para setores de	
pivôs-centrais.....	120
4.4. Sobre o gerenciamento da água disponível para os	
pivôs-centrais.....	121
5. Conclusões.....	123
6. Referências bibliográficas.....	125
7. Bibliografia complementar.....	128
8. Apêndice.....	131
8.1. Aspectos gerais da Engenharia de Irrigação.....	131
8.2. Dimensões utilizadas para os pivôs-centrais.....	135
8.3. A questão energética.....	137
8.4. Características do sistema de energia elétrica do	
Brasil.....	138
8.5. Tarifas de energia elétrica vigentes no Brasil.....	141

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de desenvolver modelos de Programação Matemática que possam auxiliar no planejamento de projetos de "sistemas de irrigação por aspersão tipo pivô-central", com enfoque no dimensionamento, localização e operação.

O modelo que determina o diâmetro econômico da adutora do pivô-central tem como objetivo minimizar a somatória do custo fixo total com o custo energético, tomados em base anual. As restrições estabelecidas envolvem perda de carga, velocidade do fluxo de água e vazão do sistema. São obtidas soluções trabalhando com perda de carga calculada pelas fórmulas Universal e de Hazen-Williams. Uma comparação com dados de fabricante também é feita.

O modelo de localização de pivôs-centrais tem como objetivo maximizar a área total irrigada. São estudadas situações envolvendo pequenas áreas de fronteira irregular, por ser esta a situação mais usual e que oferece problemas em relação à localização. As restrições operacionais evitam a superposição da área irrigada pelos equipamentos.

O modelo para elaborar o planejamento da irrigação para os setores de pivôs-centrais visa maximizar a eficiência dos mesmos ou de modo equivalente, a obtenção do máximo lucro em unidades monetárias por unidade de volume de água empregada. As restrições controlam a umidade do solo entre valores

pré-determinados ao mesmo tempo que compatibilizam o volume de água disponível com as necessidades hídricas em cada setor.

O modelo para gerenciar a água que é destinada à irrigação fornece um programa para o acionamento dos pivôs-centrais segundo os dias e turnos de operação num dado horizonte de planejamento, atendendo as restrições de disponibilidade, minimizando o custo total de operação.

Neste trabalho são obtidos modelos de programação matemática com estruturas particulares tais como "packing problem" e "Dantzig - Wolfe". São utilizados programas computacionais comerciais na resolução, uma vez que a especialização de algoritmos ou desenvolvimento de heurísticas, não foi objeto deste estudo.

ABSTRACT

The objective of this work is the development of models for Mathematical Programming to be utilized as tools in the planning of center pivot systems for irrigation. Emphasis is given on design, location and operation.

The first model developed to evaluate the economic diameter of the center pivot main line has as objective to minimize the fixed cost plus energetic cost in annual basis. Established restrictions include head loss, velocity and flowrates. Solutions are based on the Universal and Hazen-Williams equations. Results are compared with those by catalogs.

The second model developed to localize the center pivot has the objective of maximize the total irrigated area. The main application is for irregularly shaped fields which is the most common situation. Operational restrictions avoid the overlapping of irrigated areas.

The third model developed to plan the center pivot sectors aims to maximize efficiency. Restrictions are set to control soil humidity in a pre determinated range.

The last model has the objective of irrigation water management and gives a program for the center pivot system operation according to a established schedule and try to minimize the total cost operation.

Also, particular structures of mathematical programming

models like "packing problem" and "Dantzig-Wolfe" are obtained. Commercial softwares are utilized to solve the above models, since the initial objective was not to develop algorithms or heuristics.

Relação de Símbolos

Símbolo	Significado
A	Área irrigada (ha).
AA	Altura dos aspersores (m) (AA = 4 m).
A_{is}	Área do setor s, do pivô-central i (ha).
A_j	Custo anual de um componente no ano j (US\$/ano).
A_o	Custo estimado do componente considerado no presente, (US\$).
AS	Altura de sucção (m).
C	Coeficiente cujo valor depende da natureza e estado das paredes do tubo.
CA	Custo anual.
CC	Teor de água no solo suposto na capacidade de campo, em relação ao peso seco, (%).
$c(d_i)$	Custo unitário da tubulação adutora de diâmetro interno d_i (US\$/m).
$C(k)_{ij}$	Custo total de operação do pivô-central i durante o ciclo j, no turno k, (US\$).
C_{kwh}	Custo unitário da energia (US\$/kwh).
$c(L_{sk})$	Custo unitário da linha lateral ao se utilizar vão do tipo k, comprimento L_{sk} e diâmetro interno do tipo s (US\$/m).
CMB	Custo do conjunto motor-bomba (US\$).
CPP_k	Custo do ponto pivô de diâmetro k (US\$).
CRE	Custo da rede elétrica (US\$/m).

CT_i	Espaço percorrido pela última torre do pivô-central i , numa rotação completa (m).
D	Diâmetro interno da tubulação (m).
DA	Desnível geométrico entre a moto-bomba e o ponto pivô (m).
ΔZ	Desnível geométrico do ponto pivô ao ponto mais alto da área a ser irrigada (m).
Dg	Densidade global do solo, (g/cm^3).
$D(k)_j$	Disponibilidade em volume de água no ciclo j , no turno k (m^3).
E	Energia consumida (kwh).
E_i	Eficiência da irrigação (em torno de 85% para pivô-central).
E_{mb}	Eficiência do conjunto motor-bomba ($E_{mb} = \eta_m \cdot \eta_b$)
EP_i	Eficiência de aplicação do pivô-central i (%).
$E(Q, H)$	Custo anual da energia de bombeamento (US\$/ano).
$E(Q_{i,j,k}, H_o^{s1jk})$	Custo da energia elétrica para operação dos sistema em base anual, como função da vazão $Q_{i,j,k}$ e altura manométrica total H_o^{s1jk} (US\$/ano).
ETR_{isj}	Evapotranspiração média estimada para a cultura do pivô-central i , setor s , ciclo j (mm).
f	Coeficiente de perda de carga.
F	Fator de Christiansen, $0 < F \leq 1$.
$F_{pc}(m, n)$	Fator de perda de carga numa tubulação com n saídas sendo m o expoente da velocidade média da fórmula

	utilizada para o cálculo da perda de carga.
FRCM	Fator de recuperação de capital modificado.
FRC _x	Fator de recuperação de capital associado ao componente x do sistema.
g	Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).
γ	Peso específico do líquido ($\gamma_{\text{água}} = 9.806,65 \text{ N/m}^3$).
h	Lâmina média anual requerida pela cultura a ser irrigada (m/ano).
η_b	Rendimento da bomba (%).
η_m	Rendimento do motor (%).
H	Altura manométrica de bombeamento (m).
H_f	Perda de carga por atrito numa tubulação.
H_{fa}^{ijk}	Perda de carga devida ao atrito na tubulação adutora de comprimento L, com diâmetro interno d_i , abastecendo um pivô-central formado por j torres justapostas, cada uma delas de comprimento L_{sk} (m).
H^{isj}	Lâmina hídrica líquida aplicada pelo pivô-central i, no setor s, no ciclo j (mm).
Hman	Altura manométrica total (m).
H_{ms}	Perda de carga por atrito numa tubulação com múltiplas saídas (mca).
H_O^{sijk}	Altura máxima de pressão na fonte (m).
H_{fl}^{sjk}	Perda de carga devida ao atrito na linha lateral do pivô-central formado por j torres justapostas de comprimento L_{sk} (m).

H_{t_e}	Perda de carga por atrito na tubulação equivalente (mca)
i	Taxa anual de juros (%).
J	Perda de carga unitária (m/m).
J_{1jk}	Gradiente hidráulico unitário de perda de carga por atrito na tubulação adutora de diâmetro interno d_1 , abastecendo um pivô-central formado por j torres justapostas, com vãos de comprimento L_{sk} , (m/m).
K	Constante de uniformização de unidades (10,643 para o sistema MKS).
L	Comprimento total da tubulação adutora (m).
L_b	Lâmina bruta aplicada pelo pivô-central (mm).
$L_{b_{1sj}}$	Lâmina hídrica bruta aplicada pelo pivô-central 1, no setor s , no ciclo j , (mm).
L_m	Lâmina média anual aplicada pelo equipamento (m/ano).
ν	Viscosidade cinemática do líquido transportado (m/s).
m	Expoente da velocidade média na fórmula de perda de carga hidráulica considerada.
n	Número de emissores da linha lateral do pivô-central.
N	Vida média útil de um equipamento (anos).
P_j	Valor presente do custo anual A_j (US\$).
Pe_j	Precipitação média provável para o dia j (mm).

PL	Perdas de carga localizadas (m).
$P_{p_{isj}}$	Perda por percolação no pivô-central i , setor s , ciclo j (mm).
PS	Pressão de serviço nos aspersores (mca).
Q	Vazão do sistema (m^3/s).
Q_{ijk}	Vazão necessária na adutora de diâmetro interno d_i , para abastecer um pivô-central formado por j torres justapostas, com vãos de comprimento L_{sk} (m^3/s).
r	Profundidade do sistema radicular (cm).
R_{sjk}	Raio do pivô-central composto de j torres de vão L_{sk} (m).
Ru_{isj}	Escoamento superficial no pivô-central i , setor s , ciclo j (mm).
T	Comprimento da rede elétrica (m).
$T_{i_{min}}$	Tempo mínimo possível para uma rotação completa do pivô-central i (h).
UC	Umidade crítica do solo, (%).
v	Velocidade média da água na seção do tubo (m/s).
V	Volume de água bombeada (m^3).

Relação de Figuras

Figura	Título	Pg.
Figura 1.	Elementos básicos de um pivô-central.	18
Figura 2.	Distâncias ao ponto pivô e áreas irrigadas por um pivô-central de 10 torres.	19
Figura 3.	Vazões e velocidades da água ao final de cada vão de um pivô-central de 10 torres.	20
Figura 4.	Tubulação com múltiplas saídas e sua equivalente.	26
Figura 5.	Esquema de vazões da linha lateral.	27
Figura 6.	Área em estudo para localização de pivôs-centrais	62
Figura 7.	Representação do pivô-central com escala igual ao raio irrigado.	65
Figura 8.	Representação do pivô-central com escala igual a 1/5 do raio irrigado.	66
Figura 9.	Localização ótima para um pivô-central (Tab 25).	72
Figura 10.	Localização ótima para dois pivôs-centrais (Tab 25).	73
Figura 11.	Localização ótima para três pivôs-centrais (Tab 25).	74
Figura 12.	Localização ótima para quatro pivôs-centrais (Tab 25).	75
Figura 13.	Localização ótima para um pivô-central (Tab 26).	76
Figura 14.	Localização ótima para dois pivôs-centrais (Tab 26).	77
Figura 15.	Localização ótima para três pivôs-centrais (Tab 26).	78
Figura 16.	Curva de carga para o sistema num dia útil.	139
Figura 17.	Comportamento do consumo/demanda de energia num ano.	140

Tabelas

Tabela	Título	Pg.
Tabela 1.	Valores do fator de perda de carga F_{pc}	32
Tabela 2.	Vida média útil do componentes de um pivô-central	35
Tabela 3.	Valores do fator de recuperação de capital	38
Tabela 4.	Valores do fator de recuperação de capital modificado	40
Tabela 5.	Custos de canalização da tubulação adutora	42
Tabela 6.	Relação entre diâmetros interno e nominal	42
Tabela 7.	Custos do ponto-pivô	43
Tabela 8.	Dimensões e custos das torres da linha lateral	43
Tabela 9.	Custos de motores elétricos WEG	45
Tabela 10.	Modelos e custos de bombas centrífugas KSB	45
Tabela 11.	Custos de chaves de partida elétricas	46
Tabela 12.	Custos dos transformadores	47
Tabela 13.	Limite máximo para o número de torres - Lb 6mm	53
Tabela 14.	Limite máximo para o número de torres - Lb 8mm	53
Tabela 15.	Limite máximo para o número de torres - Lb 10mm	53
Tabela 16.	Limite máximo para o número de torres - Lb 12mm	54
Tabela 17.	Soluções ótimas dos problemas P_{jk} - Lb 6mm	57
Tabela 18.	Soluções ótimas dos problemas P_{jk} - Lb 8mm	57
Tabela 19.	Soluções ótimas dos problemas P_{jk} - Lb 10mm	58
Tabela 20.	Soluções ótimas dos problemas P_{jk} - Lb 12mm	58
Tabela 21.	Soluções adotadas pela Carborundum S/A - Lb 6mm	59
Tabela 22.	Soluções adotadas pela Carborundum S/A - Lb 8mm	59
Tabela 23.	Soluções adotadas pela Carborundum S/A - Lb 10mm	60

Tabela 24. Soluções adotadas pela Carborundum S/A - Lb 12mm	60
Tabela 25. Localização ótima dos pivôs-centrais $b_{ij} = -(i^2+j^2)$	71
Tabela 26. Localização ótima dos pivôs-centrais $b_{ij} = -j$	71
Tabela 27. Produção média de culturas irrigadas e não irrigadas	133
Tabela 28. Dimensões de pivôs-centrais - vão curto ($k = 1$)	135
Tabela 29. Dimensões de pivôs-centrais - vão médio ($k = 2$)	136
Tabela 30. Dimensões de pivôs-centrais - vão longo ($k = 3$)	136

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A irrigação é uma prática agrícola que envolve diversos aspectos. Além de aumentar a produtividade das culturas e de diminuir os riscos da estiagem associados a esta atividade econômica, há também o aspecto social, como o favorecimento na formação de comunidades organizadas com a fixação do homem no campo.

Um projeto adequado para um sistema de irrigação, deverá ser aquele que propicie ao agricultor irrigante a possibilidade de fazer uso do recurso água, com eficiência máxima, aumentando a produtividade das culturas, com menor custo de produção, e consequentemente, maximizando o retorno dos investimentos. Aliado ao dimensionamento do equipamento, existe o manejo do sistema, que é de fundamental importância para o sucesso do empreendimento. De nada adiantará um sistema perfeitamente dimensionado, se o manejo não for adequado às condições de operação. Apesar desta ser uma exigência básica, na maioria dos projetos implantados, ela é negligenciada.

Para viabilizar o pleno desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil, ou mesmo nos países da América Latina, existem impecilhos institucionais a nível governamental e também de natureza técnica. Um exemplo da falta de planejamento em relação ao uso da água, acontece hoje na bacia do Guaíba, no Estado de São Paulo, onde existem sérios conflitos entre os usuários. Nesta

bacia, chega a haver falta do recurso água, não só para os irrigantes já instalados, mas também para o consumo humano, industrial e da fauna.

É bastante provável que se caminhe para uma situação de colapso, nas regiões mais desenvolvidas, caso o uso da água continue a se dar de forma não planejada e não controlada. Sabe-se por exemplo, que a recuperação de uma bacia hidrográfica é um processo demorado, penoso, caro, e que envolve conflitos em relação ao seu uso. Possivelmente, as próximas crises para a humanidade, serão as de energia e de disponibilidade de água.

Muito há que se pesquisar ainda em termos de planejamento e operação de sistemas de irrigação. É com esta preocupação, que o presente trabalho será desenvolvido, e desta forma, espera-se contribuir para o aprimoramento científico e tecnológico do país, na área de Engenharia de Irrigação. Para que esta meta seja atingida, são necessárias ferramentas tecnológicas cada vez mais avançadas, indispensáveis ao processo de tomada de decisão. A "Programação Matemática", com a qual se pretende trabalhar, é uma delas.

1.2. O problema e sua importância

Este trabalho propõe uma metodologia, baseada em métodos da Programação Matemática, para tratar questões de dimensionamento, localização e operação de sistemas de irrigação tipo pivô-central, atualmente muito utilizado no Brasil.

Planejar um sistema de irrigação por aspersão tipo pivô-central, para uma propriedade agrícola, vai muito além do simples dimensionamento hidráulico do equipamento, embora estas questões sejam naturais neste caso. Quando se trata de tal sistema, surgem questões importantes e interessantes. Para o agricultor, deverá estar harmonicamente estabelecida uma série de parâmetros e decisões que se interligam e influem diretamente nos resultados finais. Por exemplo, tomada a decisão de irrigar e escolhido o sistema pivô-central, como se poderá tomar decisões do tipo: quantos equipamentos instalar num dado horizonte de planejamento, onde instalá-los, qual o melhor cronograma de instalação a ser adotado, quais culturas escolher e como distribuí-las em cada pivô-central. Qual a melhor maneira de operá-los buscando atender, por exemplo, restrições de energia e água com o mínimo custo. Observe que estas decisões envolvem um grande número de variáveis, muitas delas do sistema solo-água-planta, com relacionamento bastante complexo. Não é difícil ver que é preciso tratar dimensionamento, localização e operação de forma integrada. Para efeito didático, o problema tratado neste trabalho, será dividido em três partes. Na primeira, será estudado o dimensionamento da adutora do pivô-central; na segunda, a questão da localização ótima dos equipamentos na área a ser irrigada; e na última parte, a operação dos pivôs-centrais juntamente com a alocação da água disponível para a irrigação, segundo os turnos diários definidos para a operação.

A importância da primeira parte do problema, deve-se principalmente ao fato de que os custos da irrigação, relativos à energia, tem aumentado significativamente nos últimos anos, e não há indícios de que este cenário possa ser revertido a curto e médio prazos. Por exemplo, no Estado de São Paulo, não existe mais subsídio na tarifa de energia elétrica para o agricultor irrigante. Devido a este aumento de preço nas tarifas, e da considerável quantidade de energia consumida pelos pivôs-centrais, há um grande interesse em que estes sistemas sejam otimizados, tanto a nível de projeto quanto de operação. Neste sentido, procura-se elaborar um modelo de otimização, que permita obter o diâmetro ótimo da adutora, de modo a minimizar o custo total, para um dado horizonte de planejamento. O modelo, opcionalmente, adotará a fórmula de Hazen-Williams ou a Universal para o cálculo da perda de carga. Desta forma haverá a possibilidade de uma análise comparativa entre os diâmetros ótimos obtidos a partir destas fórmulas assim como em relação aos valores utilizados pela Carborundum S/A. Sabe-se que, quanto menor é o diâmetro da adutora, menor será o custo fixo de investimento do projeto, porém, o custo relativo à energia consumida torna-se elevado. Se o diâmetro é aumentado, a situação é a inversa. Deve-se portanto, analisar o "trade-off" entre estes custos, buscando uma situação ótima. Isto será obtido pela resolução de um problema de otimização modelado com esta finalidade. A importância deste problema, fica ainda mais ressaltada, ao se observar que ele é

independente da redução de custos relativos à energia, obtido por exemplo, com a racionalização do uso da água. Uma das formas de se obter esta redução de custos é, estabelecer épocas ideais de plantio das culturas, de modo a defasar o pico de consumo de água de cada uma delas, em função do seu estágio fenológico. Desta forma, é possível obter um melhor aproveitamento da água destinada à irrigação, que via de regra, determina uma restrição ativa em projetos desta natureza. Com o diâmetro ótimo da adutora determinado, a segunda parte do problema, será o da escolha ótima do seu ponto de instalação. Constata-se que, via de regra, o próprio fabricante do equipamento é quem instala o pivô-central e, na maioria das vezes, não leva em consideração, ou até mesmo desconhece, as futuras pretensões do agricultor, em termos de investimento. Num projeto envolvendo múltiplos pivôs-centrais, dificilmente instalam-se todos ao mesmo tempo. A execução do projeto é portanto gradativa e, como são equipamentos fixos, a instalação de um determinado pivô-central, depende diretamente dos anteriores. É importante então, que se conheça "a priori", os pontos ideais de localização dos pivôs-centrais, para toda a área destinada à irrigação, com algum critério de aproveitamento. Um destes critérios, é o da maximização da área total irrigada e que, será adotado neste trabalho. Esta questão, tem importância mais significativa em áreas pequenas, com fronteiras irregulares, que é o caso da maioria das propriedades agrícolas do Brasil. O conhecimento dos pontos ótimos de instalação é importante também

no caso de se desejar a expansão de sistemas já em operação.

Com os pivôs-centrais instalados, e a(s) cultura(s) definida(s), o problema a ser tratado na última etapa é, como alocar a água disponível para irrigação, ao longo dos dias que determinam o horizonte de planejamento e nos turnos do dia selecionado para irrigar. O objetivo aqui é operar os equipamentos de modo a alocar o recurso água, normalmente escasso, e às vezes com disponibilidade variável, sem prejuízo (ou mínimo) das necessidades hídricas das culturas. Isto deverá ser conseguido com o menor custo possível, uma vez que no decorrer das 24 horas do dia, há variações no valor das tarifas de energia elétrica, e no custo da mão de obra. Devido ao alto grau de automação destes sistemas de irrigação, o custo devido à mão de obra tem pouca representatividade no custo total, podendo assim ser desprezado.

A metodologia a ser empregada na resolução do problema proposto, bem como sua solução, contribuirão para que o agricultor irrigante, que utiliza o pivô-central, possa ter dados concretos para decidir em relação ao dimensionamento, instalação e operação dos seus equipamentos. Estas decisões resultarão num planejamento mais adequado da sua propriedade agrícola, economia de energia com consequente redução de custos e, melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Também o fabricante poderá usufruir desta metodologia e, incorporá-la no seu processo produtivo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Este trabalho, tem por finalidade desenvolver modelos de programação matemática, que possam contribuir para o planejamento de projetos de sistemas de irrigação por aspersão tipo pivô-central, no que se refere ao dimensionamento, localização, operação e expansão da sua capacidade. A hipótese de trabalho fundamenta-se no fato de que, para viabilizar economicamente um projeto de irrigação, envolvendo múltiplos pivôs-centrais, não é suficiente que cada um deles esteja dimensionado adequadamente do ponto de vista do funcionamento hidráulico. O agricultor irrigante que optar por este tipo de equipamento, deverá dominar ou contar com assessoria técnica especializada, no que se refere não só ao seu dimensionamento, mas também, em relação à sua instalação e manejo. A solução dos modelos de otimização que serão formulados neste trabalho contribuirão para a obtenção destes parâmetros.

1.3.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, este trabalho pretende elaborar e resolver modelos de programação matemática em que:

a. A solução ótima forneça o diâmetro mais econômico da adutora de um pivô-central.

b. A solução ótima estabeleça os pontos ideais de instalação

para os pivôs-centrais numa área destinada a receber um projeto de irrigação por aspersão mecanizado tipo pivô-central, assim como um cronograma para instalação dos mesmos.

c. A solução ótima aponte para um manejo ideal dos pivôs-centrais e respectivas lâminas hídricas diárias a serem aplicadas em cada cultura.

d. A solução ótima estabeleça um plano ótimo de alocação da água destinada a suprir os pivôs-centrais segundo os turnos diários de operação para um dado horizonte de planejamento.

2. Revisão da literatura

2.1. Considerações gerais

As técnicas de programação matemática, começaram a ser aplicadas ao dimensionamento de sistemas de irrigação no final da década de 60. Os primeiros trabalhos utilizaram a programação linear como ferramenta para otimizar redes de distribuição de água, no aspecto de dimensionamento. KARMELI et al. (1968), apresentam um modelo para otimizar uma configuração conhecida. As variáveis de decisão são os diâmetros e comprimento dos tubos. O modelo pressupõe uma única fonte de distribuição de água. GUPTA et al. (1972) estabeleceram um modelo semelhante para diversas fontes. HALL & BUTCHER (1968), afirma ser através da análise de sistemas, um modo natural para selecionar a prática de cultivo ótima entre uma grande variedade de culturas, solos e condições climáticas, reduzindo o esforço gasto nesta tarefa. LABADIE (1987), descreve vários modelos com enfoque de otimização de sistemas na área de Projetos Hidroagrícolas. Basicamente trata-se da otimização do abastecimento de água e energia, sujeito a restrições de controle de cheias. Cada vez mais a programação não linear, programação dinâmica e programação inteira, passaram a ser utilizadas tratando não só do dimensionamento dos sistemas, mas também da sua configuração e manejo. Nesta linha, os trabalhos que mais se destacam, (envolvendo sistemas pressurizados de irrigação) são: ORON & KARMELI (1979) e (1981), ORON & WALKER (1981), ORON (1982), HOLZAPFEL & MARINO (1987) e SAAD (1994).

2.2. Histórico

Com relação ao cálculo da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas, CHRISTIANSEN (1942), concluiu que

$$H_{ms} = F.H_{te} \quad (2.1)$$

onde,

H_{ms} : Perda de carga por atrito numa tubulação com múltiplas saídas,

H_{te} : Perda de carga por atrito na tubulação equivalente (para a mesma vazão de entrada),

F : Fator de Christiansen ; $0 < F \leq 1$ (fator de redução de perda de carga

Para o cálculo de F , este autor adotou como hipóteses, que os aspersores estão igualmente espaçados e que a descarga é a mesma para todos eles. Obviamente o fator F de Christiansen não pode ser aplicado a pivôs-centrais.

JENSEN & FRATINI (1957), observaram que um caso frequente em linhas laterais de sistemas de aspersão, é quando o primeiro aspersor está localizado a uma distância do início da linha lateral, correspondente a metade do espaçamento entre os aspersores. Eles obtiveram um fator ajustado para esta situação.

CHU (1978), propõe um novo fator ajustado para linhas laterais de aspersão, onde o comprimento da tubulação equivalente é estendido até a fronteira da área irrigada. É adotada a hipótese de que a distância entre dois aspersores consecutivos é um

infinitésimo, o que permite expressar as fórmulas de perda de carga e pressão através de integrais. O resultado principal deste trabalho, é que o fator modificado assim obtido, permanece praticamente constante a partir de cinco aspersores na linha lateral.

SOLIANI (1994)^a, descreve uma metodologia para o cálculo da perda de carga em linhas laterais de pivôs-centrais levando em conta o número de aspersores. É apresentada a idéia de Christiansen onde um fator de perda de carga pode ser calculado levando-se em conta o número real de aspersores.

No aspecto dimensionamento de sistemas, **ORON (1982)**, trabalhando com sistemas fixos de irrigação pressurizada, decompõe o sistema em equipamento, energia e mão-de-obra. Esta separação aplica-se a todos os sistemas de irrigação com maior ou menor ênfase na contribuição de cada componente.

PLEBAN & AMIR (1981), afirmam que o custo com equipamento e energia são os principais ao se dimensionar redes de distribuição de água em geral, e influem de forma antagônica, uma vez que tubos de diâmetros menores apresentam menor custo, porém como determinam uma perda de carga maior, provocam um maior consumo de energia. De outro modo, tubos de maior diâmetro geram menor perda de carga, e consequentemente menor consumo de energia, porém o custo fixo devido à tubulação é maior. Assim uma forma de minimizar o custo de um sistema de distribuição de água é otimizar a rede hidráulica e a energia consumida por ela.

Para o dimensionamento econômico de tubulações de irrigação,

e a tubulação adutora de pivôs-centrais é uma delas, **BERNARDO (1982)** descreve três procedimentos, que são o método das tentativas, o das tentativas simplificado e o de Keller. O Método das Tentativas consiste na obtenção do custo fixo anual para cada metro de tubulação, para todos os diâmetros possíveis de serem utilizados e também o custo anual relativo à energia consumida na forma de perda de carga. A combinação de diâmetros que apresentam o menor custo total deverá ser a solução mais econômica. Já o Método das Tentativas Simplificado consiste na determinação do custo total anual por 100 m de tubulação, para cada valor de vazão que ocorrerá nos diversos trechos. A solução econômica é obtida de modo análogo ao processo anterior.

KELLER (1965), elaborou um método que é mais rápido e eficiente que os processos por tentativas. Seu método consiste na confecção de um nomograma com a vazão no eixo das abcissas e a perda de carga no eixo das ordenadas. São traçadas retas que relacionam a perda de carga com a vazão para os diversos diâmetros disponíveis. Entre as retas que se referem a diâmetros consecutivos, insere-se uma linha tracejada que indica a diferença de perda de carga entre os mesmos, para as várias vazões. Construído o nomograma pode-se selecionar o diâmetro mais econômico para cada vazão. Os custos fixos e variáveis também são considerados.

Quanto a localização de pivôs-centrais, **ANDERSON et al. (1985)**, descrevem um modelo de programação linear, com variável inteira 0/1, para área com fronteira irregular. O modelo é

aplicado também a pivôs-centrais móveis. O objetivo é a maximização da área irrigada. Um inconveniente deste modelo é o de não permitir o tangenciamento dos pivôs-centrais no sentido dos eixos coordenados.

HATCH et al. (1985), descrevem um modelo semelhante, trabalhando ainda com fronteiras irregulares. Este modelo determina o número de pivôs-centrais a serem instalados, assim como o tamanho (escolhendo entre três diâmetros definidos a priori). Este modelo fornece ao agricultor os valores ótimos da área que deverá ser irrigada, destinada a cultura de sequeiro e arrendada. O objetivo deste modelo é a maximização do lucro.

SOLIANI (1993), apresenta um modelo de localização de pivôs-centrais com raio previamente escolhido permitindo a tangência dos mesmos, através de uma discretização da área a ser irrigada.

HUANG et al. (1975), formularam um modelo de otimização para determinar um padrão de cultivo, com múltiplas culturas, procurando alocar o recurso água com a máxima eficiência. Para cada cultura, seu período de cultivo foi subdividido nos estágios de desenvolvimento, onde as necessidades hídricas são bem definidas e praticamente constantes. Num primeiro momento foi desenvolvido um calendário que contenha todas as possibilidades de plantio. A seguir foram formuladas restrições de disponibilidade de água, terra e outras de caráter operacional. A função objetivo a ser maximizada foi o lucro líquido, para cada cultura. O modelo foi aplicado a um projeto de irrigação localizado em Lalamilo, na

Ilha do Hawai. Um aumento significativo no lucro líquido é observado com a utilização deste modelo.

MANNOCCI & MECARELLI (1994), apresentam uma metodologia que utiliza a teoria da programação matemática para encontrar a solução ótima (em termos de lucro líquido) para o planejamento da irrigação numa determinada área. É permitido o déficit de irrigação. Esta metodologia poderá ser aplicada sem muitos recursos técnicos, uma vez que são necessários apenas dados de chuva, evapotranspiração máxima e características de solo e cultura. Um estudo das condições hidrológicas, agronômicas e climáticas deve ser feita a priori para a formulação de restrições para o modelo. São examinadas situações de uma área de Citta di Castello, Italia.

SOLIANI et al. (1994), apresentam um modelo cujo objetivo é planejar a irrigação utilizando pivôs-centrais, que são divididos em setores definidos por diferentes culturas ou uma mesma cultura em estádios diferentes.

Para a alocação de água **TRAVA et al. (1977)**, descreveram um modelo que fornece a data e o volume a ser aplicado de modo a otimizar o volume disponível.

SOLIANI (1994)^b, apresenta um modelo para alocação de água para pivôs-centrais levando em conta a sua disponibilidade ao longo de turnos definidos para sua operação, balanço de umidade do solo e restrições operacionais.

3. Material e Métodos

3.1. Pressupostos de trabalho

Para os modelos que serão elaborados neste texto, serão adotadas as seguintes pressuposições básicas:

- todos os pivôs-centrais permitem um giro completo na sua operação;
- a energia elétrica está disponível na casa de máquinas;
- cada tubulação adutora abastece um único pivô-central;
- os pivôs-centrais estão desprovidos de canhão final;
- o espaçamento entre os aspersores na linha lateral é constante;
- os diâmetros factíveis para adutoras são os relacionados na tabela 6 e as medidas dos vãos estão nas tabelas 28 a 30;
- não há sobreposição das áreas irrigadas por diferentes pivôs-centrais;
- poderá ser adotado tanto o sentido horário quanto o anti-horário para o giro dos pivôs-centrais;
- as tarifas de energia elétrica obedecem aos padrões adotados pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

3.2. Hipóteses de trabalho

A formulação dos modelos contidos neste texto admite seguintes hipóteses básicas:

Se a questão do planejamento de sistemas de irrigação tipo pivô-central for formulada utilizando-se técnicas de programação

matemática então será possível encontrar:

- diâmetros ótimos para a tubulação adutora no sentido de que a somatória dos custos da adutora e de operação sejam minimizados;
- os pontos ótimos de localização para estes equipamentos de modo a maximizar a área total irrigada;
- um manejo que forneça a máxima eficiência de operação;
- um plano ótimo de alocação do volume de água disponível para a irrigação ao longo de um dado horizonte de planejamento.

3.3. Características gerais do equipamento Pivô-Central

Um pivô-central é um equipamento de irrigação por aspersão, que consiste de uma tubulação com aspersores ou bocais, devidamente espaçados, suspensa acima da cultura por meio de torres, providas de rodas e dispositivo motor, que gira em torno de um eixo localizado no ponto pivô, enquanto irriga uma área cultivada.

Os componentes básicos de um pivô-central são: base do pivô (ou ponto pivô), tubulação de aspersão (ou lateral do pivô), torres, linha adutora e conjunto motor-bomba. A base do pivô, é constituída de uma estrutura metálica em forma de pirâmide, contendo uma tubulação vertical, que faz a conexão entre a adutora e a linha lateral. Em torno desta base, o equipamento realiza um movimento de rotação, acionado por motores localizados em cada torre. O tamanho de um pivô-central é caracterizado pelo número de torres que o compõe, geralmente tendo no máximo 15 torres. (a

Carborundum S/A possui um pivô-central em teste com 18 torres, raio de 783 metros, irrigando uma área de 193 ha, instalado no município de Morro Agudo, Estado de São Paulo).

A medida do vão (distância entre duas torres) é uma característica do fabricante. A área irrigada por um pivô-central pode atingir 150 ha, com um custo fixo de investimento em torno de 350.000 dólares, (desprezados os custos com reservatórios, adutora, e rede elétrica). Este sistema de irrigação foi lançado no mercado brasileiro em 1978, e teve grande aceitação pelos agricultores irrigantes. Um dos principais fatores que levou os empresários do setor agrícola a optarem por este tipo de equipamento de irrigação, é por ser ele um dispositivo completamente automatizado, reduzindo assim os gastos com mão de obra. Possui também grande eficiência de irrigação, e é um sistema permanente, podendo ser acionado a qualquer momento, inclusive por controle remoto.

3.4. Lay-out de um pivô-central

As Figuras 1 a 3 apresentam os principais dados de um pivô-central.

Figura 1. Elementos básicos de um pivô-central

- | | | |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1- Ponto do Pivô | 6- Canhão Final | 11- Lâmpada de Sinalização |
| 2- Painel Principal | 7- Junta Articuladora Sólida | 12- Extensão ou Cachimbo |
| 3- Moto redutores | 8- Vão e Emissores | 13- Lance em Balanço |
| 4- Anel Coletor Externo | 9- Junta Articuladora | |
| 5- Torres | 10- Roda e Chassi | |

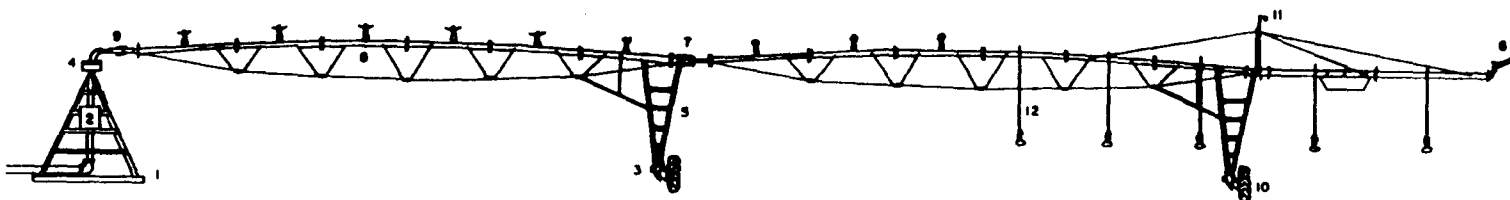


Figura 2. Distâncias do ponto pivô e áreas irrigadas por um pivô-central de 10 torres.

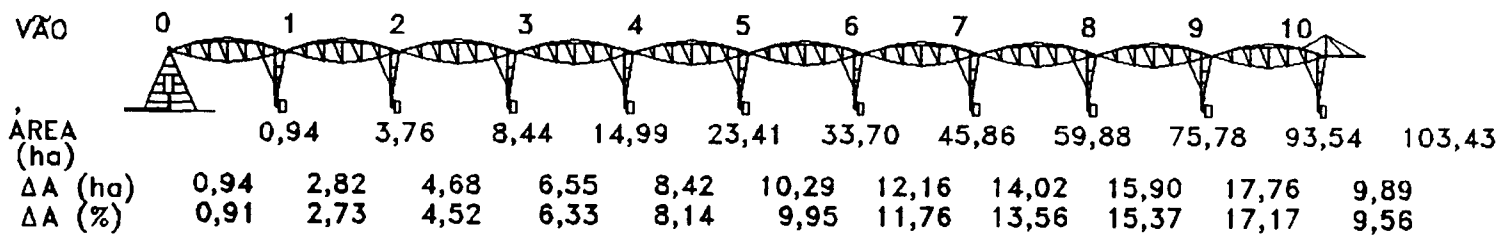
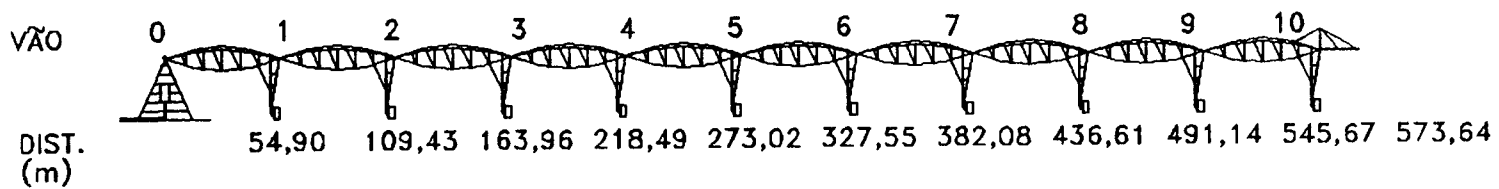
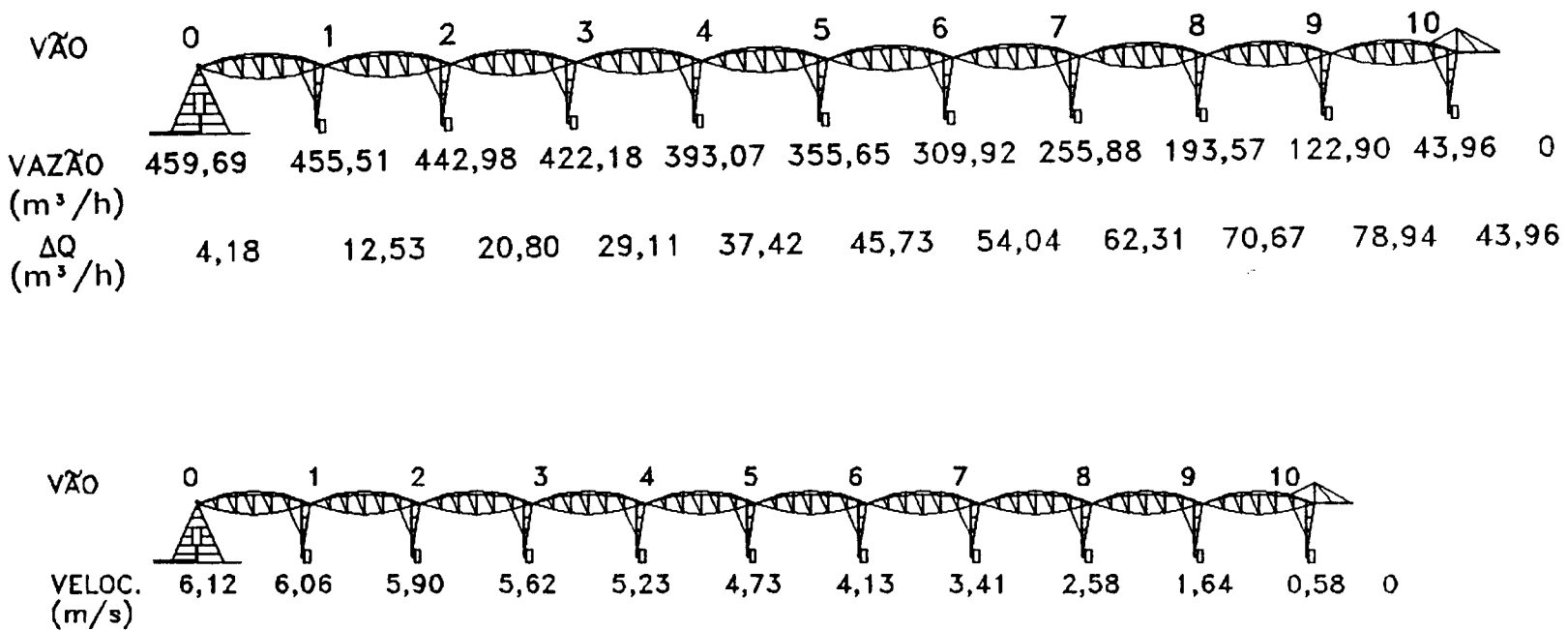


Figura 3. Vazões e velocidades da água ao final de cada vão de um pivô-central de 10 torres.



3.5. Hidráulica do pivô-central

Para efeito de cálculo da perda de carga por atrito num pivô-central, deve-se considerar a água como sendo conduzida através de dois trechos totalmente distintos, e com características próprias; um deles, a tubulação adutora que o abastece, que é um conduto de uma única saída, com fluxo forçado, e o outro, a linha lateral, um conduto com múltiplas saídas. Surge então a questão da escolha das fórmulas a serem utilizadas, que poderão conduzir a dois erros essenciais quando se empregarem fórmulas empíricas para o cálculo da perda de carga: o primeiro, devido à escolha inadequada dos coeficientes numéricos que nem sempre correspondem aos materiais de que são feitos os equipamentos, e o segundo, de natureza conceitual, quando se utilizarem coeficientes numéricos não compatíveis com o regime de escoamento do conduto.

A fórmula empírica mais utilizada na hidráulica do pivô-central é a de Hazen-Williams, dada por,

$$J = \frac{K \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} , \quad (3.1)$$

onde,

J : perda de carga unitária (m/m),

K : constante de uniformização de unidades, (10,643 para o sistema MKS),

Q : vazão do sistema (m³/s),

C : coeficiente cujo valor depende da natureza e estado das

paredes do tubo.

D : diâmetro interno da tubulação (m).

A fórmula (3.1), é largamente utilizada nos vários métodos de irrigação pressurizados, embora recomendada para condutos hidráulicamente lisos em regime turbulento, com diâmetros superiores a 50 mm.

A perda de carga por atrito num trecho de comprimento L, será dada por $h_f = J.L$.

A fórmula Universal de perda de carga, com base cientificamente estabelecida, é dada por,

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} , \quad (3.2)$$

onde,

V : velocidade média da água na seção de diâmetro D (m/s),

g : aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$),

f : coeficiente de perda de carga, que é função do número de Reynolds (Rey), e da rugosidade relativa (ϵ/D) do tubo, que mede as imperfeições da parede interna do mesmo.

O fator f é obtido da Fórmula de Colebrook-White, que é dada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \left(0,27 \cdot \frac{\epsilon}{D} + \frac{2,51}{\sqrt{f}} \right) , \quad (3.3)$$

onde,

$$\text{Rey} = \frac{V \cdot D}{\nu} , \quad (3.4)$$

ν : viscosidade cinemática do líquido transportado, ($\nu = 10^{-6}$

m^2/s , para água a 20°C).

O coeficiente f pode ser obtido por processos numéricos iterativos. Para isso seja,

$$x = \frac{1}{\sqrt{f}} . \quad (3.5)$$

Deve-se então procurar as raízes da equação,

$$F(x) = x + 2 \cdot \text{Log}\left(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + 2,51 \cdot \frac{x}{\text{Rey}}\right) = 0 . \quad (3.6)$$

Seja x_0 uma aproximação inicial para a raiz da equação $F(x) = 0$, de modo que $x = x_0 + h$, com h pequeno, seja uma raiz. Desenvolvendo F em série de Taylor, em torno do ponto x_0 obtem-se,

$$0 = F(x_0 + h) = F(x_0) + h \cdot F'(x_0) + (1/2) \cdot h^2 \cdot F''(x_0) + \dots \quad (3.7)$$

Como h é pequeno, pode-se desprezar os termos envolvendo suas potências maiores ou iguais a 2, e assim tem-se,

$$h = \frac{-F(x_0)}{F'(x_0)} , \quad (3.8)$$

ou de modo equivalente,

$$x = x_0 - \frac{F(x_0)}{F'(x_0)} , \quad (3.9)$$

que fornece o processo iterativo,

$$x_{k+1} = x_k - \frac{F(x_k)}{F'(x_k)} \quad k = 1, 2, \dots, k_{\text{max}} , \quad (3.10)$$

ou,

$$x_{k+1} = x_k - \frac{x_k + 2 \cdot \text{Log}(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{\text{Rey}} \cdot x_k)}{1 + \frac{5,02}{(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} \cdot \text{Rey} + 2,51 \cdot x_k) \cdot \text{Ln}10}} \quad (3.11)$$

Fixada uma tolerância TOL, o processo poderá ser interrompido quando $|F(x_{k+1})| \leq \text{TOL}$, ou $|(x_{k+1} - x_k)/x_k| \leq \text{TOL}$, ou o número de iterações atingir um limite máximo prefixado k_{max} .

Assim, dado x_0 , TOL e k_{max} , o processo iterativo fornecerá a sequência $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots$ que converge para a solução x , ou atinge o limite máximo de iterações, e neste caso deve-se reinicializar o processo com um valor de x_0 mais adequado.

O valor de f será dado por,

$$f = \frac{1}{x^2} \quad (3.12)$$

As tubulações utilizadas na irrigação em geral são o de parede lisa, e neste caso o parâmetro ε/D deixa de ser uma característica do fenômeno de escoamento ($\varepsilon = 0$), e assim $f = f(\text{Rey})$. Portanto nos projetos hidráulicos de irrigação o cálculo de f pode ser obtido da fórmula relativa ao regime turbulento liso,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \frac{2,51}{\text{Rey} \sqrt{f}} \quad (3.13)$$

Assim o processo iterativo que fornece x_k , fica simplificado para,

$$x_{k+1} = x_k - \frac{x_k + 2 \cdot \text{Log} \left(\frac{2,51}{\text{Rey}} \cdot x_k \right)}{1 + \frac{5,02}{(2,51 \cdot x_k) \cdot \text{Ln}10}} \quad (3.14)$$

Uma outra simplificação no cálculo de f pode ser obtida com a fórmula de KOMAKOV dada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \frac{5,62}{\text{Rey}^{0,9}} \quad (3.15)$$

Com isso no regime turbulento liso evita-se o processo iterativo, e o cálculo de f pode ser obtido pela sequência de passos,

$$1. \quad \text{Rey} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad .$$

$$2. \quad f = \left[-2 \cdot \text{Log} \frac{5,62}{\text{Rey}^{0,9}} \right]^{-2} \quad (3.16)$$

$$3. \quad h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} = \frac{0,0826 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{D^5} \quad .$$

Quanto à linha lateral, que é um conduto com múltiplas saídas, a seguir será desenvolvida uma metodologia de cálculo, que permita equacionar de forma simples e eficiente a perda de carga devida ao atrito, comparando-a com a perda de carga numa tubulação equivalente de vazão constante, uma vez que para este caso a dificuldade é muito menor. A tubulação equivalente à linha lateral, é uma tubulação com o mesmo comprimento, diâmetro

interno, material, estado e com uma única saída no final da linha.

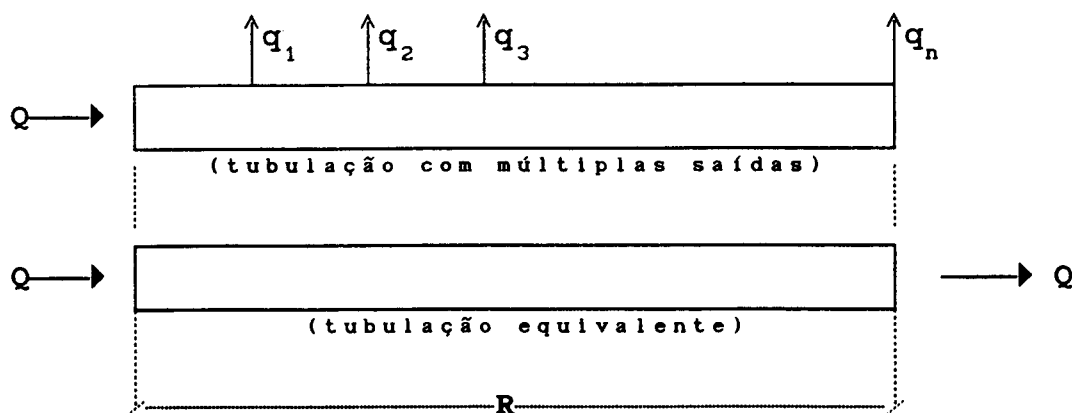


Figura 4. Tubulação com múltiplas saídas e sua equivalente

A perda de carga por atrito, numa tubulação com múltiplas saídas, certamente é menor que na tubulação equivalente, para uma mesma vazão de entrada.

Vale a relação,

$$H_{ms} = F.H_{te}, \quad (3.17)$$

onde

H_{ms} : Perda de carga por atrito numa tubulação com múltiplas saídas,

H_{te} : Perda de carga por atrito na tubulação equivalente (para a mesma vazão de entrada),

F : Fator de perda de carga ; $0 < F \leq 1$.

No presente trabalho, para estudar o efeito das múltiplas saídas (aspersores), na perda de carga por atrito da linha lateral de um pivô-central, será adotado um modelo discreto, que é mais adequado ao problema, notadamente em pivôs-centrais com menor número de torres. Esta forma de equacionar a perda de carga na

linha lateral de um pivô-central é a primeira contribuição deste trabalho no sentido de fornecer uma metodologia de cálculo diferenciada. Um modelo contínuo (hipótese de um número infinito de aspersores) subestima o fator de ajuste, e conseqüentemente, a perda de carga real, embora tenha outras vantagens, como por exemplo a obtenção de fórmulas para perda de carga e pressão envolvendo integrais.

Considere uma linha lateral de um pivô-central, de comprimento R (m), contendo n aspersores, igualmente espaçados, sem canhão final. A hipótese de espaçamento constante não é restritiva para este tipo de equipamento, sendo adotada pela maioria dos fabricantes, enquanto que o canhão final, ultimamente tem deixado de ser uma alternativa eficiente para aumentar a área irrigada, principalmente devido a problemas específicos de seu funcionamento, (a adoção do canhão não traz nenhum problema para a metodologia de cálculo aqui desenvolvida).

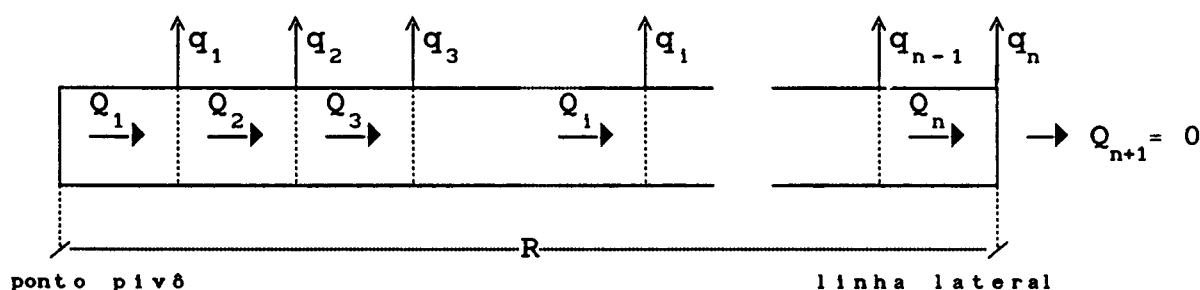


Figura 5. Esquema de vazões da linha lateral.

O espaçamento entre os aspersores é,

$$\delta R = \frac{R}{n} . \quad (3.18)$$

A vazão na linha lateral, (entre dois emissores consecutivos), Q_i é dada por,

$$Q_i = \begin{cases} Q & \text{para } i = 1 \\ Q - \sum_{j=1}^{i-1} q_j & \text{para } i = 2, 3, \dots, n, \\ 0 & \text{para } i = n + 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

onde Q (m^3/s) é a vazão no ponto pivô e q_j (m^3/s) é a descarga no j -ésimo emissor da linha lateral.

O j -ésimo emissor estará à distância,

$$r = j \cdot \delta R = \frac{j \cdot R}{n}, \quad (3.20)$$

do ponto pivô. Suponha que o raio efetivamente irrigado por cada emissor, seja igual ao espaçamento entre eles. Esta é a disposição como BITTINGER & LONGENBAUGH (1962), conseguiram uma melhor distribuição da lâmina de água aplicada, para o modelo triangular de aplicação.

A faixa da área (ha) irrigada pelo j -ésimo emissor será então

$$A_j = \frac{j \cdot \pi \cdot R^2}{5000 \cdot n^2}. \quad (3.21)$$

A descarga neste emissor será,

$$q_j = \frac{A_j \cdot Lb}{360 \cdot T} = \frac{j \cdot \pi \cdot R^2 \cdot Lb}{18 \cdot 10^5 \cdot 3600 \cdot n^2 \cdot T}, \quad (3.22)$$

onde Lb (mm) é a lâmina bruta aplicada pelo pivô-central ao

executar uma rotação completa no tempo T (h).

Como,

$$Q = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot Lb \cdot (1 + 1/n)}{36 \cdot 10^5 \cdot T} , \quad (3.23)$$

segue que,

$$q_j = \frac{2 \cdot j \cdot Q}{n \cdot (n + 1)} . \quad (3.24)$$

A perda de carga total H_f (m), por atrito, na linha lateral será,

$$H_f = \sum_{i=1}^n H_{f_i} , \quad (3.25)$$

onde H_{f_i} é a perda de carga por atrito no trecho de comprimento δR , entre os aspersores $i-1$ e i .

Na hipótese de se utilizar a fórmula de Hazen-Willians, para cada trecho tem-se,

$$H_{f_i} = K \cdot (Q_i/C)^{1,852} \cdot \delta R \cdot D^{-4,87} , \quad i=1,2,\dots,n . \quad (3.26)$$

Substituindo (3.20) e (3.26) em (3.25) obtém-se,

$$H_f = \frac{k \cdot R}{n \cdot D^{4,87} \cdot C^{1,852}} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^{1,852} , \quad (3.27)$$

e da substituição de (3.19) em (3.27), pode-se escrever,

$$\begin{aligned}
H_f &= \frac{K.R}{n.D^{4,87}.C^{1,852}} \cdot \left(Q^{1,852} + \sum_{i=2}^n \left(Q - \sum_{j=1}^{i-1} q_j \right)^{1,852} \right) \\
&= \frac{K.R}{n.D^{4,87}.C^{1,852}} \cdot \left(Q^{1,852} + \sum_{i=2}^n \left(Q - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{2.j.Q}{n.(n+1)} \right)^{1,852} \right) \\
&= \frac{k.Q^{1,852}.R}{D^{4,87}.C^{1,852}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left(1 - \frac{i.(i-1)}{n.(n+1)} \right)^{1,852} \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Tem-se então que, a perda de carga total por atrito numa tubulação com múltiplas saídas, poderá ser obtida como o produto da perda de carga por atrito de uma tubulação equivalente, pelo fator $F_{pc}(n)$, dado por,

$$F_{pc}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \left(1 - \frac{i.(i-1)}{n.(n+1)} \right)^{1,852} \quad (3.29)$$

Se for utilizada a fórmula Universal,

$$H_{f_1} = \frac{f_1.V^2.\delta R}{2.g.D} = \frac{0,0826.f_1.Q_1^2.\delta R}{D^5} \quad (3.30)$$

para calcular a perda de carga por atrito em cada trecho da linha lateral, será preciso avaliar a expressão,

$$\sum_{i=1}^n f_1 \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(1 - \frac{i.(i-1)}{n.(n+1)} \right)^2 \quad (3.31)$$

onde f_i deve ser calculado em cada trecho de comprimento δR localizado entre os aspersores $i-1$ e i . A fórmula acima deixa a desejar quanto a sua praticidade, uma vez que, o cálculo de f_i , exige um processo iterativo, como o de Newton-Raphson, em cada trecho definido por dois aspersores consecutivos. Porém, observando que, a variação da velocidade do fluxo de água entre aspersores consecutivos, na linha lateral de um pivô-central é muito pequena, segue da expressão de f_i , que este poderá ser considerado constante, e neste caso tem-se,

$$F_{pc}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \left(1 - \frac{i \cdot (i - 1)}{n \cdot (n + 1)} \right)^2. \quad (3.32)$$

De modo geral, pode-se escrever,

$$F_{pc}(m,n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \left(1 - \frac{i \cdot (i - 1)}{n \cdot (n + 1)} \right)^m, \quad (3.33)$$

em que,

m : expoente da velocidade média na fórmula de perda de carga hidráulica considerada.

n : número de emissores da linha lateral do pivô-central.

A tabela 1 contém valores de $F_{pc}(m,n)$, para os casos mais utilizados de m .

Tabela 1. Valores de fator de perda de carga $F_{pc}(m, n)$

n	m	1,0	1,75	1,852	1,9	2,0
1	1	1	1	1	1	1
2		0,8333	0,7459	0,7359	0,7314	0,7222
3		0,7777	0,6747	0,6634	0,6583	0,6481
4		0,7500	0,6421	0,6306	0,6254	0,6150
5		0,7333	0,6236	0,6121	0,6068	0,5964
6		0,7222	0,6118	0,6002	0,5950	0,5846
7		0,7142	0,6036	0,5921	0,5869	0,5765
8		0,7083	0,5975	0,5861	0,5809	0,5706
9		0,7037	0,5929	0,5815	0,5764	0,5660
10		0,7000	0,5893	0,5779	0,5728	0,5625
50		0,6733	0,5648	0,5537	0,5487	0,5387
100		0,6700	0,5619	0,5509	0,5459	0,5360
150		0,6688	0,5610	0,5500	0,5450	0,5351
200		0,6683	0,5605	0,5495	0,5445	0,5346
250		0,6680	0,5602	0,5492	0,5443	0,5344
300		0,6677	0,5600	0,5490	0,5441	0,5342
350		0,6676	0,5599	0,5489	0,5439	0,5340
400		0,6675	0,5598	0,5488	0,5439	0,5340
450		0,6674	0,5597	0,5487	0,5438	0,5339
500		0,6673	0,5596	0,5487	0,5437	0,5338
600		0,6672	0,5595	0,5486	0,5436	0,5337
700		0,6671	0,5595	0,5485	0,5436	0,5337
800		0,6670	0,5594	0,5485	0,5435	0,5336
900		0,6670	0,5594	0,5484	0,5435	0,5336
1000		0,6670	0,5594	0,5484	0,5435	0,5336
5000		0,6667	0,5592	0,5482	0,5433	0,5334
10000		0,6667	0,5592	0,5482	0,5432	0,5334

Observando-se os dados da Tabela 1, verifica-se que quando o número de aspersores é aumentado, há uma estabilização dos valores do fator de ajuste. Este valor limite pode ser medido pela função Beta.

Vale a relação,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_{pc}(m, n) = \frac{1}{2} \cdot \beta(m+1; 0,5) , \quad (3.34)$$

onde β representa a função beta.

3.6. Otimização do diâmetro da adutora

Um dos principais problemas a ser equacionado no dimensionamento do projeto de um sistema de irrigação mecanizado tipo pivô-central, é o da escolha do diâmetro a ser utilizado para a tubulação adutora que o abastece. Uma vez definido este diâmetro, e feita a instalação, não há mais possibilidade de alteração, e na verdade, esta escolha interfere diretamente no consumo de energia, que é uma das componentes mais significativas do custo operacional do sistema. BERNARDO (1982), descreve quatro métodos de dimensionamento de adutoras: o método das tentativas, o das tentativas simplificado, o de Bresse e o de Keller. Todos eles são aproximados e utilizados na prática. Neste trabalho, será desenvolvida uma metodologia que difere das anteriormente citadas, onde se procura definir um modelo de otimização, cuja solução ótima forneça o diâmetro mais econômico da adutora.

O pivô-central será dimensionado de modo que, a soma do custo fixo total anualizado, com o custo energético anual, seja mínimo. Este critério deverá estar sujeito a restrições que permitam a operação do sistema de forma a atender as necessidades hídricas da(s) cultura(s). É importante ressaltar, que este problema só poderá ser resolvido (com solução única), se forem fixadas as condições de operação do sistema, tais como: definição da(s) espécie(s) de cultura(s) a ser(em) irrigada(s) (ou de forma equivalente, qual a lâmina hídrica máxima requerida pela(s) cultura(s)); a área a ser irrigada e o turno de irrigação. Na

realidade, estas condições de operação se resumem hipoteticamente a estipular qual é a vazão requerida pelo sistema, juntamente com o tempo de operação. Fixados estes parâmetros, será desenvolvido um modelo matemático, que baseado na metodologia do custo total anual mínimo, forneça o diâmetro ótimo da adutora.

Quanto maior o diâmetro escolhido para a tubulação adutora, menor será a perda de carga hidráulica e portanto, o sistema exigirá uma potência instalada menor para o conjunto motor-bomba. Desta forma, os custos com energia serão menores mas, em contrapartida, o custo com a tubulação será maior. Será portanto necessário, buscar um ponto de equilíbrio entre estes custos.

3.6.1. A função objetivo

A função objetivo do modelo a ser apresentado para determinar o diâmetro ótimo da adutora, representa a somatória do investimento inicial anualizado do equipamento, com os custos anuais de operação. A função objetivo, Custo Anual (CA), será definida por,

$$\text{CA} = \text{custo de investimento} \times \text{FRC} + \text{custo anual de mão de obra} + \text{custo anual de manutenção} + \text{custo anual de operação}$$

sendo CA medido em dólares/ano e FRC o fator de recuperação de capital do investimento, dado por,

$$\text{FRC} = \frac{(1 + i)^N \cdot i}{(1 + i)^N - 1}, \quad (3.35)$$

em que,

N: vida útil média do equipamento considerado (anos),

i: taxa mínima de atratividade do projeto, que é a taxa anual de juros segundo a qual, ainda vale a pena investir no projeto, o capital disponível. Abaixo desta taxa deverão existir outras alternativas no mercado que melhor remunerem o capital a ser investido (%).

É claro que o fator FRC, deverá ser adaptado a cada componente do sistema no que se refere a itens com vida média útil diferentes tais como: adutora, linha lateral, ponto pivô, conjunto motor-bomba, transformador e rede elétrica. Será adotada a hipótese de que o capital seja investido novamente ao final da vida média útil de cada componente, com os mesmos custos.

Neste trabalho, serão considerados os valores da tabela 2 para a vida média útil dos componentes do sistema de irrigação mecanizado tipo pivô-central.

Tabela 2. Vida média útil dos componentes

Componente	Vida média útil (anos)
Adutora	10
Linha lateral	20
Ponto pivô	20
Motor elétrico	10
Bomba	10
Transformador	20
Rede elétrica	20

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Por ser o pivô-central um equipamento completamente automatizado, pode-se desprezar a componente dos custos relativos à mão de obra. Também os custos de manutenção, são desprezíveis se

comparados ao custo global do sistema; embora alguns projetistas destinem uma percentagem da ordem de 5% do custo fixo de investimento, para esta finalidade.

Nestas condições, a função CA pode ser escrita como,

$CA = \text{custo fixo de investimento} \times FRC + \text{custo anual de operação.}$

Obtém-se assim o problema,

(P) Minimizar CA

s.a. condições de operação do sistema

As condições de operação do sistema, definem as restrições que ele deverá satisfazer para atender a finalidade proposta no projeto. Poderão ser de natureza essencialmente técnica, inerente ao funcionamento hidráulico adequado do sistema, como por exemplo, uma limitação na velocidade do fluxo de água na adutora, ou de natureza operacional, ligada ao manejo propriamente dito. Com relação a este último tipo de condição tem-se que, uma vez definida(s) a(s) cultura(s) a ser(em) irrigada(s), o tipo de solo e a extensão da área a ser cultivada, estará determinado o valor da lâmina hídrica necessária a ser aplicada e consequentemente, a vazão requerida pelo sistema, variáveis estas que terão valores perfeitamente definidos na solução do problema proposto.

A variável de decisão do modelo a ser estudado aqui, é o *diâmetro interno da adutora*, que será representado por d_1 , $1 \in I$; d_1 medido em metros, I é o conjunto de índices determinado pelos diâmetros comerciais existentes.

Pode-se explicitar o custo anualizado (CA) nos vários

componentes como segue,

$$CA = c(d_i).L.FRC_{ta} + CPP_s.FRC_{pp} + c(L_{sk}).R_{sjk}.FRC_{ll} + CMB.FRC_{mb} + CRE.T.FRC_{re} + E(Q_{ijk}, H_0^{sijk})$$

em que,

$c(d_i)$: custo unitário da tubulação adutora de diâmetro interno d_i (US\$/m),

L : comprimento total da tubulação adutora (m),

CPP_s : custo do ponto pivô de diâmetro s (US\$),

$c(L_{sk})$: custo unitário da linha lateral ao se utilizar vão do tipo k , comprimento L_{sk} e diâmetro interno do tipo s (US\$/m),

R_{sjk} : raio do pivô-central composto de j torres de vão L_{sk} (m),

CMB : custo do conjunto motor-bomba (US\$),

CRE : custo da rede elétrica (US\$/m),

T : comprimento da rede elétrica (m),

$E(Q_{ijk}, H_0^{sijk})$: custo da energia elétrica para operação do sistema, em base anual, como função da vazão Q_{ijk} e altura manométrica total H_0^{sijk} (US\$/ano),

FRC_x : fator de recuperação de capital associado ao componente x do sistema.

No cálculo do fator FRC , será utilizada a taxa anual de juros de 12% a.a. (oficial).

Tabela 3. Valores do fator de recuperação de capital

N (anos)	FRC
5	0,277409
10	0,176984
15	0,146824
20	0,133879

Segundo CHU (1978), pode-se ainda embutir o efeito da inflação nos custos, através de uma modificação do Fator de Recuperação de Capital. Este dado é relevante, uma vez que por exemplo, as tarifas de energia elétrica, nos últimos anos, tem sofrido majorações acima dos níveis da inflação.

Esta é uma análise modificada em relação à tradicional, e para isto serão considerados os elementos,

A_j : custo anual de um componente no ano j (US\$/ano)

P_j : valor presente do custo anual A_j (US\$),

N : vida média útil do equipamento considerado (anos),

i : taxa anual de juros (%).

Segue então que,

$$A_j = P_j \cdot (1 + i)^j, \quad (3.36)$$

ou,

$$P_j = A_j \cdot (1 + i)^{-j}, \quad (3.37)$$

Observe que P_j deve ser interpretada como sendo a quantia que deve-se tomar emprestado no banco, no presente, a uma taxa anual de juros de i %, para poder efetuar o pagamento A_j , no ano j .

Se o valor do componente considerado sofrer uma inflação

média anual de $f\%$, durante sua vida útil, então o custo anual A_j é aumentado a cada ano, e assim,

$$A_j = A_0 \cdot (1 + f)^j, \quad (3.38)$$

onde,

A_0 : custo estimado do componente considerado no presente, (US\$).

O valor presente P de todos os custos anuais do componente considerado será dado por,

$$P = \sum_{j=1}^N P_j = \sum_{j=1}^N A_j \cdot (1 + i)^{-j} = \sum_{j=1}^N A_0 \cdot r^j, \quad (3.39)$$

onde,

$$r = \frac{1 + f}{1 + i}, \quad (3.40)$$

Para $r \neq 1$, ou seja $f \neq i$, tem-se,

$$P = \frac{A_0 \cdot r \cdot (1 - r^N)}{1 - r}. \quad (3.41)$$

Define-se o Fator de Recuperação de Capital Modificado (FRCM), como sendo a razão A_0/P , entre o valor presente do custo estimado do bem, e a somatoria dos custos anuais atualizados. Assim,

$$FRCM = \frac{1 - r}{r \cdot (1 - r^N)}. \quad (3.42)$$

Definindo-se um parâmetro c , como,

$$c = \frac{1}{r} - 1, \quad (3.43)$$

ou seja,

$$r = \frac{1}{1 + c} , \quad (3.44)$$

obtém-se,

$$FRCM = \frac{(1 + c)^N \cdot c}{(1 + c)^N - 1} , \quad (3.45)$$

e assim o fator FRCM é semelhante ao fator de recuperação de capital FRC, uma vez que,

$$FRC = \frac{(1 + i)^N \cdot i}{(1 + i)^N - 1} . \quad (3.46)$$

É fácil ver que se a taxa de inflação f é igual à taxa de juros i , então $c = 0$, e portanto $P = N \cdot A_0$, ou seja,

$$FRCM = \frac{1}{N} . \quad (3.47)$$

Ainda mais, se a taxa de inflação f for nula, então $c = i$, e neste caso,

$$FRCM = FRC . \quad (3.48)$$

Como em geral $c \leq i$, tem-se que, $FRCM \leq FRC$.

Tabela 4. Valores do fator de recuperação de capital modificado

N (anos)	FRCM($f = 5\%$)	FRCM ($f = 10\%$)
5	0,241718	0,211040
10	0,140192	0,110270
15	0,107494	0,076771
20	0,091961	0,060089

f (% aa) e $i = 12\%$ aa.

Ao se analisar a componente dos custos anuais de bombeamento, de um sistema de irrigação, a desigualdade $FRCM \leq FRC$, mostra que

estes custos, quando atualizados, serão aumentados, se for levado em conta o efeito da inflação no valor das tarifas de energia elétrica. Com esta metodologia, que assimila o efeito da inflação nas tarifas de energia elétrica, o modelo a ser desenvolvido será fiel à situação real, e este fator modificado poderá ter grande influência na escolha do diâmetro ótimo da tubulação adutora. Como os custos do equipamento são em dólares não deverá ser considerado inflação sobre estes custos que por sinal tem diminuído ao longo do tempo principalmente devido à concorrência entre fabricantes.

A seguir serão fornecidos maiores detalhes de cada componente da função objetivo, e sempre que necessário, serão definidas novas variáveis, no sentido de melhor caracterizar e tornar operacional o modelo matemático aqui desenvolvido.

3.6.1.1. A componente da tubulação adutora

O custo $c(d_n)$, poderá ser obtido como uma função contínua $c = c(d_n)$, do diâmetro nominal d_n , (tamanho usual de manufatura), da tubulação utilizada na linha adutora. Em polegadas os diâmetros nominais disponíveis no mercado e geralmente utilizados para adutoras de pivôs-centrais são: 6", 7", 8", 10" e 12". (Neste trabalho serão analisados estes diâmetros).

Tabela 5. Custos de canalização da tubulação adutora (*)

tubo i	diâmetro nominal (m)	espessura da parede (mm)	custo unitário (US\$/m)	custo anualizado (US\$/m.ano) (**)
1	0,1524	1,2	16,77	2,97
2	0,1778	1,2	19,44	3,44
3	0,2032	1,5	25,89	4,58
4	0,2540	1,9	33,96	6,01
5	0,3048	1,9	48,28	8,54

(*) tubos de aço galvanizado

(**) vida média útil de 10 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Considerando o diâmetro nominal em milímetros (aproximação), um ajuste (linear) para a função custo unitário anualizado $c(d_n)$, como função do diâmetro nominal é $c(d_n) = -2,8529 + 36,4445.d_n$ para $0,1524 \leq d_n \leq 0,3048$ com coeficiente de correlação $r = 0,99$.

Tabela 6. Relação entre diâmetros interno e nominal

tubo i	diâmetro nominal d_n (m)	diâmetro interno d_i (m)
1	0,1524	0,1500
2	0,1778	0,1754
3	0,2032	0,2002
4	0,2540	0,2502
5	0,3048	0,3010

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Pode-se ainda escrever o diâmetro interno em função do diâmetro nominal utilizando o ajuste,

$$d_i = f(d_n) = 0,9903 d_n^{1,0030} \quad (3.49)$$

com coeficiente de correlação $r = 1$.

3.6.1.2. A componente ponto-pivô

O ponto-pivô, é o dispositivo de interligação da tubulação adutora com a linha lateral, e é composto de uma torre de sustentação assentada numa base de concreto, e de uma tubulação vertical conectada à linha lateral.

Tabela 7. Custos do ponto pivô

diâmetro (pol)	custo (US\$)	custo anualizado (US\$/m.ano) (*)
5.9/16	9.526,00	1.275,33
6.5/8	10.400,00	1.392,34
8	10.400,00	1.392,34

(*) vida média útil considerada: 20 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

3.6.1.3. A componente da linha lateral

O custo unitário $c(L_{sk})$, para a linha lateral do pivô-central é função do comprimento L_{sk} dos vãos, que serão agrupadas por justaposição.

Tabela 8. Dimensões e custos das torres da linha lateral (*)

diâmetro s (pol)	vão (k)	comprimento L_{sk} (m)	custo unitário c_{sk} (US\$/m)	custo anualizado (US\$/m.ano) (**)
5.9/16	1	41,15	291,30	38,40
	2	47,88	280,17	37,51
	3	54,53	263,14	35,23
6.5/8	1	41,15	316,00	42,31
	2	47,88	292,07	39,10
	3	54,53	274,71	36,78
8	1	41,15	340,78	45,62
	2	—	—	—
	3	—	—	—

(*) aço galvanizado

(**) vida média útil considerada: 20 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Nos casos $k = 1, 2$ e 3 , os comprimentos dos vãos iniciais são respectivamente de 41,50 m, 48,20 m e 54,90 m.

Com a finalidade de aumentar o raio irrigado, pode-se adicionar no final da linha lateral um lance em balanço ou de 14,43 metros (curto), ao custo de US\$ 2.650,00, ou de 27,97 metros (longo), ao custo de US\$ 4.988,30. Ainda uma outra alternativa é a de instalar um canhão hidráulico no final do lance em balanço (com ou sem bomba "booster"). Esta é uma opção pouco utilizada atualmente, principalmente devido a problemas técnicos de funcionamento do canhão; além de produzir um elevado índice de precipitação de água no solo (na fronteira da área irrigada), podendo com isso produzir escoamento superficial acima dos níveis aceitáveis, dependendo do tipo de solo a ser irrigado (efeito "runoff"). Pesquisas recentes tentam aperfeiçoar o funcionamento hidráulico deste dispositivo.

3.6.1.4. A componente do motor

O acionamento da bomba centrífuga, para atingir a pressão necessária do sistema, poderá ser feita por motor elétrico ou a óleo diesel. Geralmente o menor custo total recai sobre o motor elétrico, e por isso é a opção mais utilizada.

Tabela 9. Custos de motores elétricos WEG (*)

Potência (cv)	custo do motor (US\$)	custo anualizado (**) (US\$/ano)
50	2.192,10	387,97
60	3.118,80	551,98
75	3.483,14	616,46
100	4.022,69	711,95
125	5.955,59	1.054,04
150	6.451,05	1.141,73
175	7.938,34	1.404,96
200	8.461,57	1.497,56
250	9.847,04	1.742,77
300	19.148,02	3.388,89

(*) com base, acoplamento e montagem

(**) vida média útil considerada: 10 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

3.6.1.5. A componente da bomba centrífuga

Em função da altura monométrica e da vazão requerida pelo sistema, é escolhida a bomba adequada procurando obter o rendimento máximo. Para potências elevadas (≥ 200 cv), são utilizados modelos de múltiplos estágios.

Tabela 10. Modelos e custos de bombas centrífugas KSB

Potência (cv)	modelo	custo da bomba (US\$)	custo anualizado (*) (US\$/ano)
50	(100-315)	3.311,40	586,07
60	(100-315)	3.311,40	586,07
75	(125-315)	3.605,51	638,12
100	(125-400)	3.997,65	707,52
125	(150-400)	5.489,96	971,64
150	(150-400)	5.489,96	971,64
200	(125-3)	9.104,23	1.611,30
250	(150-2)	12.360,63	2.187,63
300	(150-3)	14.208,86	2.514,74

(*) vida média útil considerada: 10 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Tabela 11. Custos de chaves de partida elétricas

Potência (cv)	custo da chave (US\$)	custo anualizado (*) (US\$/ano)
50	3.195,29	565,52
60	3,202,51	566,79
75	3.382,78	598,70
100	3.549,60	628,22
125	3.767,34	666,76
150	3.809,22	674,17
175	4.072,18	720,71
200	4.086,52	723,25
250	6.102,92	1.080,12
300	12.432,70	2.200,39

(*) vida média útil considerada: 10 anos

Fonte: Carborundum S/A, 1993

Para cada conjunto motor-bomba, deverá ser instalada uma chave de partida elétrica, com a finalidade de evitar quedas bruscas de tensão na rede elétrica e proteger o conjunto quando o sistema for acionado. Para potências elevadas (≥ 200 cv), foi utilizado o modelo chave compensadora.

A função custo, para o conjunto motor-bomba, incluindo chave de partida, foi ajustada pelo modelo,

$$CMB = 277,96.P^{0,85}, \quad (3.50)$$

com coeficiente de correlação $r = 0.97$.

P: Potência instalada (cv).

3.6.1.6. A componente da rede elétrica

Quanto à rede elétrica, será adotada a hipótese de que a energia de alta tensão, esteja disponível no ponto de instalação

do transformador. Não há nenhum prejuízo nesta hipótese, uma vez que o custo da rede elétrica até o transformador, é o mesmo para qualquer diâmetro adotado, não interferindo portanto na sua escolha.

Tabela 12. Custos dos Transformadores

Potência (kva)	custo do transf. (US\$)	custo anualizado (*) (US\$/ano)
45	1373	126,26
75	1896	174,36
112,5	2450	225,31
150	2913	267,89
200	4192	385,51
250	4840	445,10
300	5245	482,34

(*) vida média útil considerada: 20 anos

Fonte: Nativa S/A, 1993

A função custo, para a rede elétrica, foi ajustada pelo modelo,

$$CRE = 79,93.P^{0,74}, \quad (3.51)$$

com $r = 0,99$.

3.6.1.7. A componente da energia

O custo da energia de bombeamento, para operar o sistema em base anual, pode ser representado pelo custo unitário da energia (US\$/kwh), multiplicado pelo tempo de operação (h/ano), multiplicado pelo consumo de energia (kwh/h). De forma equivalente, pode-se trabalhar com o consumo anual de energia.

O consumo de energia, em kwh/ano, pode ser calculado por,

$$CE = \frac{h.A.H_{man}.\gamma}{E_i.E_{mb}.3,6.10^2}, \quad (3.52)$$

onde,

A : área irrigada (ha),

h : lâmina média anual requerida pela cultura a ser irrigada (m/ano),

$$L_m = \frac{h}{E_i} = \frac{9.Q.t}{25.A}, \quad (3.53)$$

com $Q(m^3/s)$ e $t(h/ano)$,

H_{man} : altura manométrica total (m),

γ : peso específico do líquido, ($\gamma_{\text{água}} = 9.806,65 \text{ N/m}^3$),

L_m : lâmina média anual aplicada pelo equipamento (m/ano),

E_i : eficiência da irrigação (em torno de 85% para pivô-central),

E_{mb} : eficiência do conjunto motor-bomba ($E_{mb} = \eta_m.\eta_b \cong 60\%$).

Assim,

$$E(Q,H) = CE.C_{kwh}, \quad (3.54)$$

onde,

C_{kwh} : custo unitário da energia (US\$/kwh),

$E(Q,H)$: custo anual da energia de bombeamento (US\$/ano).

3.6.2. Restrições do modelo

A intenção de minimizar a função objetivo, custo total anualizado, está sujeita a restrições, que limitam as perdas da carga hidráulica por atrito nas tubulações de distribuição. Estas perdas, são limitadas, de modo que a pressão de serviço no último aspersor da linha lateral, não exceda a pressão na fonte de captação.

O método a ser utilizado para o cálculo das perdas de carga por atrito H_{fa} (m) na tubulação adutora, e H_{fl} (m), na linha lateral, não poderá ser o mesmo, uma vez que a linha lateral do pivô-central é uma tubulação com múltiplas saídas, com diminuição da vazão ao longo da sua extensão, o que não acontece na adutora. Para a linha lateral, será aplicada a metodologia desenvolvida em (3.5.) enquanto que na adutora, pode-se por exemplo, usar a metodologia de cálculo segundo a qual,

$$H_{fa}^{ijk} = J_{ijk} \cdot L, \quad (3.55)$$

onde,

H_{fa}^{ijk} : perda de carga devida ao atrito na tubulação adutora de comprimento L , com diâmetro interno d_1 , abastecendo um pivô-central formado por j torres justapostas, cada uma delas de comprimento L_{sk} (m),

J_{ijk} : gradiente hidráulico unitário de perda de carga por atrito na tubulação adutora de diâmetro interno d_1 , abastecendo um pivô-central formado por j torres justapostas, cada uma delas de comprimento L_{sk} , (m/m), e definido por,

$$J_{ijk} = \frac{M. (Q_{ijk})^m}{(d_i)^n}, \quad (3.56)$$

onde,

Q_{ijk} : vazão necessária na adutora de diâmetro interno d_i , para abastecer um pivô-central formado por j torres justapostas, cada uma delas de comprimento L_{sk} (m^3/s) com,

$$M = \frac{10,643}{(C)^m} \quad m = 1,852 \quad e \quad n = 4,87,$$

se for utilizada a fórmula de Hazen-Williams,

ou,

$$M = \frac{8.f}{g.\pi^2} \quad m = 2 \quad e \quad n = 5,$$

se, a universal. O fator f pode ser obtido pela fórmula de Colebrook-White.

A restrição hidráulica, a ser satisfeita com a perda de energia, da fonte de captação de água até a saída do último aspersor da linha lateral, influencia o diâmetro ótimo da adutora. O sistema deverá atender a condição de que a somatória das perdas de carga, da fonte até o último aspersor da linha lateral, seja menor ou igual a diferença entre a pressão na fonte, e a no último aspersor da linha. Assim,

$$\sum \text{perdas de carga} \leq H_0^{sijk} - PS, \quad (3.57)$$

onde,

H_0^{sijk} : altura máxima de pressão na fonte (m),

PS: pressão de serviço nos aspersores (mca), (usualmente PS = 20 mca para aspersores rotativos de baixa pressão).

A somatória das perdas de carga ao longo de todo o trajeto é dada por,

$$H_0^{sijk} = DA + AS + H_{fa}^{ijk} + H_{fl}^{sjk} + AA \pm \Delta Z + PL + PS, \quad (3.58)$$

onde,

DA: desnível geométrico entre a moto-bomba e o ponto pivô (m),

AS: altura de sucção (m),

H_{fl}^{sjk} : perda de carga devida ao atrito na linha lateral do pivô-central formado por j torres justapostas de comprimento L_{sk} (m),

AA: altura dos aspersores (m) (AA = 4 m),

ΔZ : desnível geométrico do ponto pivô ao ponto mais alto da área a ser irrigada (m),

PL: perdas localizadas (m).

Segundo, ORON & KARMELI (1981), pode-se adotar,

$$PL = 0,1.(H_0^{sijk} - PS). \quad (3.59)$$

Pode-se escrever $H_0^{sijk} = H_{fa}^{ijk} + H_{fl}^{sjk} + \text{"outras perdas"}$. É importante observar que, para efeito de dimensionamento da adutora, a perda de carga na linha lateral, bem como as "outras perdas", não interferem na escolha do diâmetro ótimo, no sentido de que estas perdas são as mesmas para qualquer diâmetro escolhido para a adutora. Com isso o modelo a ser proposto adotará $H_0^{sijk} = H_{fa}^{ijk}$.

A velocidade do fluxo de água, na tubulação adutora, deverá

estar limitada, sob risco de desgaste excessivo nas paredes do tubo devido ao atrito de possíveis elementos sólidos dispersos na água. Uma análise de projetos de adutoras de sistemas de irrigação aponta para um limite máximo de 3.0 m/s para esta velocidade, e será também aqui adotada. Assim, deverá também haver um limite máximo para a vazão Q_{ijk} , e consequentemente, para o número de torres a serem acopladas, definindo deste modo a configuração do pivô-central.

Se S_1 (m^2), for a área da seção transversal da tubulação adutora de diâmetro interno d_1 (m), tem-se como consequência que,

$$Q_{ijk} \leq 3.S_1, \quad (3.60)$$

ou,

$$Q_{ijk} \leq \frac{3.\pi.d_1^2}{4}. \quad (3.61)$$

Fixada uma vazão Q_{ijk} , o número j de torres escolhido pelo modelo, deverá ser portanto, para cada d_1 ,

$$5 \leq j \leq n(1,k) = n_{1k}. \quad (3.62)$$

Os limites máximos n_{1k} não estão explicitamente determinados. Estes limites obviamente poderiam ser alterados tomando-se diâmetros especiais para a adutora. Como exemplo desta situação, pode-se citar a existência de um pivô teste, em operação, da Carborundum S/A, contendo 18 torres, com raio de 783 metros irrigando uma área de 193 ha, no município de Morro Agudo.

Tabela 13. Limite máximo para o número de torres (*)

i	diâmetro interno d_i (m)	limite máximo n_{ik}		
		k = 1	k = 2	k = 3
1	0,1500	9	8	7
2	0,1754	11	9	9
3	0,2002	13	11	10
4	0,2502	—	—	—
5	0,3010	—	—	—

(*) Lb = 6 mm

Tabela 14. Limite máximo para o número de torres (*)

i	diâmetro interno d_i (m)	limite máximo n_{ik}		
		k = 1	k = 2	k = 3
1	0,1500	8	9	6
2	0,1754	9	9	7
3	0,2002	11	12	8
4	0,2502	14	12	10
5	0,3010	—	—	—

(*) Lb = 8 mm

Tabela 15. Limite máximo para o número de torres (*)

i	diâmetro interno d_i (m)	limite máximo n_{ik}		
		k = 1	k = 2	k = 3
1	0,1500	7	6	5
2	0,1754	8	7	6
3	0,2002	10	8	7
4	0,2502	12	10	9
5	0,3010	—	—	11

(*) Lb = 10 mm

Tabela 16. Limite máximo para o número de torres (*)

i	diâmetro interno d _i (m)	limite máximo n _{ik}		
		k = 1	k = 2	k = 3
1	0,1500	6	5	5
2	0,1754	7	6	5
3	0,2002	9	7	6
4	0,2502	11	9	8
5	0,3010	14	12	10

(*) Lb = 12 mm

Fica implícito nas tabelas 13 a 16 que quando não houver um limitante especificado este será 15 para k = 1, 13 para k = 2 e 12 para k = 3 que correspondem aos limites do fabricante considerado.

Não há necessidade da definição de restrições para o controle da uniformidade de aplicação de água pelo pivô-central, uma vez que este equipamento é dotado de reguladores de pressão nos aspersores, que cumprem esta finalidade.

A restrição a ser obedecida pela descarga do sistema é,

$$Q_{ijk} / Q_0 \leq 1 \quad i \in I, j \in J, k \in K, \quad (3.63)$$

onde Q_0 (m³/s) é a vazão máxima disponível na fonte. Como Q_{ijk} é função da área a ser irrigada, as restrições (3.63) são equivalentes à,

$$R_{ijk} \leq R_{\max}, \quad (3.64)$$

onde,

$$R_{\max} = 6.10^2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot Q_0 \cdot T}{\pi \cdot Lb}}, \quad (3.65)$$

sendo $R_{\max}$ medido em metros.

Uma das dificuldades para a implementação do modelo aqui

descrito, reside no fato de que as variáveis de decisão d_i são discretas, e não inteiras, com valores definidos pelos fabricantes de equipamentos. No sentido de colocar o problema de otimização que fornece o diâmetro ótimo da adutora numa forma mais adequada, serão definidas novas variáveis para a obtenção de um problema de programação inteira (PPI).

Na realidade, serão formulados $j.k$ problemas independentes, que deverão ser otimizados. O parâmetro k é identificado pelo tamanho do vão L_{sk} , adotado no projeto, enquanto que j , está relacionado com o número de torres. Estes parâmetros juntamente com a lâmina aplicada pelo pivô-central definem a vazão Q_{ijk} do sistema.

Então para cada $j \in J$, $k \in K$, a função objetivo c_{jk} será dada por,

$$\begin{aligned}
 C_{jk} = & \sum_{i \in I} c(d_i) \cdot L \cdot FRC_{ta} \cdot \alpha_{ijk} + \sum_{i \in I} \frac{Lm \cdot A_{jk} \cdot H_0^{s_{ijk}} \cdot \gamma}{E_{mb} \cdot 3,6 \cdot 10^2} \cdot C_{kwh} \cdot \alpha_{ijk} + \\
 & + \sum_{i \in I} 277,96 \cdot \left[\frac{1000}{75 \cdot E_{mb}} \cdot Q_{ijk} \cdot H_0^{s_{ijk}} \right]^{0,85} \cdot FRC_{mb} \cdot \alpha_{ijk} + \\
 & + \sum_{i \in I} 79,93 \cdot \left[\frac{1000}{75 \cdot E_{mb}} \cdot Q_{ijk} \cdot H_0^{s_{ijk}} \right]^{0,74} \cdot FRC_{re} \cdot \alpha_{ijk} . \quad (3.66)
 \end{aligned}$$

Em relação à altura manométrica total, para efeito de dimensionamento da adutora, será adotado o critério de que, o diâmetro ótimo será aquele que fornece o menor custo unitário em

relação à perda de energia por atrito na adutora.

Este critério, significa que $H_0^{s1jk} = H_{fa}^{1jk}$, uma vez que tanto H_{f1}^{s1jk} como as outras perdas serão comuns na configuração que será dimensionada. É importante observar que desta forma, o consumo de energia, é relativo somente à uma altura manométrica correspondente à perda de carga por atrito na adutora. Também não há necessidade de considerar a parcela da energia relativa à demanda, pois ela é constante para cada diâmetro interno possível para a adutora.

Então para cada $j \in J$, $k \in K$ tal que $5 \leq j \leq n_{1k}$, otém-se o PPI,

$$\text{Problema } P_{jk}: \quad \text{Min } C_{jk} \quad (3.67)$$

$$\alpha_{1jk}$$

$$\text{s.a.} \quad H_0^{s1jk} = H_{fa}^{1jk} \quad (3.68)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_{ijk} = 1 \quad (3.69)$$

$$\alpha_{ijk} = 0/1 \quad (3.70)$$

Observe que $5 \leq j \leq n_{1k}$ é equivalente a afirmar que vale a relação,

$$d_1 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{Q_{1jk}}{3 \cdot \pi}} \quad (3.71)$$

Nas tabelas 17 a 20 tem-se as soluções dos problemas P_{jk} em função de j e k , para vários valores de L_b , enquanto que as tabelas 21 a 24 apresentam as soluções adotadas pela Carborundum S/A. HW significa Hazen-Williams e UN Universal.

Tabela 17. Soluções ótimas dos problemas P_{jk}

j	k	1		2		3	
		HW	UN	HW	UN	HW	UN
5		d_1	d_1	d_1	d_1	d_2	d_1
6		d_1	d_1	d_2	d_2	d_2	d_2
7		d_2	d_2	d_2	d_2	d_3	d_2
8		d_2	d_2	d_3	d_2	d_4	d_4
9		d_3	d_2	d_4	d_3	d_4	d_4
10		d_4	d_3	d_4	d_4	d_4	d_4
11		d_4	d_4	d_4	d_4	d_5	d_4
12		d_4	d_4	d_5	d_4	d_5	d_5
13		d_4	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
14		d_5	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
15		d_5	d_5	d_5	d_5	d_5	d_5

lb = 6 mm

Tabela 18. Soluções ótimas dos problemas P_{jk}

j	k	1		2		3	
		HW	UN	HW	UN	HW	UN
5		d_1	d_1	d_2	d_2	d_2	d_2
6		d_2	d_2	d_2	d_2	d_3	d_2
7		d_2	d_2	d_3	d_3	d_4	d_4
8		d_3	d_2	d_4	d_4	d_4	d_4
9		d_4	d_3	d_4	d_4	d_5	d_4
10		d_4	d_4	d_4	d_4	d_5	d_5
11		d_4	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
12		d_5	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
13		d_5	d_5	d_5	d_5	d_5	d_5
14		d_5	d_5	d_5	d_5	infactível	
15		d_5	d_5	infactível		infactível	

lb = 8 mm

Tabela 19. Soluções ótimas dos Problemas P_{jk}

j	k	1		2		3	
		HW	UN	HW	UN	HW	UN
5		d_2	d_1	d_2	d_2	d_2	d_2
6		d_2	d_2	d_3	d_2	d_4	d_3
7		d_3	d_2	d_4	d_4	d_4	d_4
8		d_4	d_4	d_4	d_4	d_5	d_4
9		d_4	d_4	d_4	d_4	d_5	d_5
10		d_4	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
11		d_5	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
12		d_5	d_5	d_5	d_5	infactível	
13		d_5	d_5	d_5	d_5	infactível	
14		d_5	d_5	infactível		infactível	
15		d_5	d_5	infactível		infactível	

lb = 10 mm

Tabela 20. Soluções ótimas dos Problemas P_{jk}

j	k	1		2		3	
		HW	UN	HW	UN	HW	UN
5		d_2	d_2	d_2	d_2	d_3	d_3
6		d_2	d_2	d_4	d_3	d_4	d_4
7		d_4	d_3	d_4	d_4	d_4	d_4
8		d_4	d_4	d_4	d_4	d_5	d_5
9		d_4	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
10		d_5	d_4	d_5	d_5	d_5	d_5
11		d_5	d_4	d_5	d_5	infactível	
12		d_5	d_5	d_5	d_5	infactível	
13		d_5	d_5	infactível		infactível	
14		d_5	d_5	infactível		infactível	
15		infactível		infactível		infactível	

lb = 12 mm

Tabela 21. Soluções adotadas pela Carborundum S/A

k	1	2	3
j			
5	d_1	d_1	d_1
6	d_1	d_1	d_1
7	d_1	d_1	d_2
8	d_1	d_2	d_3
9	d_2	d_3	d_4
10	d_3	d_4	d_4
11	d_3	d_4	d_4
12	d_4	d_4	d_5
13	d_4	d_5	d_5
14	d_4	d_5	d_6
15	d_5	d_5	d_6

lb = 6 mm $d : 14 \text{ pol}$

Tabela 22. Soluções adotadas pela Carborundum S/A

k	1	2	3
j			
5	d_1	d_1	d_1
6	d_1	d_1	d_2
7	d_1	d_2	d_3
8	d_2	d_3	d_4
9	d_3	d_4	d_4
10	d_4	d_4	d_5
11	d_4	d_4	d_5
12	d_4	d_5	d_5
13	d_5	d_5	d_6
14	d_5	d_6	d_6
15	d_5	d_6	d_7

lb = 8 mm $d_7 : 16 \text{ pol}$

Tabela 23. Soluções adotadas pela Carborundum S/A

k	1	2	3
j			
5	d_1	d_1	d_2
6	d_1	d_2	d_3
7	d_2	d_3	d_4
8	d_3	d_4	d_4
9	d_4	d_4	d_5
10	d_4	d_5	d_5
11	d_4	d_5	d_6
12	d_5	d_5	d_6
13	d_5	d_6	d_6
14	d_5	d_6	d_7
15	d_6	d_7	d_7

lb = 10 mm

Tabela 24. Soluções adotadas pela Carborundum S/A

k	1	2	3
j			
5	d_1	d_2	d_3
6	d_2	d_3	d_4
7	d_3	d_4	d_4
8	d_4	d_4	d_5
9	d_4	d_5	d_5
10	d_4	d_5	d_6
11	d_5	d_5	d_6
12	d_5	d_5	d_7
13	d_6	d_6	d_7
14	d_6	d_7	d_8
15	d_6	d_7	d_8

lb = 12 mm

 d_8 : 18 pol

3.7. Localização ótima de pivôs-centrais

A determinação do ponto ótimo de instalação de um pivô-central é de grande relevância quando o projeto se referir a pequenas áreas com fronteira irregular. Essas áreas poderão conter regiões a serem preservadas, lagos ou estradas, gerando descontinuidade ou mesmo áreas não conexas. Na agricultura irrigada brasileira, esta é a situação da maioria dos irrigantes que utilizam a tecnologia do pivô-central. Neste trabalho será adotada a idéia utilizada por ANDERSON et al. (1985), ou ROCHESTER et al. (1988) na qual a área a ser irrigada é aproximada por uma matriz de pontos discretos. Em relação ao modelo adotado por estes autores, o estudo aqui desenvolvido será diferenciado, tanto no critério quanto na forma de estabelecer as restrições impostas. O trabalho citado não leva em consideração a adutora do pivô-central, mas por outro lado analisa o caso de pivôs-centrais móveis, que é uma modalidade não utilizada no Brasil.

3.7.1 As restrições do modelo

A região representada na Figura 6, será considerada como uma área destinada a receber pivôs-centrais. A linha cheia define a fronteira desta região. Num primeiro momento, a escala a ser adotada para subdividir a área, será igual a medida do raio efetivamente molhado pelo pivô-central. Será também considerada a hipótese de que todos os pivôs-centrais possuam o mesmo raio. A linha pontilhada limita a região de factibilidade, e define os

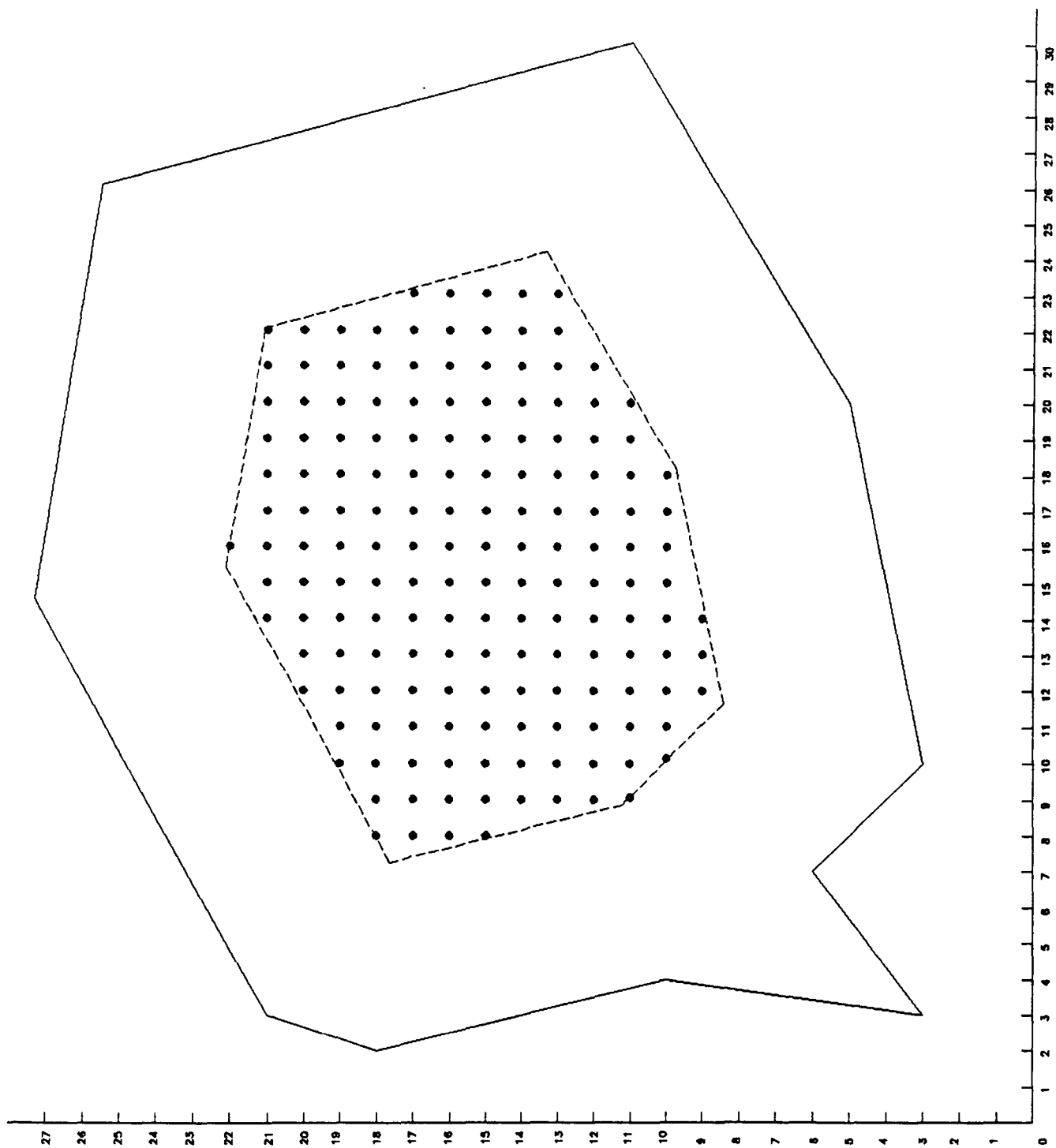


Figura 6. Área em estudo para localização de pivôs-centrais

pontos que são candidatos potenciais a receber os equipamentos. Esta região, é formada apenas por pontos de instalação que permitam um giro completo do pivô-central. Caso a área a ser irrigada possua uma única fonte de captação de água, será sempre possível alocar o sistema de eixos de modo que esta localize-se no ponto (0,0). Se a captação se der ao longo de um rio, um estudo detalhado deverá ser feito para determinar a melhor forma de alocar o sistema de eixos.

Para ilustrar a situação, suponha que o ponto (17,17) da Figura 6 seja escolhido para receber um pivô-central. Sua área molhada é representada pelos pontos (16,17), (17,16), (17,17), (17,18), (18,17). Em contrapartida qualquer pivô-central instalado em um destes pontos molha o ponto (17,17). Assim, a equação que descreve a quantidade de água, em lâminas hídricas recebidas pelo ponto (17,17), restrita a uma rotação é,

$$1.P_{16,17} + 1.P_{17,16} + 1.P_{17,17} + 1.P_{17,18} + 1.P_{18,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.72)$$

onde $P_{r,s}$ são os outros pontos da região de factibilidade.

A variável $P_{i,j}$ é tal que,

$$P_{i,j} = 1 \text{ se o pivô-central for instalado no ponto } (i,j) \quad (3.73) \\ = 0, \text{ caso contrário } \quad i \in I, j \in J.$$

Para o ponto (19,17) tem-se,

$$1.P_{18,17} + 1.P_{19,16} + 1.P_{19,17} + 1.P_{19,18} + 1.P_{20,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.74)$$

e para o ponto (18,17),

$$1.P_{17,17} + 1.P_{18,16} + 1.P_{18,17} + 1.P_{18,18} + 1.P_{19,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.75)$$

Observe que a solução, $P_{17,17} = P_{19,17} = 1$, ou seja alocar um pivô-central em (17,17) e outro em (19,17) é impossível para a restrição (3.75). Assim esta forma de estabelecer as restrições do modelo não permite a tangência dos pivôs-centrais, com linhas de centro paralelas aos eixos coordenados da grade de pontos que representa a área. Portanto, a metodologia descrita por ANDERSON et al. (1985), não poderá ser utilizada aqui.

No sentido de adotar o tangenciamento dos pivôs-centrais, como uma possibilidade viável, será proposta a retirada da área irrigada de cada um deles, metade da sua fronteira, sempre numa mesma posição. Será adotado ainda o lado esquerdo como sendo esta parte retirada. Na Figura 7, os pontos "cheios", representam a área irrigada pelo pivô-central, com escala igual ao raio irrigado.

Assim, a área molhada pelo pivô-central instalado em (17,17) passa a ser representada pelos pontos (17,16), (17,17) e (18,17). Nestas condições as equações (3.72), (3.74) e (3.75) assumiriam respectivamente as formas,

$$1.P_{17,16} + 1.P_{17,17} + 1.P_{18,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.72')$$

$$1.P_{19,16} + 1.P_{19,17} + 1.P_{20,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.74')$$

$$1.P_{18,16} + 1.P_{18,17} + 1.P_{19,17} + \sum_r \sum_s 0.P_{r,s} \leq 1, \quad (3.75')$$

As equações (3.72'), (3.74') e (3.75') permitem a solução $P_{17,17} = P_{19,17} = 1$, que corresponde a instalar um pivô-central em (17,17) e outro em (19,17), e com isso é possível gerar pontos de tangência alinhados horizontalmente ou verticalmente. A questão do tamanho da escala a ser adotada deverá ser estudada para cada situação, uma vez que quanto menor esta escala, maior será a precisão obtida, porém o número de restrições envolvidas é aumentado. Verificou-se que a escala de 1/5 do raio irrigado alia precisão e executabilidade. Os pontos "cheios" da figura 8 representam a área irrigada por um pivô-central com esta escala.

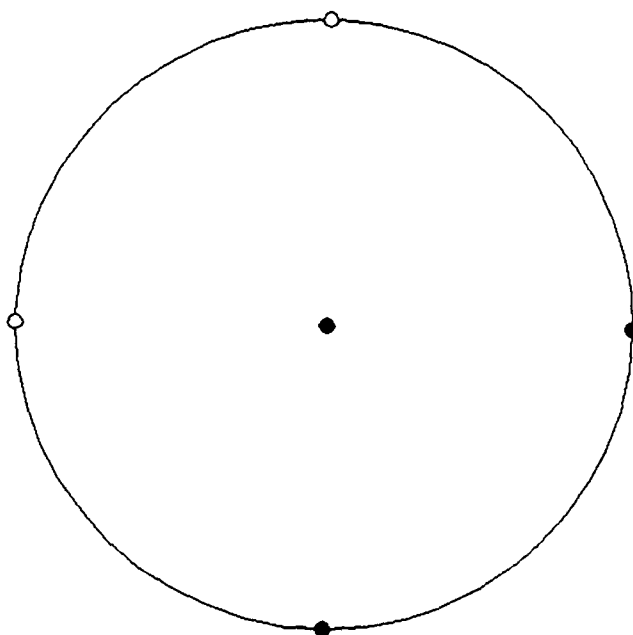


Figura 7. Representação do pivô-central com escala igual ao raio irrigado

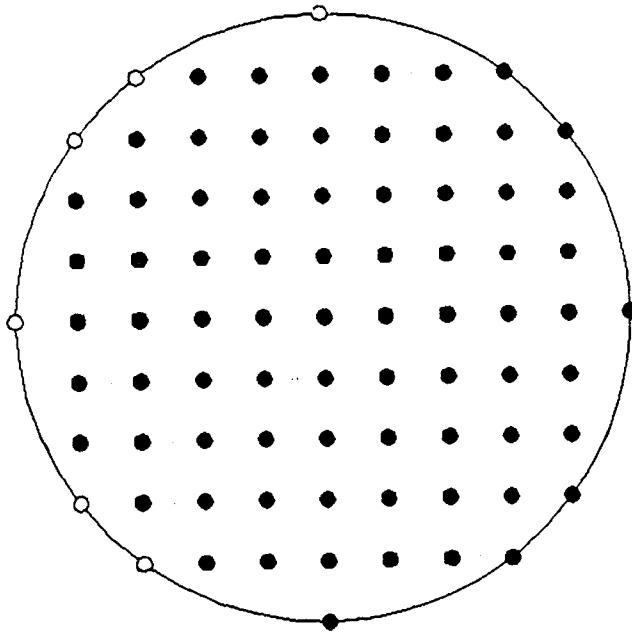


Figura 8. Representação do pivô-central com escala 1/5 do raio irrigado

O conjunto destas restrições, escritas para todos os pontos factíveis da região a ser irrigada pode ser representado na forma matricial por,

$$E.x \leq e, \quad (3.76)$$

onde

E é uma matriz de ordem p em que as linhas são formadas pelos elementos 0 e 1 e correspondem a restrições do tipo (3.72'), escritas para cada ponto factível.

Se for definido para cada (r,s) pertencente à região de factibilidade RF (de coordenadas inteiras) o conjunto,

$$\Phi(r,s) = \{(i,j) \in RF / (i-r)^2 + (j-s)^2 \leq R^2\} - \{(i,j) \in RF / (i-r)^2 + (j-s)^2 = R^2 \text{ e } i < r\} - \{(r,s+R)\}, \text{ tem-se,}$$

$$E_{ij} = 1 \text{ se } (i,j) \in \Phi(r,s) \\ = 0 \text{ caso contrário,}$$

e assim o conjunto de restrições a ser obedecido é,

$$\sum_i \sum_j E_{i,j} \cdot P_{i,j} \leq 1 \text{ para cada } (i,j) \in RF,$$

x é o vetor com p componentes $P_{i,j}$, representando os pontos candidatos em potencial a receber os pivôs-centrais. Após uma reordenação de índices, se necessário, pode-se representá-lo por,

$$x = (P_{1,1}, \dots, P_{m_1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{m_2,2}, P_{1,n}, \dots, P_{m_n,n})^t,$$

com $p = m_1 + m_2 + \dots + m_n$,

e é o vetor com p componentes iguais a 1.

Caso o tamanho do raio R a ser adotado para o pivô-central seja uma variável livre, o problema torna-se de grande complexidade.

3.7.2. A função objetivo

O critério a ser otimizado deverá levar em conta a obtenção da máxima cobertura pelos pivôs-centrais. Se estes forem todos de mesmo raio, uma função objetivo poderá ser a maximização do número de equipamentos a serem instalados. Observe que se este critério for adotado, com várias possibilidades de tamanho de pivôs-centrais, a tendência do modelo será a de escolher aqueles que possuam raios menores, aumentando assim o custo unitário do hectare irrigado.

Aqui será definido um critério, que leve em consideração a adutora e as possíveis fontes de captação de água como elementos

componentes do sistema global.

Suponha que o sistema de coordenadas, com eixos ortogonais, esteja alocado de modo que os pontos de captação de água fiquem localizados sobre um dos eixos coordenados. Se houver uma única fonte na área, esta será sempre alocada no ponto (0,0). A questão da alocação dos eixos deverá ser estudada para cada caso. A figura 6 representa uma situação em que a captação da água é feita num único ponto localizado em (0,0).

Os candidatos a pontos de instalação mais próximos dos pontos de captação de água teoricamente teriam preferência no critério de otimização. O teórico aqui empregado, é porque poderão existir pontos mais afastados, com condições de cultivo mais favoráveis, embora com custo maior. Cada ponto candidato a receber um pivô-central receberá um coeficiente (peso ou benefício associado ao ponto), definido após uma análise criteriosa das condições de instalação e cultivo associadas a ele. Com a finalidade de simular estas condições serão adotados pesos, em função da distância do possível ponto de instalação ao local de captação de água. Será assim determinado o valor máximo do número de pivôs-centrais que a área comporta. Tendo n_{max} , o modelo fornece os pontos de localização de todos os pivôs-centrais. A seguir, o agricultor deverá responder a questão se todos eles serão instalados no horizonte de planejamento. Em caso afirmativo, o cronograma de instalação será definido pelos valores de custos associados a cada ponto, ou pela expectativa de retorno do investimento de cada

equipamento. Caso a opção do agricultor seja por um número de equipamentos $n < n_{max}$, este deverá ser orientado da possibilidade de que a solução do modelo poderá não permitir a expansão futura para o número de equipamentos n_{max} . Para citar um exemplo desta situação, suponha que na figura 6, com escala 1/5 do raio irrigado, estejam instalados tres pivôs-centrais, respectivamente em (8,18), (12,9) e (21,13). Embora a área permita um projeto com quatro pivôs-centrais deste tipo, não mais será possível a instalação de um novo equipamento, o que reduziria a área total irrigada. Daí a importância da determinação de n_{max} para cada projeto.

Para as condições representadas na figura 6, será adotada a função objetivo $b^t.x = \sum_i \sum_j b_{i,j}.P_{i,j}$, onde o coeficiente $b_{i,j} = -(i^2+j^2)$, chamado benefício associado ao ponto (i,j) leva em consideração a distância da captação ao ponto $P_{i,j} = (i,j)$.

De modo geral o problema a ser resolvido, é portanto,

$$\text{Max } b^t.x \quad (3.77)$$

$$\text{s.a. } Ex \leq e \quad (3.78)$$

$$x = 0/1 \quad (3.79)$$

$$x \in RF \quad (3.80)$$

O problema (3.77)...(3.80) é conhecido como Set Packing Problem. Como este trabalho tem por objetivo maior tratar de formulações, não haverá a preocupação de especializar algum algoritmo para este problema, sendo o mesmo resolvido por um

algoritmo geral do tipo enumeração utilizando Branch and Bound.

Observe que além de fornecer os pontos ótimos de localização, o problema acima ainda determina o valor de $n_{\max}$. Caso a decisão seja por instalar n pivôs-centrais, $n < n_{\max}$ deve-se ainda resolver o seguinte problema para $x \in RF$,

$$\text{Max} \quad b^t x \quad (3.81)$$

$$\text{s.a.} \quad Ex \leq e \quad (3.82)$$

$$e^t x \leq n \quad (3.83)$$

$$x = 0/1 \quad (3.84)$$

O problema (3.81) ... (3.84) pode ser olhado como sendo o problema (3.77) ... (3.80) em que a matriz E possui uma linha a mais, formada inteiramente de elementos iguais a 1.

Como (3.77) ... (3.80) é um problema com variável de decisão inteira, uma análise final da sua solução é aconselhável, para que se possa ajustar os pontos de instalação a serem adotados para o projeto, de modo a permitir um melhor posicionamento dos pivôs-centrais. Esta análise é dispensável para o caso do modelo adotar variável de decisão contínua. Pode-se dizer que o problema formulado para localização ótima de pivôs-centrais tem alguma semelhança com o de cortes (cutting stock bidimensional). No entanto devido às características geométricas das áreas a serem irrigadas as técnicas desenvolvidas para problemas de corte não podem ser aplicadas neste caso.

A Tabela 25 apresenta as soluções do problema (3.77)...(3.80) para a área da figura 6, utilizando escala igual a 1/5 do raio

irrigado e função benefício $b_{ij} = -(i^2 + j^2)$, enquanto que a Tabela 26 refere-se à função $b_{ij} = -j$. Esta última possibilidade poderia tratar-se da captação de água ao longo de um rio com seu curso paralelo ao eixo de coordenadas horizontal. Em ambas as situações foram anexadas ao problema (3.77)...(3.80) restrições do tipo $e^t x \geq 1, 2 \dots 5$.

Tabela 25. Localização ótima dos pivôs-centrais (#)				
número de pivôs	ponto alocado			
1	(10,10)			
2	(8,18) (12,9)			
3	(8,18)	(12,9)	(21,13)	
4	(10,10)	(12,20)	(20,11)	(22,21)
5	infactível			

$$(*) \quad b_{ij} = -(i^2 + j^2)$$

Tabela 26. Localização ótima dos pivôs-centrais (##)				
número de pivôs	ponto alocado			
1	(12,9)			
2	(10,10) (20,11)			
3	(9,18)	(13,9)	(23,13)	
4	(10,10)	(12,20)	(20,11)	(22,21)
5	infactível			

$$(**) \quad b_{ij} = -j$$

As Figuras 9 a 12 representam as situações da Tabela 25 enquanto que as Figuras 13 a 15 correspondem a Tabela 26.

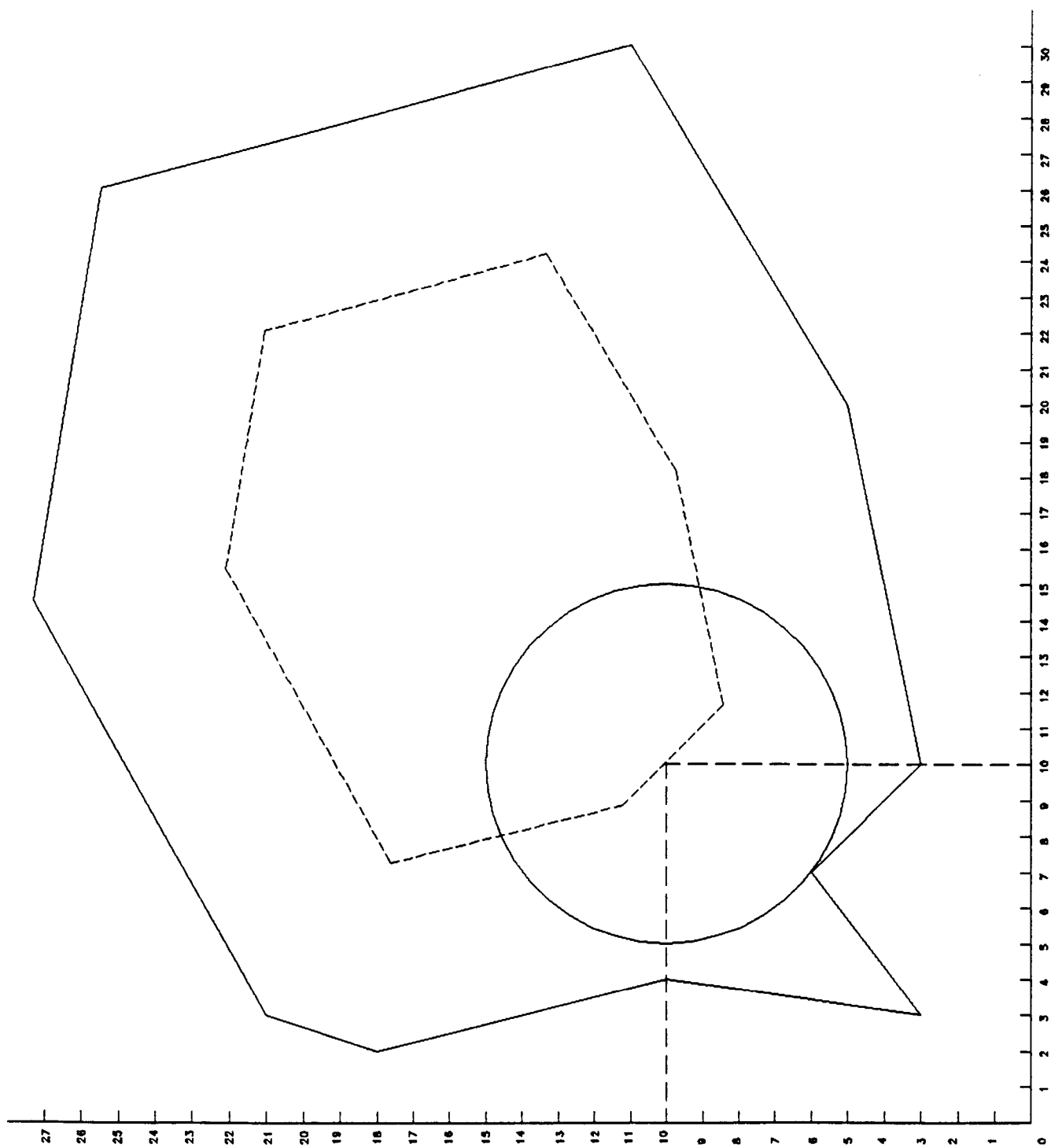


Figura 9. Localização ótima para um pivô-central (Tab 25)

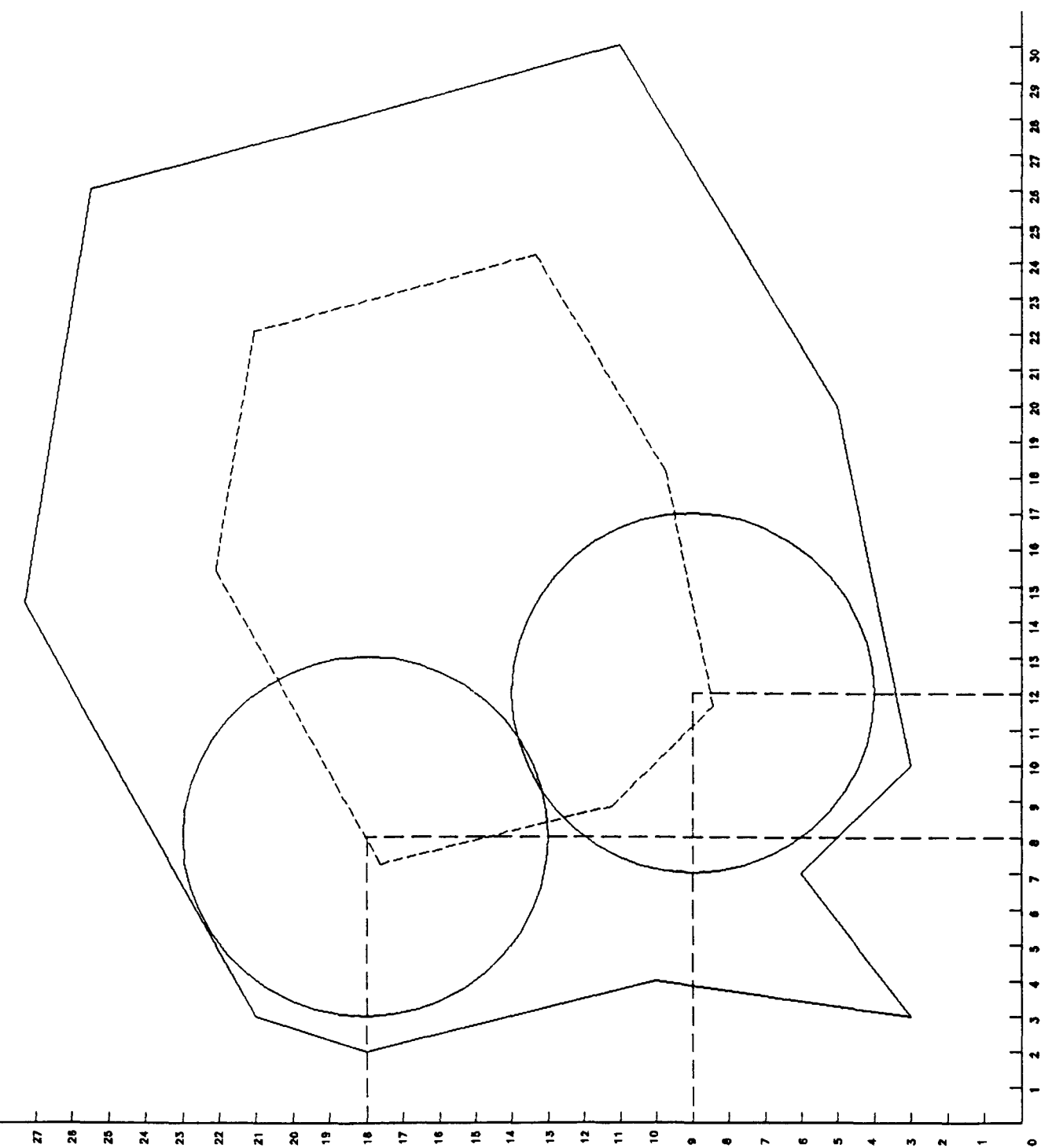


Figura 10. Localização ótima para dois pivôs-centrais (Tab 25)

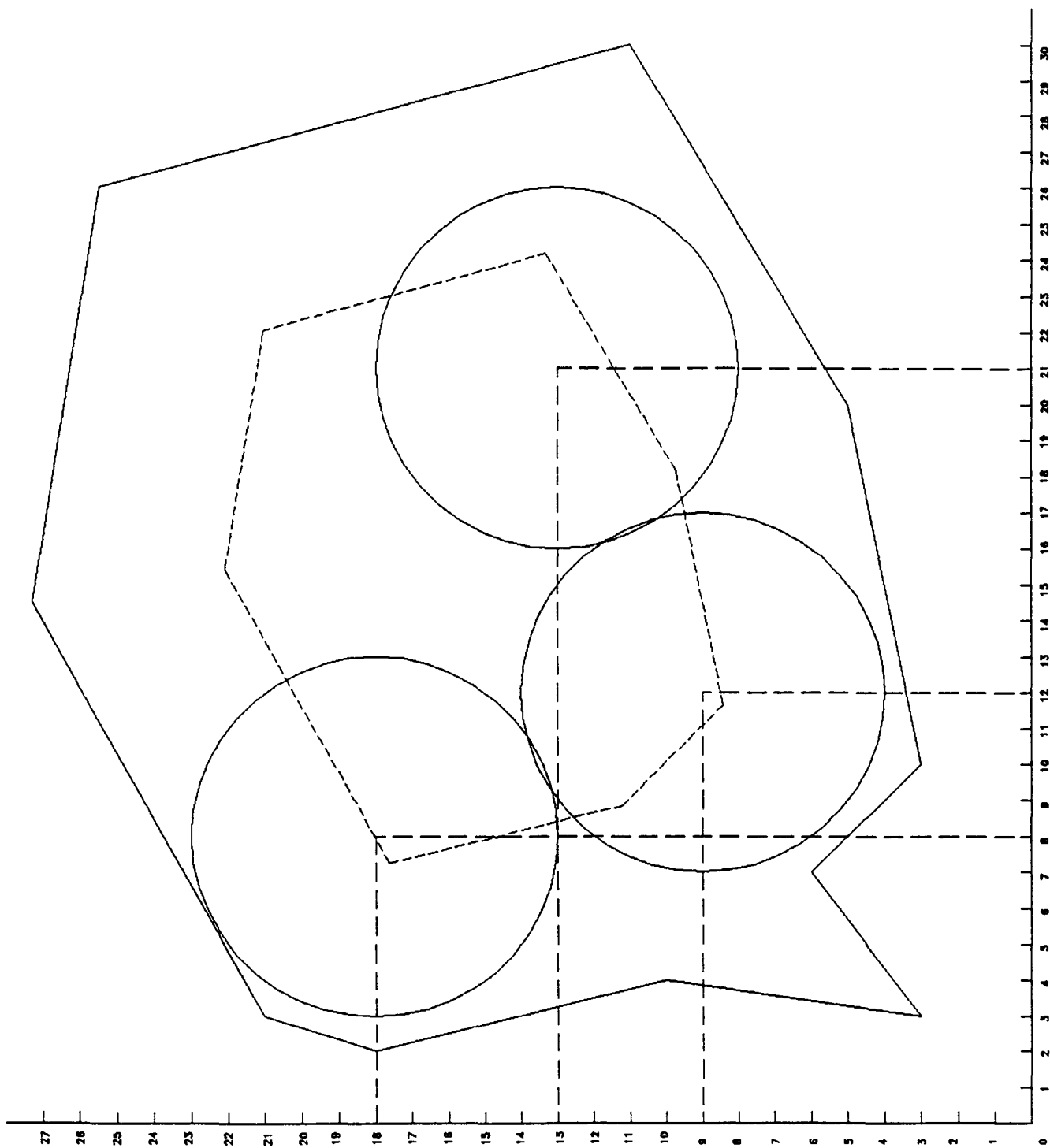


Figura 11. Localização ótima para três pivôs-centrais (Tab 25)

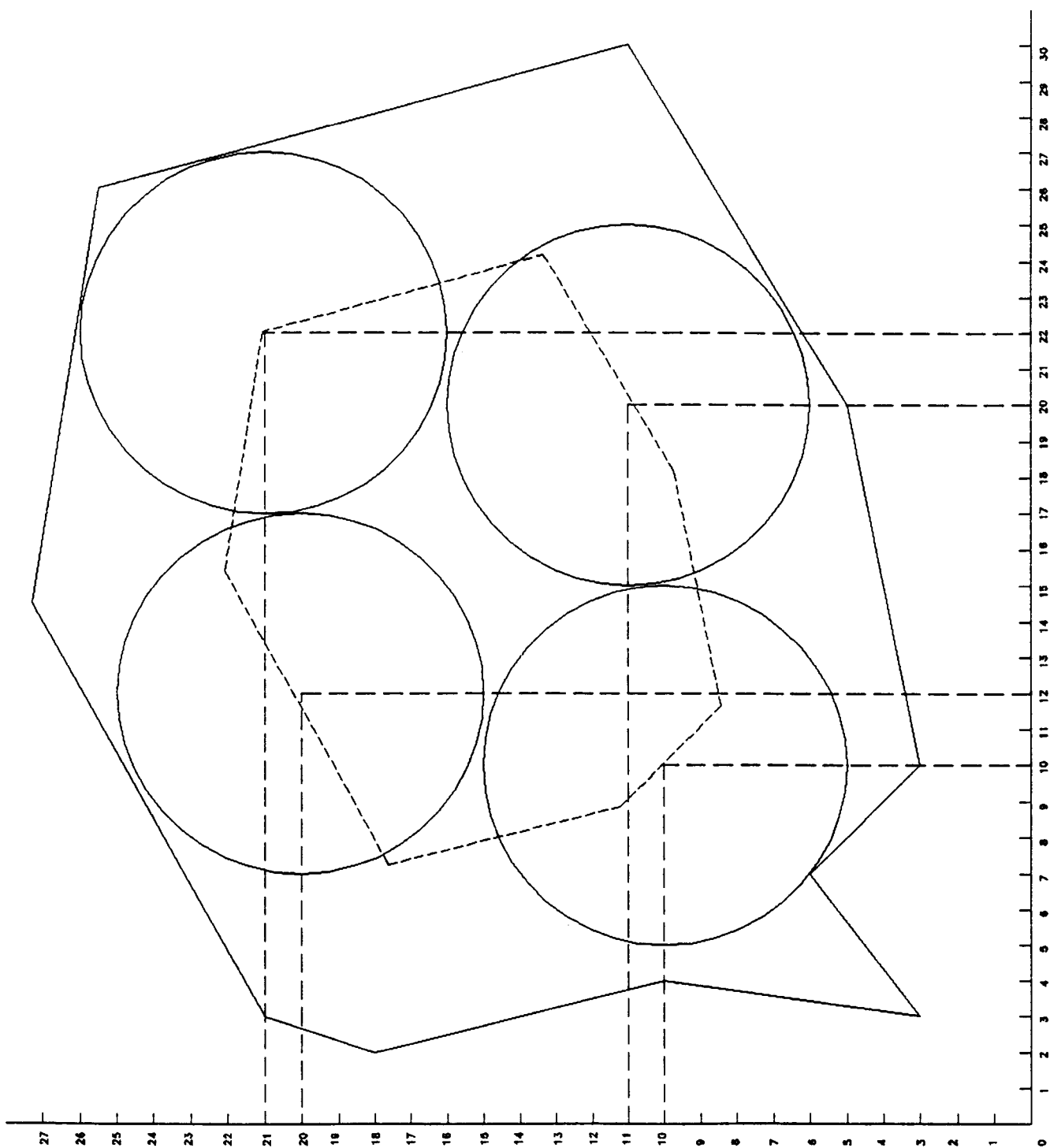


Figura 12. Localização ótimas para quatro pivôs-centrais (Tab 25)

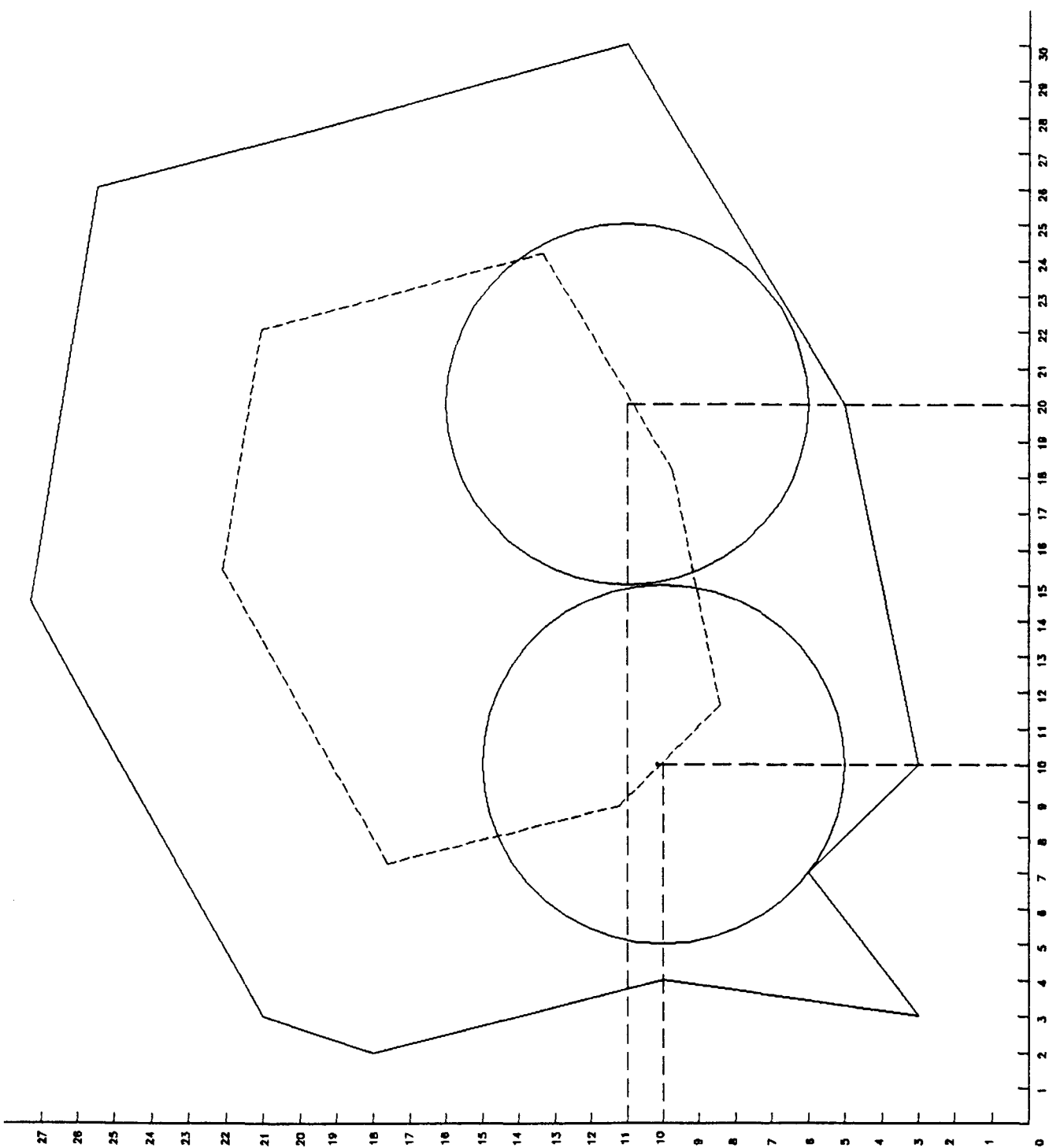


Figura 14. Localização ótima para dois pivôs-centrais (Tab 26)

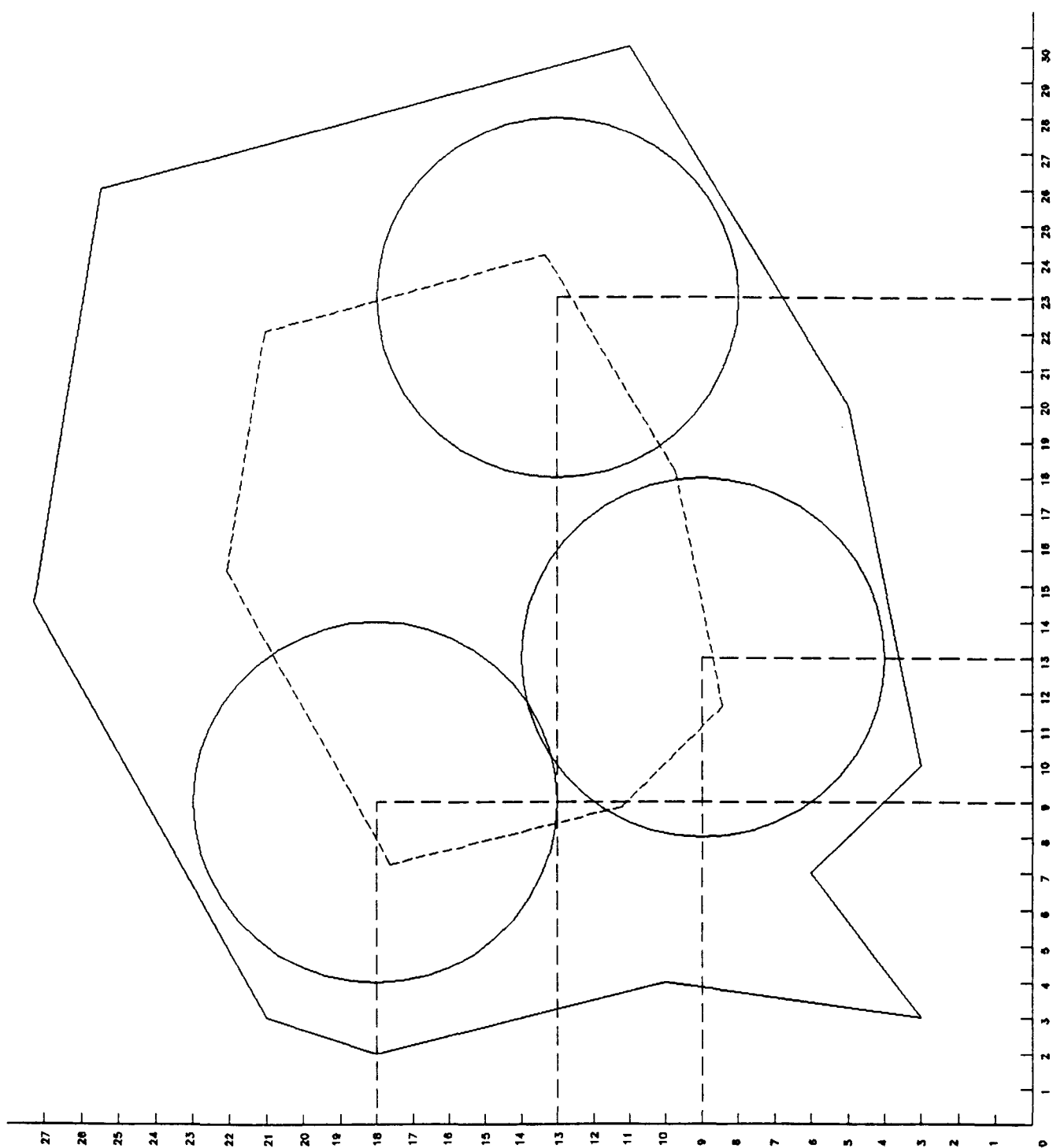


Figura 15. Localização ótima para três pivôs-centrais (Tab 26)

3.8. Planejamento da irrigação para setores de pivôs-centrais

Este problema será formulado para definir o manejo de um ou mais pivôs-centrais, onde em cada um deles, existem diversas culturas, ou uma única cultura com diferentes estádios de desenvolvimento, caracterizando os setores do pivô-central.

Cada cultura, em cada estágio, possui necessidades hídricas diferentes. Assim, num mesmo dia, uma mesma lâmina não necessariamente deverá ser aplicada a todos os setores de um mesmo pivô-central. Observe que o plantio por setores é uma maneira eficiente de evitar que uma área de cultivo muito grande passe por um pico de consumo de água, notadamente quando este recurso é escasso. É claro, que neste caso as épocas de plantio deverão ser planejadas. O problema do planejamento da irrigação para os setores de pivôs-centrais terá como objetivo definir um manejo para um conjunto I de pivôs-centrais, onde cada um deles será subdividido em S_i setores. Serão estabelecidos ciclos de operação com duração de um ou dois dias, dependendo da medida do raio de cada pivô-central. Haverá um programa de controle de umidade através de um balanço hídrico do solo, em cada ciclo de operação. Serão adotadas a umidade na capacidade de campo (*), e a umidade crítica do solo (**) como parâmetros de referência para este controle. Toda vez que a umidade do solo, num ciclo j, aproximar-se da umidade crítica, o setor S_i deverá ser irrigado.

(*)	Capacidade	de	campo:	É	a	máxima	quantidade	de	água	retida	num
solo,	que	após	ser		saturado,		teve	sua	drenagem		natural
interrompida.											
(**)	Umidade	crítica:	É	o	valor	da	umidade	que	proporciona	um	
rendimento	relativo	de	80%	do	do	rendimento	potencial	máximo	da	da	
cultura.											

3.8.1. Elementos para a formulação do problema de planejamento da irrigação por setores de pivôs-centrais

O volume v_{isj} (m^3) aplicado pelo pivô-central i , no setor s , no ciclo j , pode ser obtido por,

$$v_{isj} = \frac{10 \cdot A_{is} \cdot h_{isj}}{Ep_i} , \quad (3.85)$$

onde,

A_{is} : área correspondente ao setor s , do pivô-central i , (ha),

h_{isj} : lâmina hídrica líquida aplicada pelo pivô-central i , no setor s , no ciclo j , (mm),

Ep_i : eficiência de aplicação do pivô-central i , (%),

Como,

$$Lb_{isj} = \frac{h_{isj}}{Ep_i} , \quad (3.86)$$

pode-se escrever,

$$v_{isj} = 10 \cdot A_{is} \cdot Lb_{isj} , \quad (3.87)$$

onde

Lb_{isj} : lâmina hídrica bruta aplicada pelo pivô-central i , no setor s , no ciclo j , (mm).

É importante observar que diferentes setores de um mesmo pivô-central poderão receber lâminas hídricas diferentes, o que equivale a dizer que o equipamento poderá operar com velocidades de rotação diferentes em cada setor.

Se θ_{is} (graus) é o ângulo central do setor s e RM_i (m) é o raio irrigado pelo pivô-central i , tem-se que,

$$A_{is} = \frac{\pi \cdot RM_i^2 \cdot \theta_{is}}{3,6 \cdot 10^6} . \quad (3.88)$$

Neste trabalho será utilizado,

$$RM_i = RT_i + 27,97 , \quad (3.89)$$

onde RT_i (m) é o raio da última torre do pivô-central i.

O tempo necessário T_{isj} (h), para que o pivô-central i possa irrigar a área A_{is} , aplicando a lâmina bruta Lb_{isj} , operando com vazão Q_i no ponto pivô é,

$$T_{isj} = \frac{A_{is} \cdot Lb_{isj}}{360 \cdot Q_i} , \quad (3.90)$$

onde Q_i (m^3/s), é a vazão de projeto do pivô-central i,

Portanto,

$$T_{isj} = \frac{10^{-6} \pi \cdot (RT_i + 27,97)^2 \cdot \theta_{is} \cdot Lb_{isj}}{1296 \cdot Q_i} . \quad (3.91)$$

Será necessário verificar se a lâmina Lb_{isj} aplicada é compatível com as características do equipamento em estudo, isto é, verificar se T_{isj} é maior ou igual ao tempo total mínimo de rotação do pivô-central i, tempo este obtido com o percentímetro regulado à 100% de sua capacidade. A velocidade máxima da última torre dos pivôs-centrais em estudo é de 125 m/h.

Nestas condições, tem-se,

$$T_{i \min} = \frac{CT_i}{V_{\max}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot RT_i}{125} , \quad (3.92)$$

onde

$T_{i_{\min}}$: tempo mínimo possível para uma rotação completa do pivô-central i , (h),

CT_i : espaço percorrido pela última torre do pivô-central i , numa rotação completa, (m).

Se $\sum_s T_{isj} = T_{ij} < T_{i_{\min}}$, para algum ciclo j , não há como operar o sistema, para aplicar a lâmina Lb_{isj} em cada setor do pivô-central i , mantida a vazão Q_i .

Por outro lado, claramente deverá existir um tempo máximo a ser fixado para a rotação completa do pivô-central.

Portanto, detectada a necessidade de acionamento do sistema, este aplicará uma lâmina hídrica bruta Lb_{isj} , situada no intervalo,

$$\underline{Lb}_{isj} \leq Lb_{isj} \leq \overline{Lb}_{isj} \quad (3.93)$$

Os extremos deste intervalo serão definidos respectivamente pelos tempos de rotação mínimo e máximo, exigidos do equipamento, na hipótese de que o solo consiga reter completamente a lâmina hídrica líquida aplicada. Será adotado como $T_{i_{\min}}$ o tempo necessário para uma rotação completa do equipamento à 100% de sua capacidade, $T_{i_{\max}}$ como sendo 21 horas para ciclos de um dia e 42 horas para ciclos de dois dias, ou um limite menor, dependendo das características de absorção de água pelo solo, ou ainda outra restrição operacional que possa atuar.

3.8.2. O balanço hídrico para o pivô-central em cada ciclo

Para cada setor s , de cada pivô-central i , a aplicação da

lâmina Lb_{isj} em cada ciclo j , deverá estar associada com a umidade do solo necessária para a cultura, de acordo com o seu estágio de desenvolvimento. Para cada ciclo de operação j , a quantidade de água armazenada no solo, u_{isj} (mm) deverá estar limitada a valores mínimos e máximos de modo a não comprometer o desenvolvimento da cultura. O limite superior será definido como a quantidade de água armazenada no sistema radicular da cultura quando o solo atingir sua capacidade de campo, enquanto que o limite inferior estará associado à umidade crítica do solo. Quando o solo estiver na capacidade de campo, a lâmina hídrica líquida disponível (H) para a cultura (mm) será,

$$H = ((CC - UC)/10).Dg.r , \quad (3.94)$$

onde

CC: teor de água no solo suposto na capacidade de campo, em relação ao peso seco, (%),

UC: umidade crítica do solo, (%),

Dg: densidade global do solo, (g/cm^3),

r : profundidade do sistema radicular, (cm).

Portanto, deve-se ter $0 \leq u_{isj} \leq \bar{u}_{isj}$.

Numéricamente, $\bar{u}_{isj} = H$ para cada setor. A equação a ser adotada para estabelecer o balanço hídrico em cada setor s , do pivô-central i , no ciclo j , é,

$$u_{isj-1} + Pe_j + Ep_i.Lb_{isj} - ETR_{isj} - Pp_{isj} - Ru_{isj} = u_{isj} , \quad (3.95)$$

$i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad s = 1, 2, \dots, S,$

onde,

Pe_j : precipitação média provável para o dia j , (mm), (*)

ETR_{isj} : evapotranspiração média estimada para a cultura do pivô-central i , setor s , ciclo j , (mm), (**)

Pp_{isj} : perda por percolação no pivô-central i , setor s , ciclo j , (mm), (***)

Ru_{isj} : escoamento superficial no pivô-central i , setor s , ciclo j , (mm).

3.8.3. Formulação do problema de planejamento da irrigação para setores de pivôs-centrais

Definidos os setores de cada pivô-central, e as respectivas culturas, pode-se formular o problema,

(*) Precipitação média provável: É a precipitação mínima esperada com uma determinada probabilidade de ocorrência.

(**) Evapotranspiração: É o fenômeno segundo o qual a água de um solo sob vegetação é removida pela ação combinada da evaporação através da superfície do solo e da transpiração das plantas em desenvolvimento.

(***) Perda por percolação: Água que penetra abaixo da zona redicular das plantas.

$$\text{Min } \sum_i \sum_s \sum_j \text{Lb}_{isj} \quad (3.96)$$

s.a.

$$u_{isj-1} + \text{Pe}_j + \text{Ep}_i \cdot \text{Lb}_{isj} - \text{ETR}_{isj} - \text{Pp}_{isj} - \text{Ru}_{isj} = u_{isj} \quad (3.97)$$

$$T_{i_{\min}} \leq \sum_s \frac{10^{-6} \cdot \pi \cdot (\text{RT}_i + 27,97)^2 \cdot \theta_{is} \cdot \text{Lb}_{isj}}{1296 \cdot Q_i} \leq T_{i_{\max}} \quad (3.98)$$

$$\sum_i \sum_s \frac{10^{-4} \cdot \pi \cdot (\text{RT}_i + 27,97)^2 \cdot \theta_{is} \cdot \text{Lb}_{isj}}{36} \leq V_j \quad (3.99)$$

$$0 \leq u_{isj} \leq \bar{u}_{isj} \quad (3.100)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; \quad s = 1, 2, \dots, S; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad n = 1, 2, \dots, N$$

As restrições (3.97) e (3.100) estabelecem que as necessidades hídricas das culturas sempre estarão satisfeitas. O conjunto de restrições (3.98) controla o tempo de rotação de cada pivô-central em cada ciclo de operação. As restrições (3.99) limitam o volume utilizado em cada ciclo, ao valor máximo V_j disponível. Observe que a função objetivo adotada é completamente equivalente à minimização do volume total empregado, ou à maximização da eficiência dos pivôs-centrais ou ainda do máximo lucro em unidades monetárias por unidade de volume de água empregada.

São apresentadas a seguir as soluções de (3.96) a (3.100) para diversos casos estudados.

Caso 1

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 9$

Número de torres: $n_1 = n_2 = n_3 = 10$

Raio da última torre (m): $RT_1 = RT_2 = RT_3 = 329,55$

Área irrigada (ha): $A_1 = A_2 = A_3 = 40,156$

Tamanho dos setores θ_{is} (graus):

	1	2	3	4
1	90	90	90	90
2	90	90	90	90
3	90	90	90	90
4	90	90	90	90
5	90	90	90	90
6	90	90	90	90
7	90	90	90	90
8	90	90	90	90
9	90	90	90	90

Precipitação esperada Pe_j (mm):

$$Pe_1 = Pe_2 = Pe_3 = Pe_4 = Pe_5 = 0$$

Evapotranspiração ETR_{isj} (mm):

	1	2	3	4	5
1,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
2,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
3,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
3,2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
3,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
3,4	5,7	6,0	5,8	6,0	6,5
4,1	6,8	4,8	7,8	5,8	5,4
4,2	5,4	7,4	6,5	5,5	6,1
4,3	5,6	6,5	5,8	7,3	6,9
4,4	6,2	6,9	6,5	4,9	6,4
5,1	5,9	6,5	5,4	5,4	6,2
5,2	4,9	5,9	6,7	5,9	5,0
5,3	6,5	7,2	8,2	5,8	6,9
5,4	7,2	5,1	5,9	6,2	6,9

6,1	6,8	5,9	7,8	8,7	6,4
6,2	6,4	4,8	6,4	5,8	6,2
6,3	5,8	6,1	6,5	6,3	7,1
6,4	5,0	4,5	6,0	6,4	5,4
7,1	6,8	5,2	6,9	5,0	6,7
7,2	6,4	6,1	6,0	6,2	6,9
7,3	7,1	6,7	6,9	6,4	5,8
7,4	5,5	6,0	8,3	5,8	4,9
8,1	6,4	6,2	5,5	6,0	5,9
8,2	5,8	5,9	6,0	6,0	4,9
8,3	6,4	5,8	6,5	7,4	6,8
8,4	5,6	6,5	5,6	5,5	6,0
9,1	6,5	6,0	6,6	5,9	6,0
9,2	5,8	6,0	6,2	5,9	5,8
9,3	4,9	5,5	6,0	6,5	6,0
9,4	6,4	6,6	6,7	5,9	6,0

Quantidade de água do solo no início do período (mm): 24,0

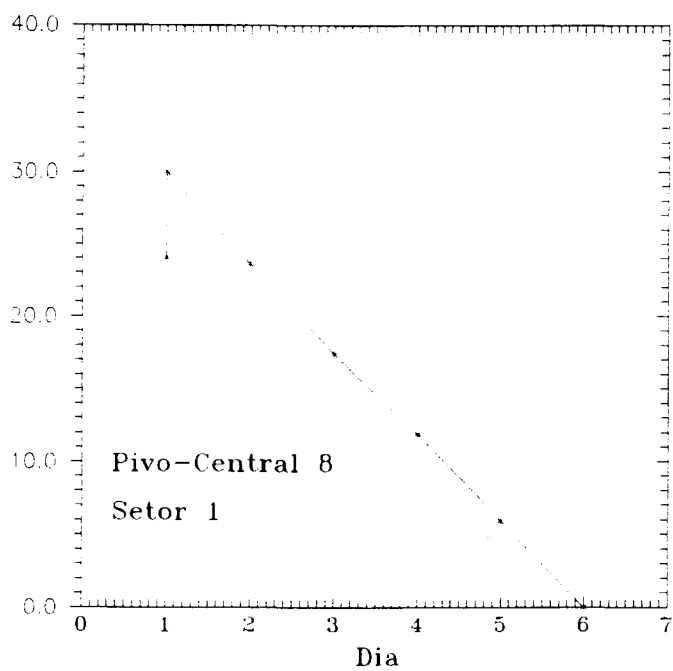
Lâmina bruta aplicada à 100% de velocidade (mm): 12

Lâminas hídricas brutas selecionadas Lb_{isj} (mm)

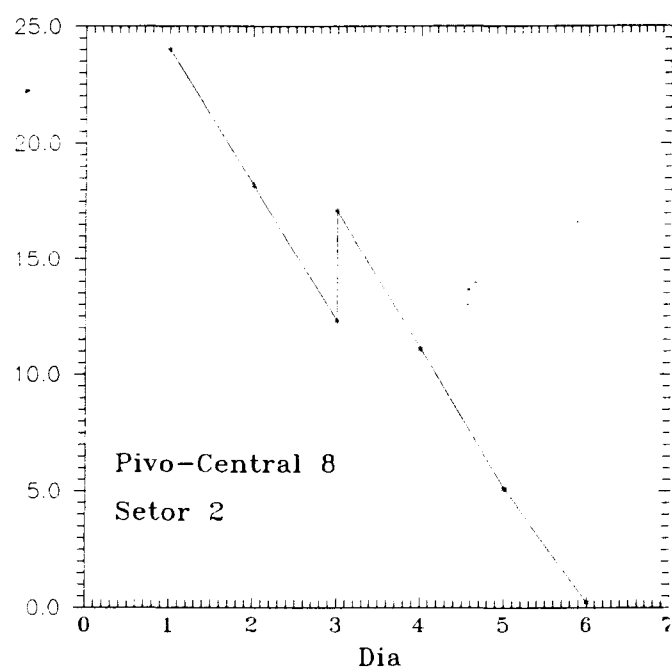
	1	2	3	4	5
1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,000
2,2	6,000	0,0	0,0	0,0	0,0
2,3	0,0	0,0	6,000	0,0	7,500
2,4	0,0	0,0	10,625	0,0	0,0
3,1	0,0	7,750	6,000	0,0	0,0
3,2	0,0	7,500	0,0	0,0	9,375
3,3	6,000	6,000	0,0	8,000	0,0
3,4	0,0	0,0	7,500	0,0	0,0
4,1	8,250	0,0	0,0	0,0	0,0
4,2	6,000	0,0	0,0	6,000	0,0
4,3	6,000	6,000	0,0	0,0	0,0
4,4	0,0	0,0	6,000	0,0	6,000
5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,750
5,2	0,0	6,000	0,0	0,0	0,0
5,3	7,250	6,000	0,0	0,0	0,0
5,4	0,0	0,0	9,125	0,0	0,0
6,1	0,0	0,0	0,0	6,500	8,000
6,2	7,000	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	6,000	6,000
6,4	0,0	6,000	0,0	0,0	0,0
7,1	0,0	0,0	8,250	0,0	0,0
7,2	6,000	0,0	0,0	0,0	6,000

7,3	6,000	0,0	0,0	6,000	0,0
7,4	0,0	0,0	8,125	0,0	0,0
8,1	7,500	0,0	0,0	0,0	0,0
8,2	0,0	0,0	6,000	0,0	0,0
8,3	0,0	0,0	0,0	6,000	6,000
8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,500
9,1	0,0	0,0	8,750	0,0	0,0
9,2	7,125	0,0	0,0	0,0	0,0
9,3	0,0	0,0	6,125	0,0	0,0
9,4	0,0	6,000	0,0	0,0	6,000

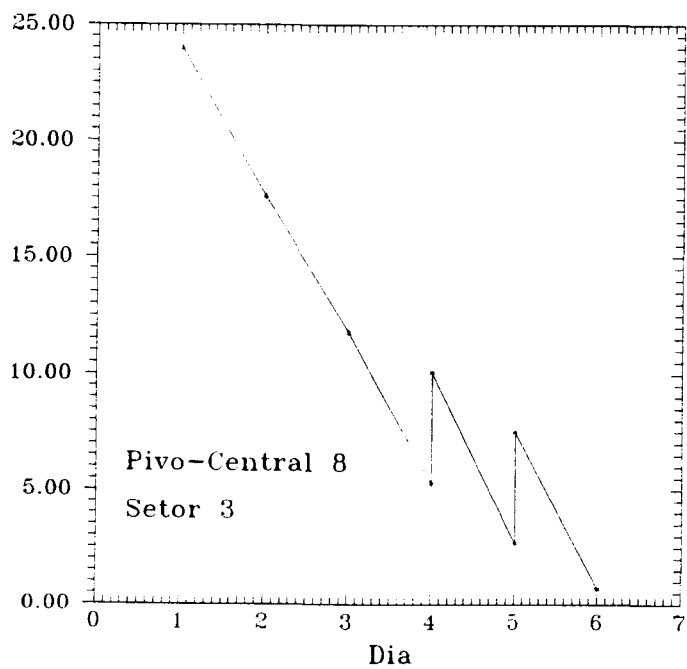
Umidade (mm)



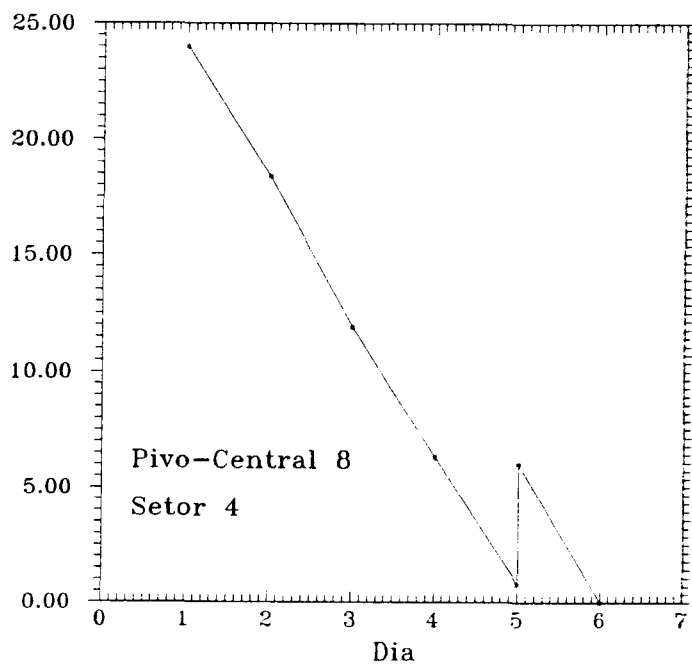
Umidade (mm)

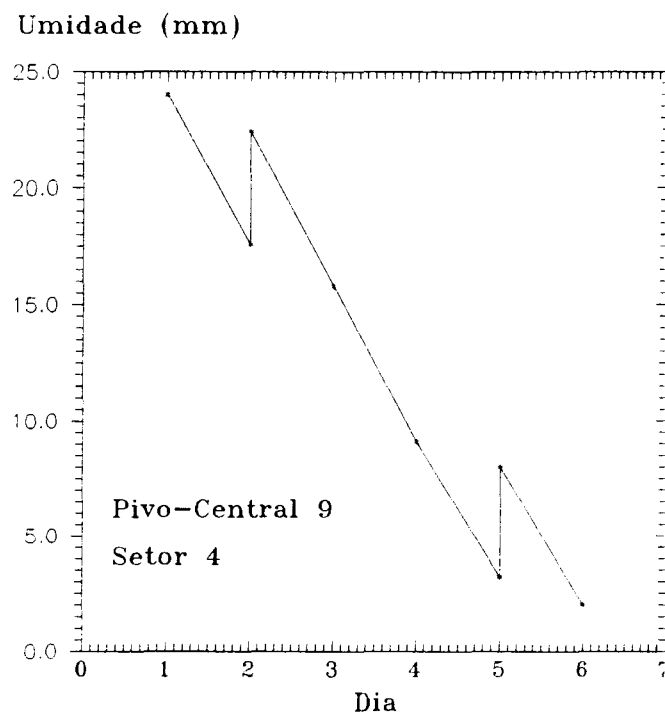
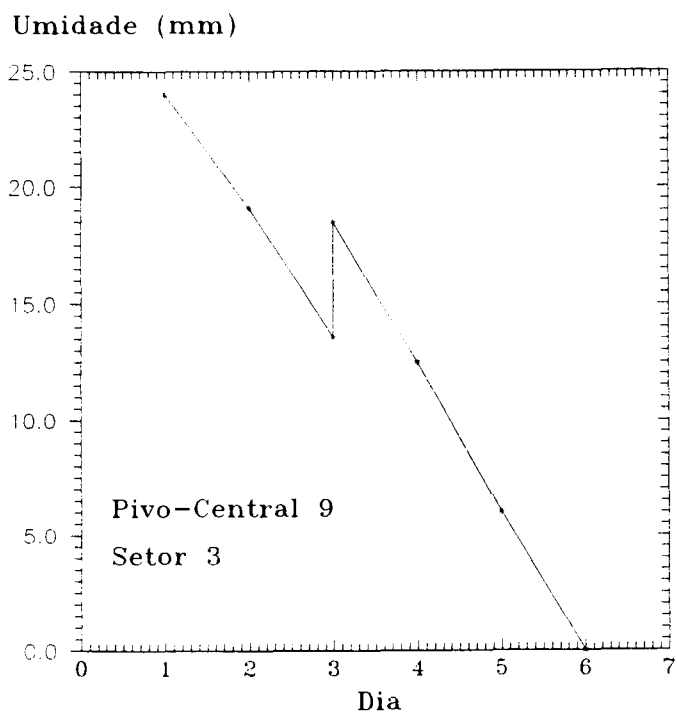
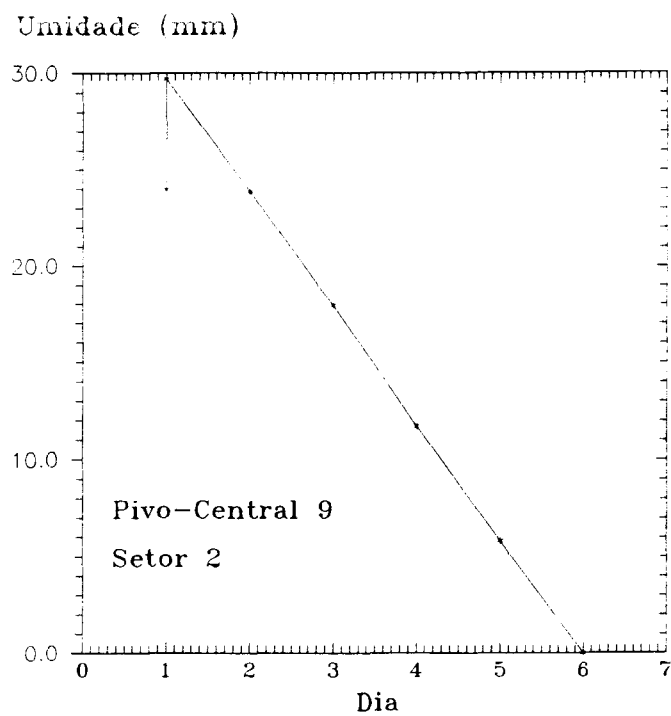
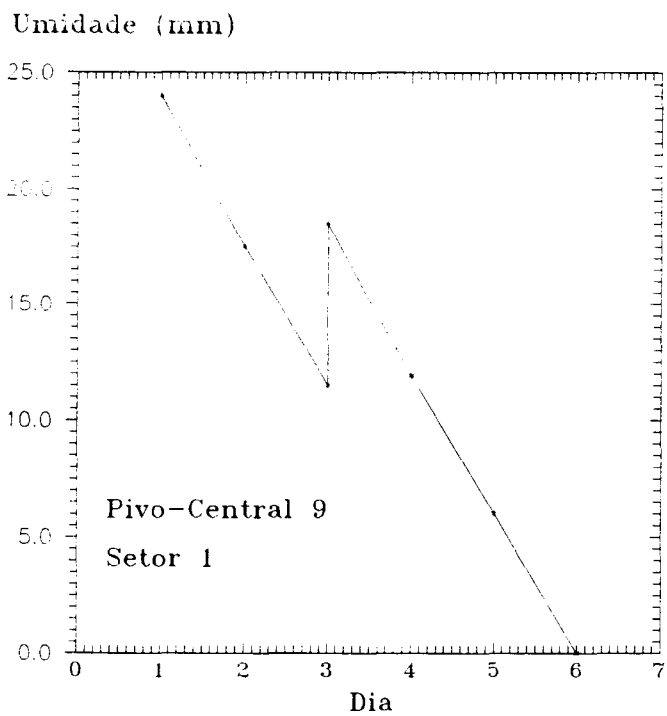


Umidade (mm)



Umidade (mm)





Caso 2

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 9$

Número de torres: $n_1 = n_2 = n_3 = 10$

Raio da última torre (m): $RT_1 = RT_2 = RT_3 = 329,55$

Área irrigada (ha): $A_1 = A_2 = A_3 = 40,156$

Tamanho dos setores θ_{is} (graus):

	1	2	3	4
1	90	90	90	90
2	180	180	00	00
3	120	120	120	00
4	45	135	180	90
5	90	90	180	00
6	60	60	90	150
7	360	00	00	00
8	90	90	90	90
9	90	90	180	00

Precipitação esperada Pe_j (mm):

$$Pe_1 = Pe_2 = Pe_3 = Pe_4 = Pe_5 = 0$$

Evapotranspiração ETR_{isj} (mm):

	1	2	3	4	5
1,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
3,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
3,2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
3,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
4,1	6,8	4,8	7,8	5,8	5,4
4,2	5,4	7,4	6,5	5,5	6,1
4,3	5,6	6,5	5,8	7,3	6,9
5,1	5,9	6,5	5,4	5,4	6,2
5,2	4,9	5,9	6,7	5,9	5,0
5,3	6,5	7,2	8,2	5,8	6,9
6,1	6,8	5,9	7,8	8,7	6,4
6,2	6,4	4,8	6,4	5,8	6,2
6,3	5,8	6,1	6,5	6,3	7,1
6,4	5,0	4,5	6,0	6,4	5,4
7,1	6,8	5,2	6,9	5,0	6,7

8,1	6,4	6,2	5,5	6,0	5,9
8,2	5,8	5,9	6,0	6,0	4,9
8,3	6,4	5,8	6,5	7,4	6,8
8,4	5,6	6,5	5,6	5,5	6,0
9,1	6,5	6,0	6,6	5,9	6,0
9,2	5,8	6,0	6,2	5,9	5,8
9,3	4,9	5,5	6,0	6,5	6,0

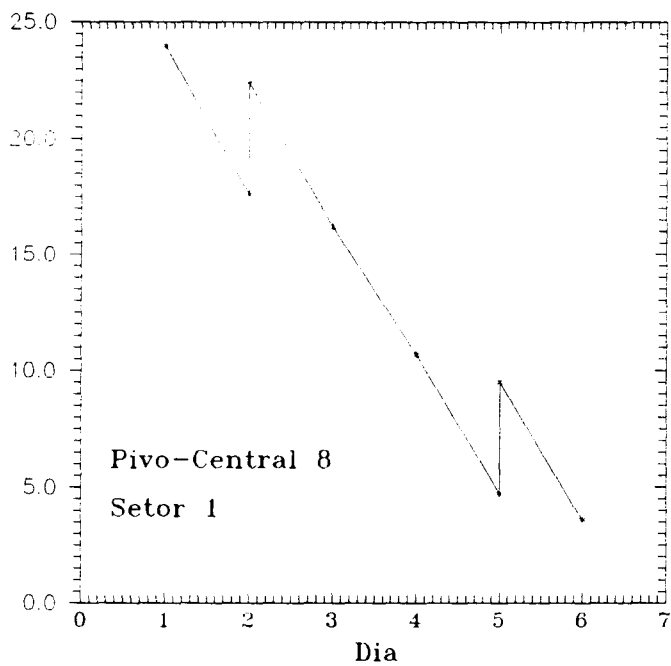
Quantidade de água do solo no início do período (mm): 24,0

Lâmina bruta aplicada à 100% de velocidade (mm): 12

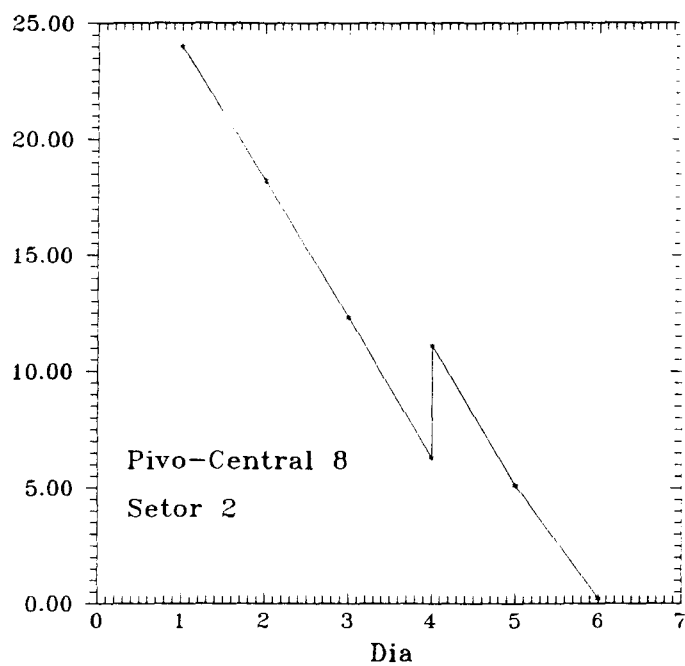
Lâminas hídras brutas selecionadas Lb_{isj} (mm)

	1	2	3	4	5
1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,000
2,2	6,000	0,0	0,0	0,0	0,0
3,1	7,750	0,0	6,000	0,0	0,0
3,2	6,000	0,0	0,0	10,875	0,0
3,3	0,0	6,000	0,0	6,000	6,000
4,1	8,250	0,0	0,0	0,0	0,0
4,2	0,0	0,0	8,625	0,0	0,0
4,3	0,0	10,125	0,0	0,0	0,0
5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,750
5,2	0,0	6,000	0,0	0,0	0,0
5,3	0,0	0,0	7,250	0,0	6,000
6,1	0,0	0,0	0,0	6,500	8,000
6,2	7,000	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	6,000	6,000
6,4	0,0	6,000	0,0	0,0	0,0
7,1	0,0	0,0	8,250	0,0	0,0
8,1	0,0	6,000	0,0	0,0	6,000
8,2	0,0	0,0	0,0	6,000	0,0
8,3	6,000	6,000	0,0	0,0	0,0
8,4	6,500	0,0	0,0	0,0	0,0
9,1	0,0	8,750	0,0	0,0	0,0
9,2	7,125	0,0	0,0	0,0	0,0
9,3	0,0	0,0	0,0	6,125	0,0

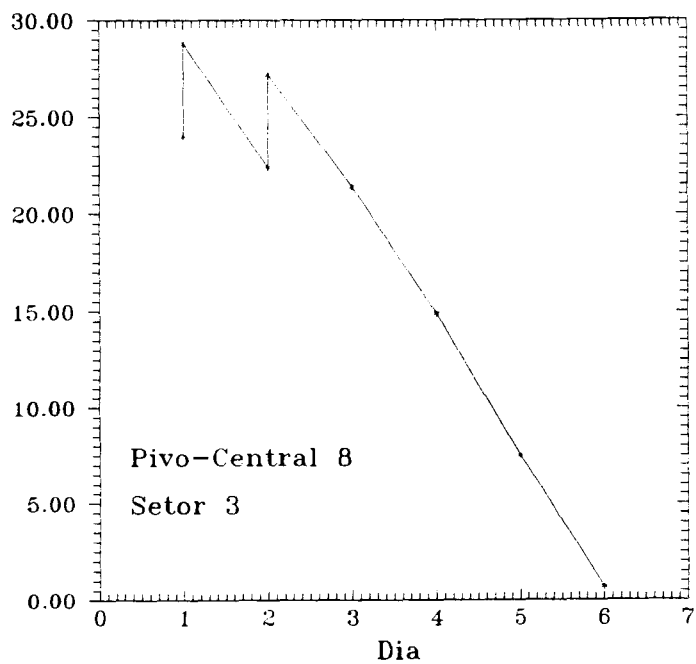
Umidade (mm)



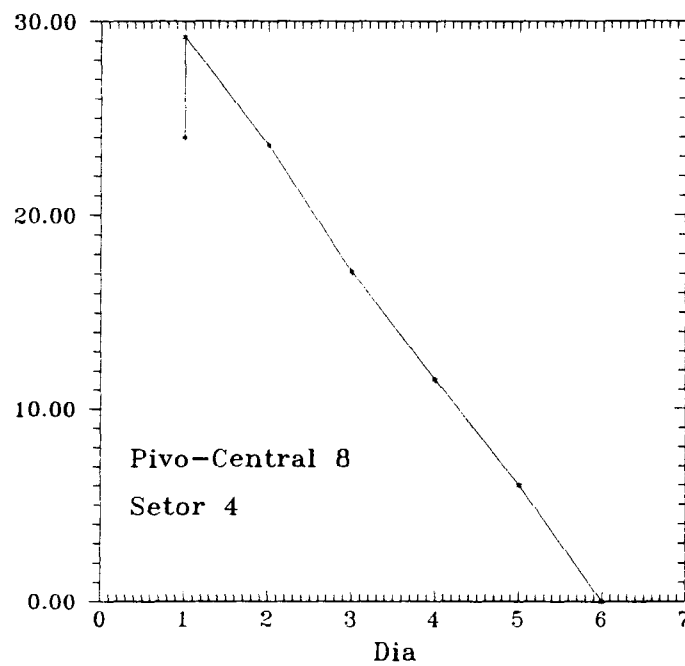
Umidade (mm)

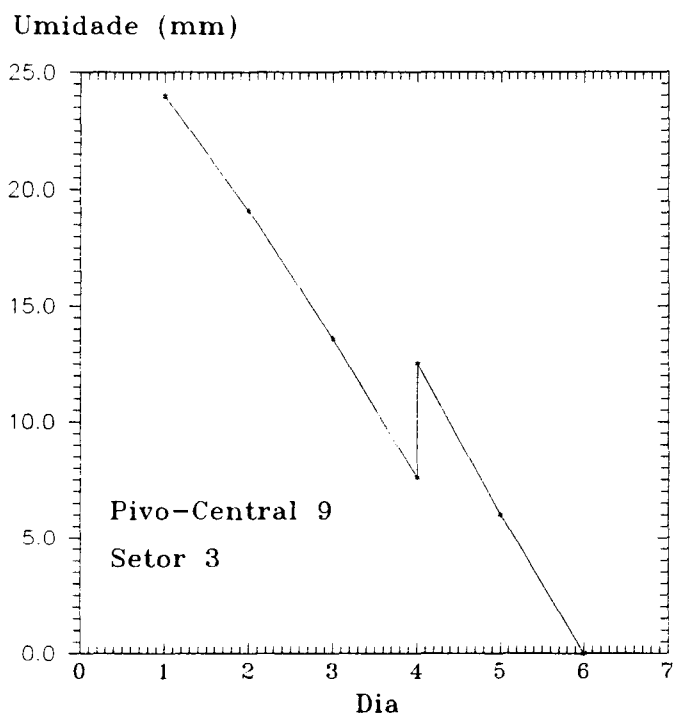
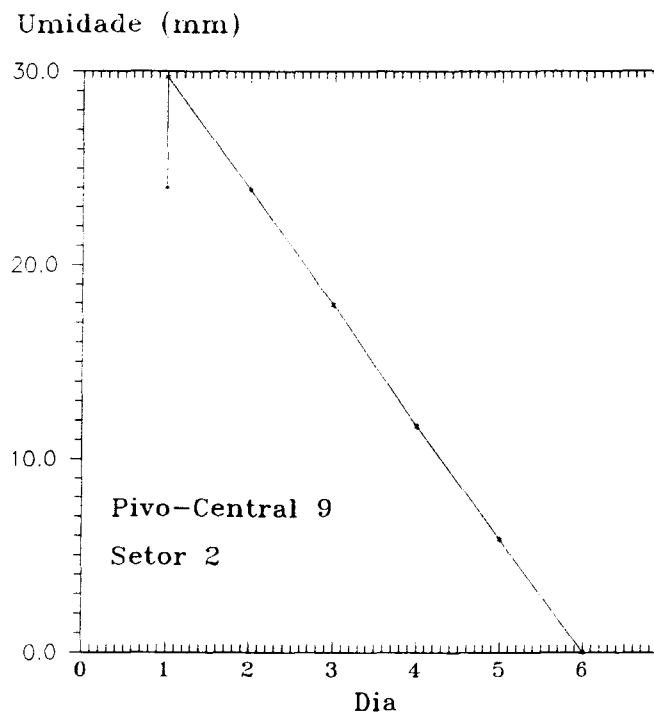
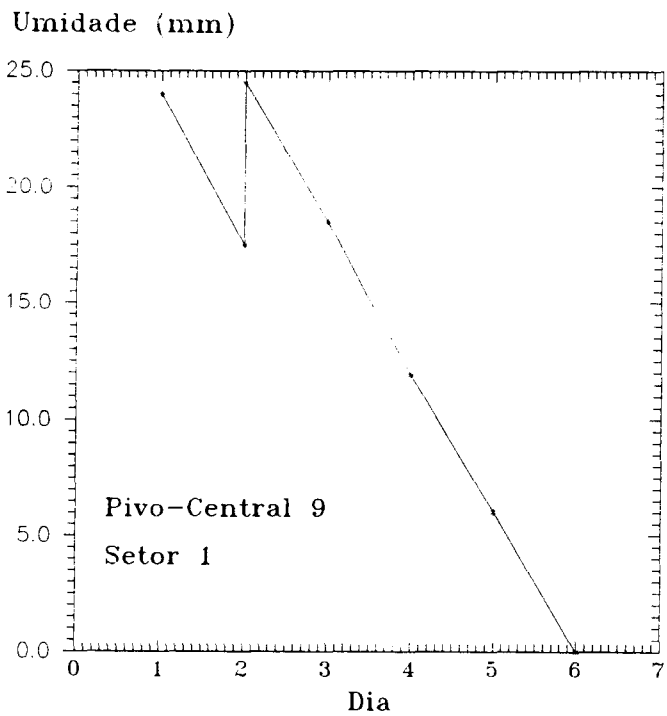


Umidade (mm)



Umidade (mm)





Caso 3

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 9$

Número de torres: $n_1 = n_2 = n_3 = 10$

Raio da última torre (m): $RT_1 = RT_2 = RT_3 = 329,55$

Área irrigada (ha): $A_1 = A_2 = A_3 = 40,156$

Tamanho dos setores θ_{is} (graus):

	1	2	3	4
1	90	90	90	90
2	90	90	90	90
3	90	90	90	90
4	90	90	90	90
5	90	90	90	90
6	90	90	90	90
7	90	90	90	90
8	90	90	90	90
9	90	90	90	90

Precipitação esperada Pe_j (mm):

$$Pe_1 = Pe_2 = Pe_3 = Pe_4 = Pe_5 = 0$$

Evapotranspiração ETR_{isj} (mm):

	1	2	3	4	5
1,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
2,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
3,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
3,2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
3,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
3,4	5,7	6,0	5,8	6,0	6,5
4,1	6,8	4,8	7,8	5,8	5,4
4,2	5,4	7,4	6,5	5,5	6,1
4,3	5,6	6,5	5,8	7,3	6,9
4,4	6,2	6,9	6,5	4,9	6,4
5,1	5,9	6,5	5,4	5,4	6,2
5,2	4,9	5,9	6,7	5,9	5,0
5,3	6,5	7,2	8,2	5,8	6,9
5,4	7,2	5,1	5,9	6,2	6,9

6,1	6,8	5,9	7,8	8,7	6,4
6,2	6,4	4,8	6,4	5,8	6,2
6,3	5,8	6,1	6,5	6,3	7,1
6,4	5,0	4,5	6,0	6,4	5,4
7,1	6,8	5,2	6,9	5,0	6,7
7,2	6,4	6,1	6,0	6,2	6,9
7,3	7,1	6,7	6,9	6,4	5,8
7,4	5,5	6,0	8,3	5,8	4,9
8,1	6,4	6,2	5,5	6,0	5,9
8,2	5,8	5,9	6,0	6,0	4,9
8,3	6,4	5,8	6,5	7,4	6,8
8,4	5,6	6,5	5,6	5,5	6,0
9,1	6,5	6,0	6,6	5,9	6,0
9,2	5,8	6,0	6,2	5,9	5,8
9,3	4,9	5,5	6,0	6,5	6,0
9,4	6,4	6,6	6,7	5,9	6,0

Quantidade de água do solo no início do período (mm): 12,0

Lâmina bruta aplicada à 100% de velocidade (mm): 12

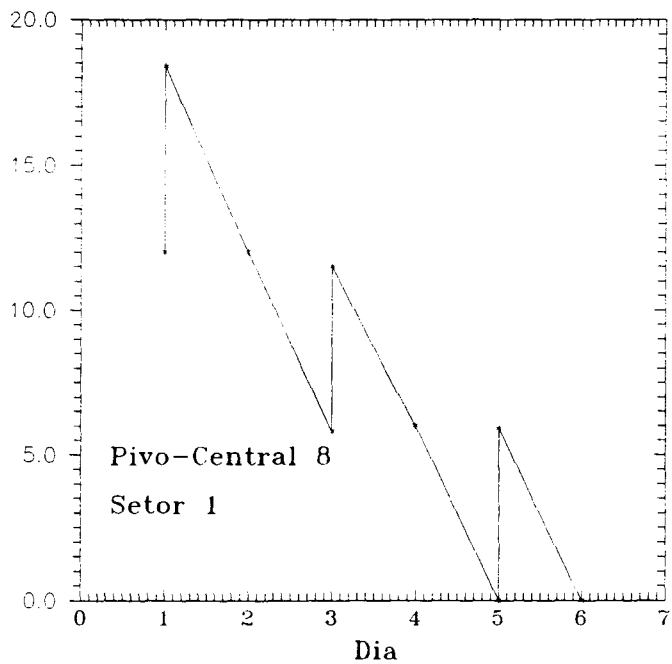
Lâminas hídricas brutas selecionadas Lb_{isj} (mm)

	1	2	3	4	5
1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,000
1,2	0,0	6,875	0,0	0,0	0,0
1,3	0,0	0,0	6,000	0,0	6,000
1,4	0,0	7,125	0,0	6,000	0,0
2,1	6,000	0,0	6,000	0,0	6,000
2,2	6,875	6,020	0,0	0,0	6,480
2,3	0,0	9,000	0,0	6,000	7,500
2,4	8,125	0,0	9,375	0,0	8,125
3,1	8,000	6,000	0,0	6,000	8,750
3,2	0,0	12,000	12,000	7,875	0,0
3,3	10,000	10,000	9,000	6,000	0,0
3,4	7,125	0,0	0,0	7,250	8,125
4,1	0,0	10,500	0,0	6,000	6,750
4,2	6,000	6,000	0,0	6,000	6,000
4,3	6,000	6,000	6,000	0,0	7,125
4,4	7,750	8,625	7,250	0,0	0,0
5,1	0,0	6,000	6,000	0,0	7,750
5,2	0,0	0,0	8,250	6,000	6,250
5,3	8,125	8,125	6,000	6,000	0,0
5,4	9,000	0,0	0,0	6,500	6,625
6,1	0,0	12,000	6,000	11,500	0,0
6,2	0,0	0,0	12,000	10,000	0,0
6,3	0,0	9,875	0,0	6,000	8,875
6,4	6,250	0,0	6,875	6,000	0,0
7,1	0,0	0,0	8,875	6,000	8,375
7,2	6,500	0,0	6,000	6,000	6,000

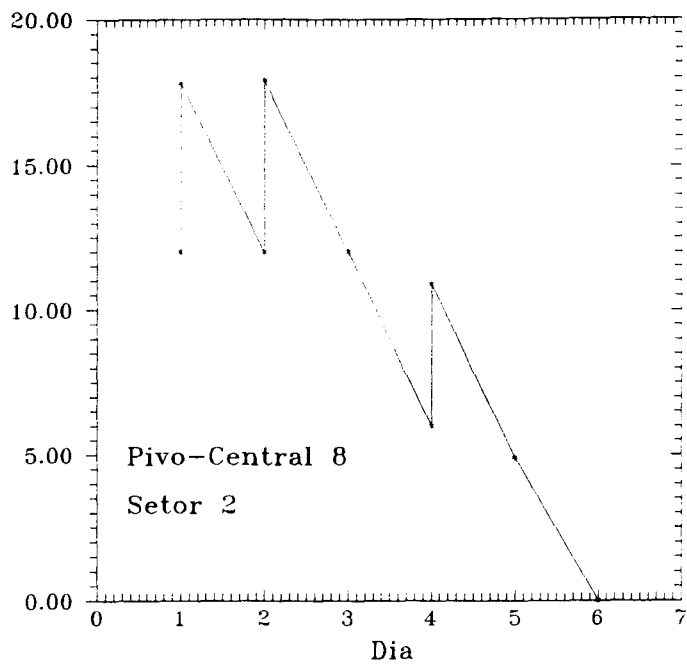
7,3	8,125	6,000	6,000	6,000	0,0
7,4	0,0	0,0	10,047	6,953	6,125
8,1	8,000	0,0	7,125	0,0	7,375
8,2	7,250	7,375	0,0	6,125	0,0
8,3	0,0	6,000	6,000	6,000	8,125
8,4	0,0	8,000	6,000	0,0	7,500
9,1	0,0	6,000	6,000	6,000	6,000
9,2	0,0	0,0	10,125	12,000	0,0
9,3	6,125	6,875	0,0	8,125	0,0
9,4	0,0	11,000	0,0	6,000	7,500

Como se pode verificar dos resultados apresentados nos casos 1 e 2, o modelo (3.96) a (3.100) escolhe lâminas por exemplo com valor 6,125 mm. Isto corresponde a uma velocidade de rotação de 51,04% para o pivô-central. Embora estas lâminas sejam as mais econômicas e poderão ter sido escolhidas em função de uma restrição de volume de água disponível para o ciclo j, pode-se aproximar estes resultados para valores de lâminas ou velocidades previamente fixadas. Para contemplar esta situação, será desenvolvido um modelo discreto em função destas velocidades.

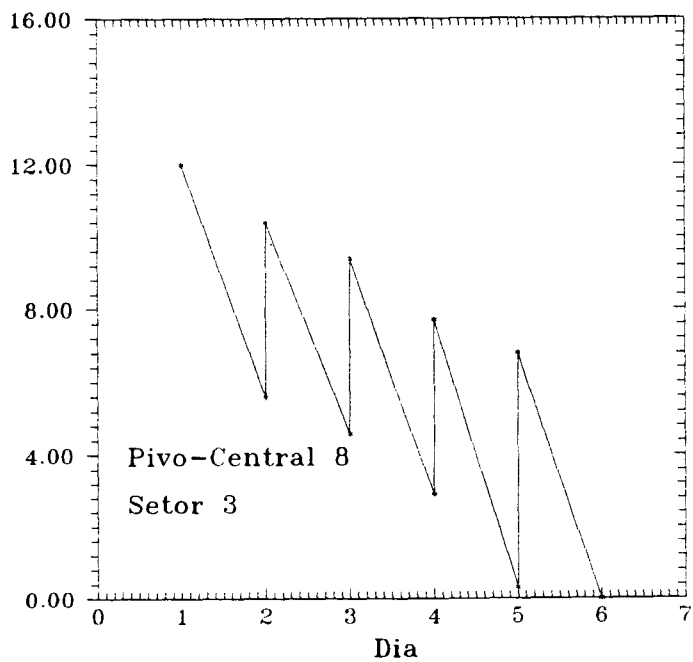
Umidade (mm)



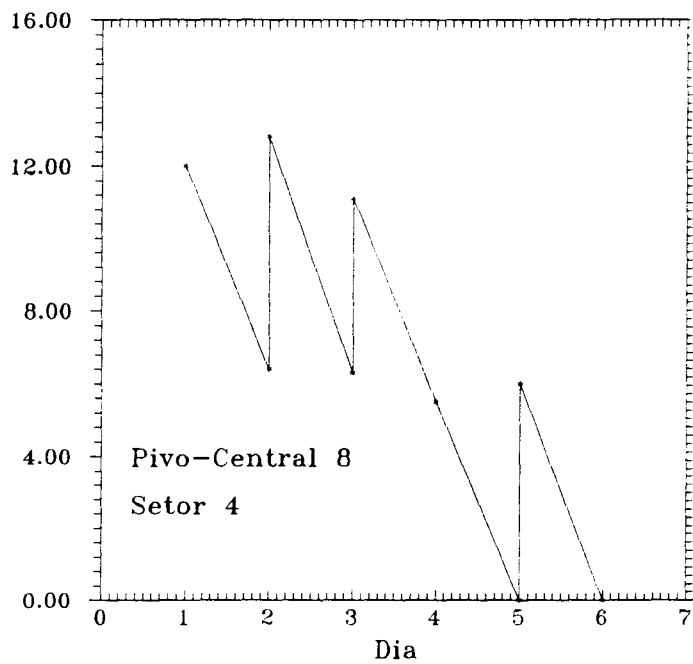
Umidade (mm)



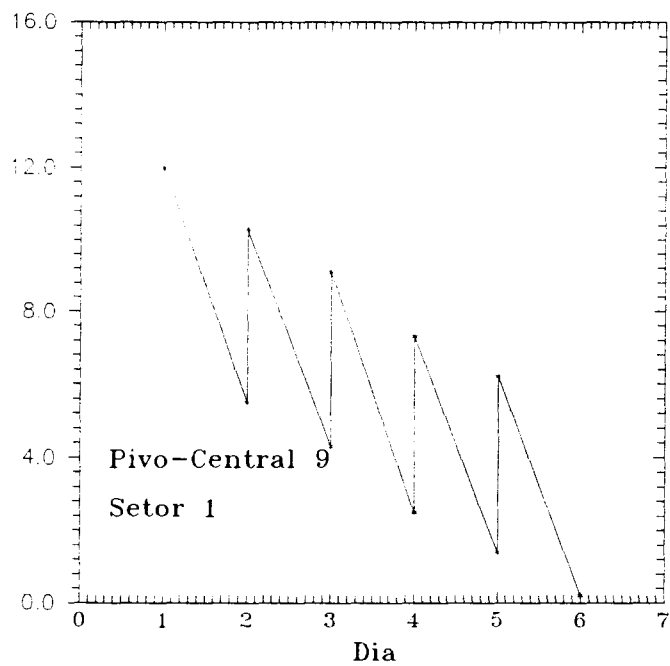
Umidade (mm)



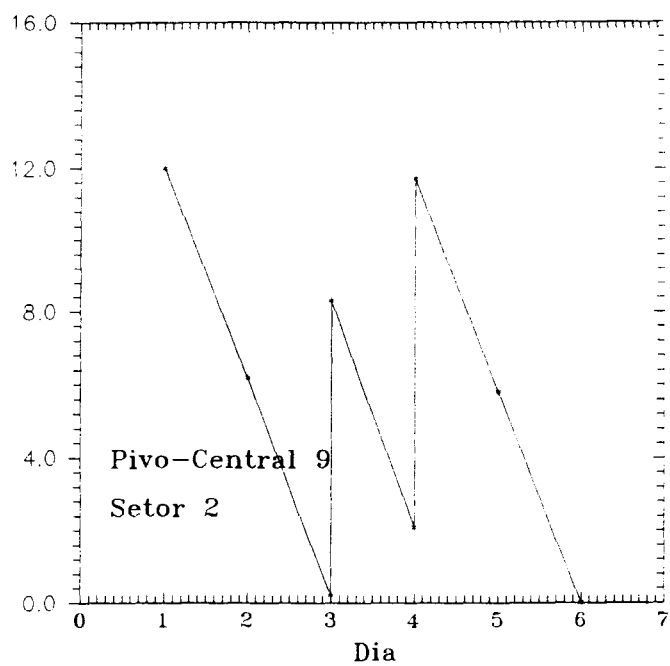
Umidade (mm)



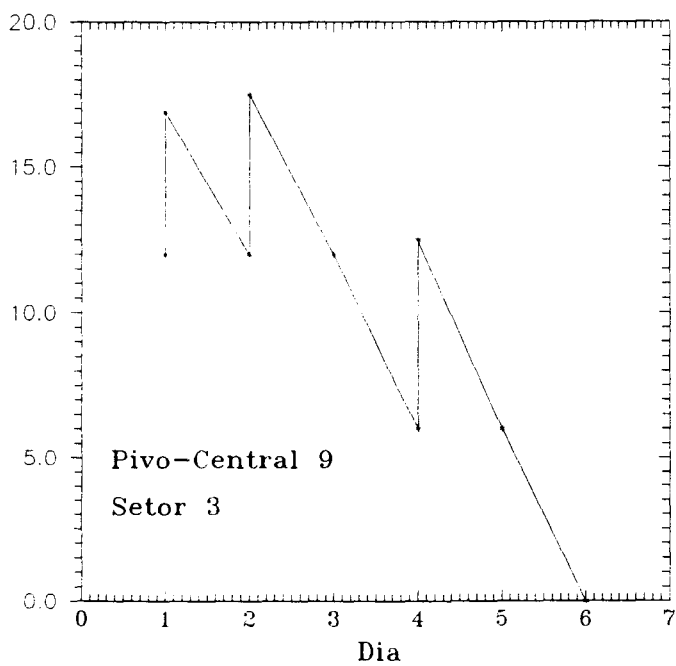
Umidade (mm)



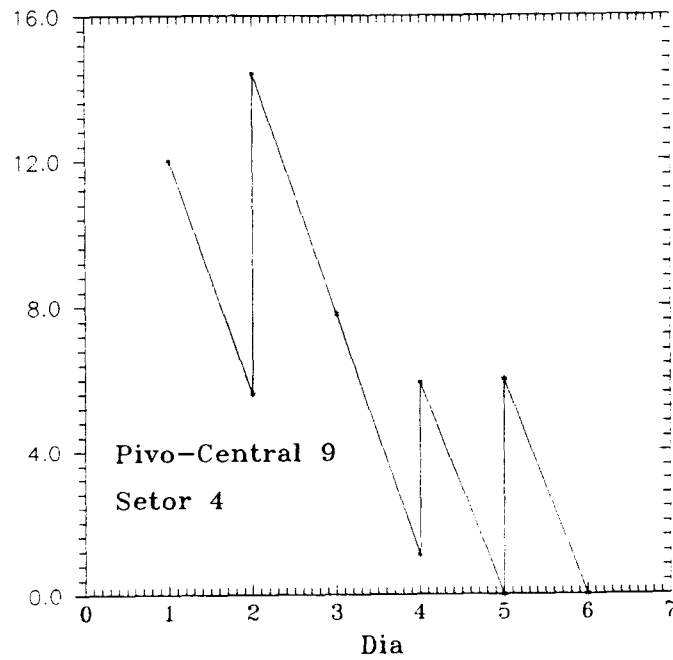
Umidade (mm)



Umidade (mm)



Umidade (mm)



3.8.4. Um modelo discreto para a programação da irrigação de setores de pivôs-centrais

$$\text{Min } \sum_i \sum_s \sum_j \text{Lb}_{ijs} \quad (3.101)$$

s.a.

$$u_{ijs-1} + \text{Pe}_j + \text{Ep}_i \cdot \text{Lb}_{ijs} - \text{ETR}_{ijs} - \text{Pp}_{ijs} - \text{Ru}_{ijs} = u_{ijs} \quad (3.102)$$

$$T_{i \min} \leq \sum_s \frac{10^{-6} \cdot \pi \cdot (\text{RT}_i + 27,97)^2 \cdot \theta_{is} \cdot \text{Lb}_{ijs}}{1296 \cdot Q_i} \leq T_{i \max} \quad (3.103)$$

$$\sum_i \sum_s \frac{10^{-4} \cdot \pi \cdot (\text{RT}_i + 27,97)^2 \cdot \theta_{is} \cdot \text{Lb}_{ijs}}{36} \leq v_j \quad (3.104)$$

$$\text{Lb}_{ijs} = \sum_n \text{L}_{ni} \cdot \alpha_{ijs}^n \quad (3.105)$$

$$\sum_n \alpha_{ijs}^n = 1 \quad (3.106)$$

$$\alpha_{ijs}^n = 0/1 \quad (3.107)$$

$$0 \leq u_{ijs} \leq \bar{u}_{ijs} \quad (3.108)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; \quad s = 1, 2, \dots, S; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad n = 1, 2, \dots, N$$

As restrições (3.105), (3.106) e (3.107) impõem ao modelo a escolha de um único valor $\text{Lb}_{ijs} = \text{L}_n$ fixado a priori. Os casos 4 e 5 são exemplos que contemplam esta situação.

Caso 4

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 9$

Número de torres: $n_1 = n_2 = n_3 = 10$

Raio da última torre (m): $\text{RT}_1 = \text{RT}_2 = \text{RT}_3 = 329,55$

Área irrigada (ha): $A_1 = A_2 = A_3 = 40,156$

Tamanho dos setores θ_{i_s} (graus):

	1	2	3	4
1	90	90	90	90
2	90	90	90	90
3	90	90	90	90
4	90	90	90	90
5	90	90	90	90
6	90	90	90	90
7	90	90	90	90
8	90	90	90	90
9	90	90	90	90

Precipitação esperada Pe_j (mm):

$$Pe_1 = Pe_2 = Pe_3 = Pe_4 = Pe_5 = 0$$

Evapotranspiração $ETR_{i_s j}$ (mm):

	1	2	3	4	5
1,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
2,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
3,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
3,2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
3,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
3,4	5,7	6,0	5,8	6,0	6,5
4,1	6,8	4,8	7,8	5,8	5,4
4,2	5,4	7,4	6,5	5,5	6,1
4,3	5,6	6,5	5,8	7,3	6,9
4,4	6,2	6,9	6,5	4,9	6,4
5,1	5,9	6,5	5,4	5,4	6,2
5,2	4,9	5,9	6,7	5,9	5,0
5,3	6,5	7,2	8,2	5,8	6,9
5,4	7,2	5,1	5,9	6,2	6,9
6,1	6,8	5,9	7,8	8,7	6,4
6,2	6,4	4,8	6,4	5,8	6,2
6,3	5,8	6,1	6,5	6,3	7,1
6,4	5,0	4,5	6,0	6,4	5,4
7,1	6,8	5,2	6,9	5,0	6,7
7,2	6,4	6,1	6,0	6,2	6,9
7,3	7,1	6,7	6,9	6,4	5,8
7,4	5,5	6,0	8,3	5,8	4,9

8,1	6,4	6,2	5,5	6,0	5,9
8,2	5,8	5,9	6,0	6,0	4,9
8,3	6,4	5,8	6,5	7,4	6,8
8,4	5,6	6,5	5,6	5,5	6,0
9,1	6,5	6,0	6,6	5,9	6,0
9,2	5,8	6,0	6,2	5,9	5,8
9,3	4,9	5,5	6,0	6,5	6,0
9,4	6,4	6,6	6,7	5,9	6,0

Quantidade de água do solo no início do período (mm): 24,0

Lâmina bruta aplicada à 100% de velocidade (mm): 12

Lâminas hídricas brutas possíveis L_n (mm):

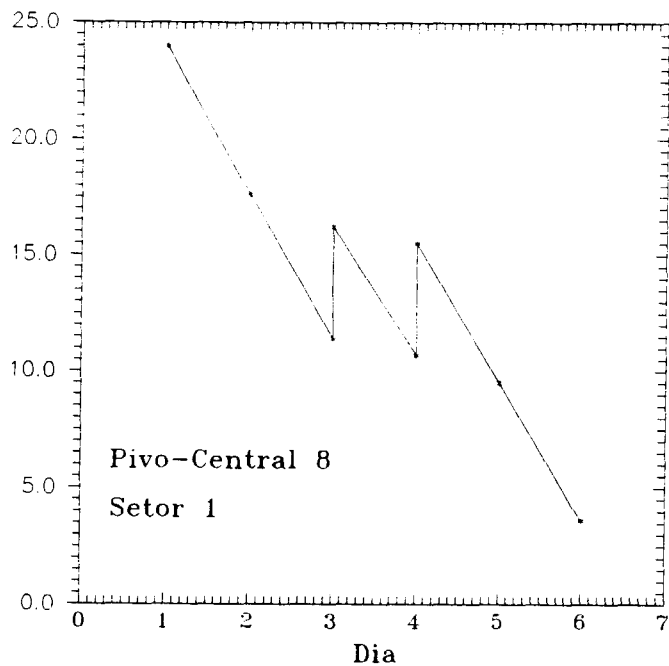
$L_1 = 6,000$ $L_2 = 8,000$ $L_3 = 10,000$ $L_4 = 12,000$

Lâminas hídricas brutas selecionadas $L_{b_{isj}}$ (mm)

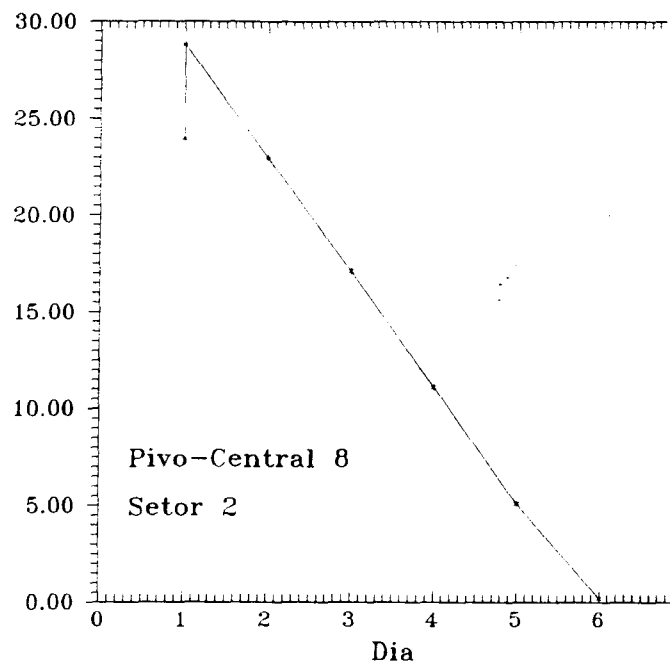
	1	2	3	4	5
1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,1	0,0	0,0	6,000	0,0	0,0
2,2	0,0	6,000	0,0	0,0	0,0
2,3	0,0	6,000	0,0	6,000	0,0
2,4	6,000	0,0	0,0	0,0	6,000
3,1	0,0	0,0	6,000	6,000	6,000
3,2	0,0	6,000	6,000	0,0	6,000
3,3	6,000	10,000	0,0	0,0	6,000
3,4	6,000	0,0	6,000	0,0	0,0
4,1	0,0	0,0	0,0	6,000	6,000
4,2	6,000	6,000	0,0	0,0	0,0
4,3	0,0	10,000	0,0	6,000	0,0
4,4	0,0	0,0	6,000	0,0	6,000
5,1	6,000	0,0	6,000	0,0	6,750
5,2	6,000	0,0	0,0	0,0	0,0
5,3	6,000	0,0	0,0	0,0	8,000
5,4	6,000	0,0	0,0	0,0	6,000
6,1	0,0	12,000	6,000	0,0	0,0
6,2	0,0	6,000	0,0	6,000	0,0
6,3	6,000	0,0	6,000	0,0	0,0
6,4	6,000	0,0	0,0	0,0	0,0
7,1	0,0	6,000	0,0	0,0	6,000
7,2	0,0	0,0	0,0	6,000	6,000
7,3	6,000	10,000	0,0	0,0	0,0
7,4	6,000	0,0	0,0	0,0	6,000
8,1	0,0	0,0	6,000	6,000	0,0
8,2	6,000	0,0	0,0	0,0	0,0

8,3	0,0	10,000	0,0	6,000	0,0
8,4	6,000	0,0	6,000	0,0	0,0
9,1	6,000	8,000	0,0	0,0	0,0
9,2	0,0	0,0	6,000	0,0	6,000
9,3	6,000	0,0	0,0	6,000	0,0
9,4	8,000	6,000	0,0	0,0	0,0

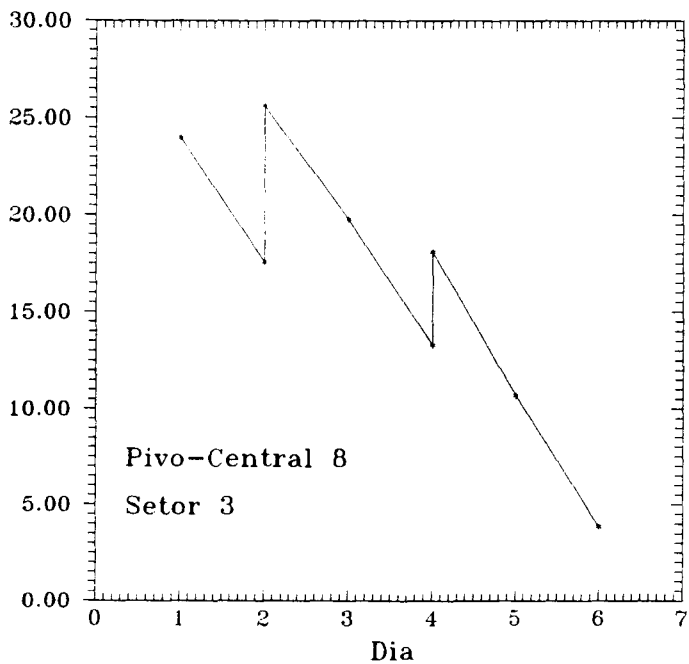
Umidade (mm)



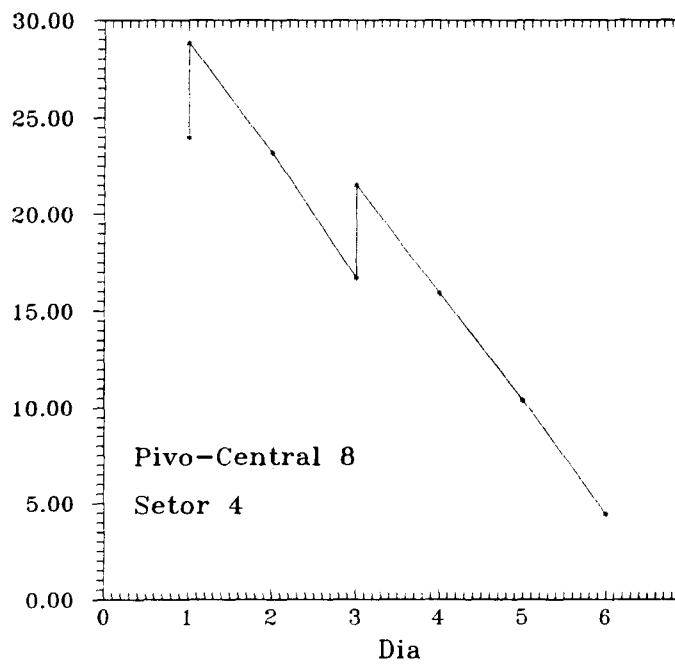
Umidade (mm)

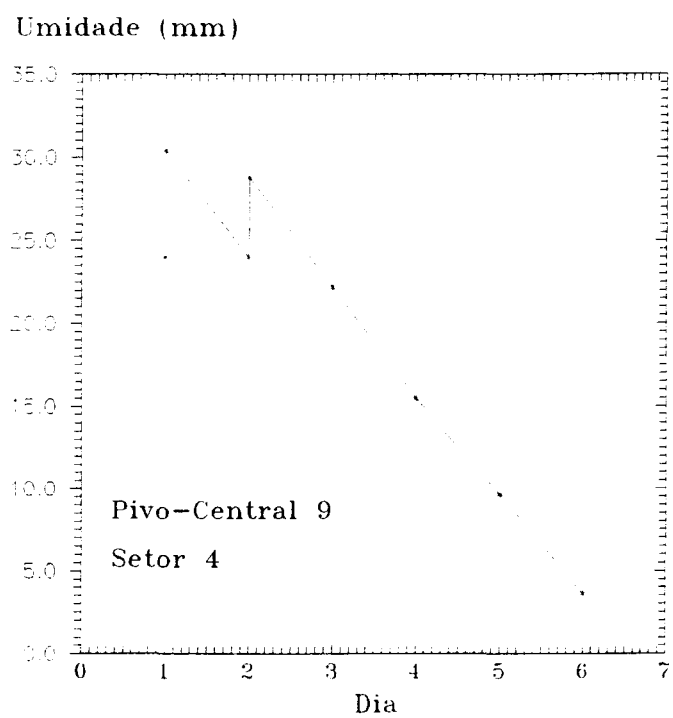
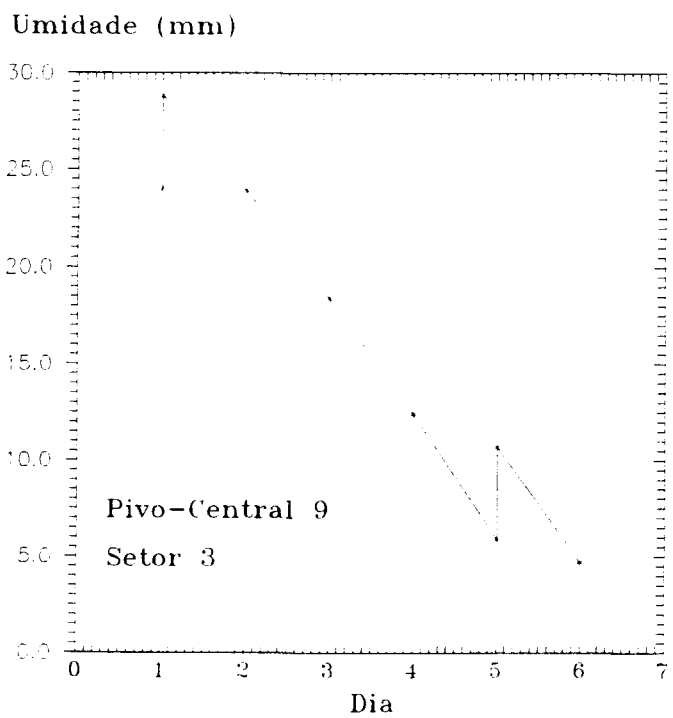
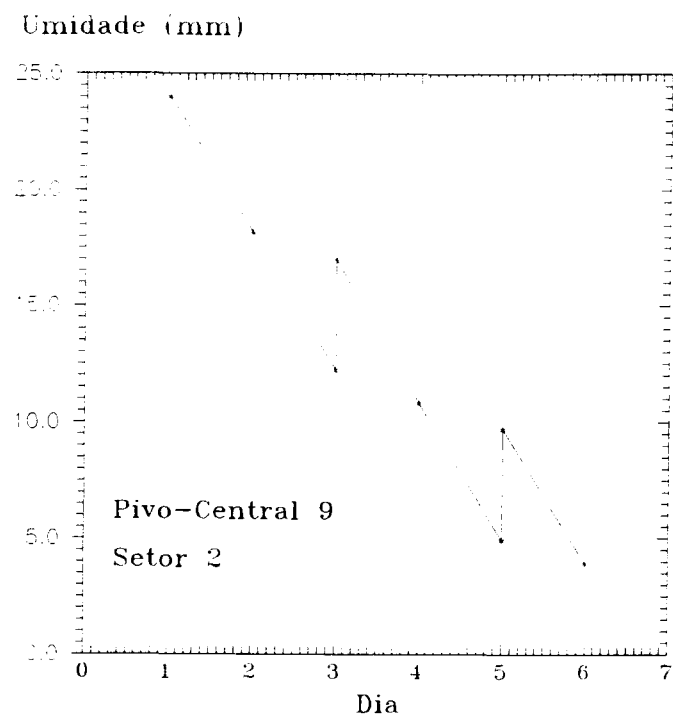
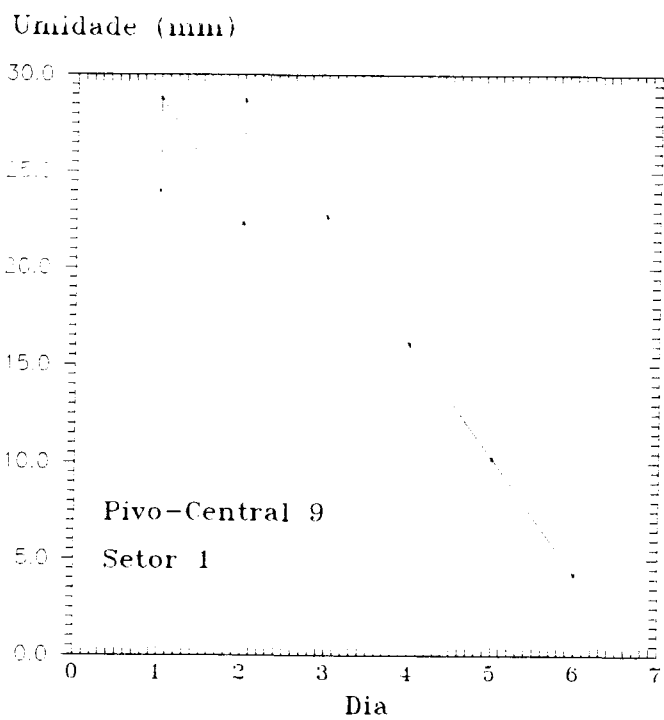


Umidade (mm)



Umidade (mm)





Caso 5

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 9$

Número de torres: $n_1 = n_2 = n_3 = 10$

Raio da última torre (m): $RT_1 = RT_2 = RT_3 = 329,55$

Área irrigada (ha): $A_1 = A_2 = A_3 = 40,156$

Tamanho dos setores θ_{is} (graus):

	1	2	3	4
1	90	90	90	90
2	90	90	90	90
3	90	90	90	90
4	90	90	90	90
5	90	90	90	90
6	90	90	90	90
7	90	90	90	90
8	90	90	90	90
9	90	90	90	90

Precipitação esperada Pe_j (mm):

$$Pe_1 = Pe_2 = Pe_3 = Pe_4 = Pe_5 = 0$$

Evapotranspiração ETR_{isj} (mm):

	1	2	3	4	5
1,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
2,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2,4	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
3,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
3,2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
3,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
3,4	5,7	6,0	5,8	6,0	6,5
4,1	6,8	4,8	7,8	5,8	5,4
4,2	5,4	7,4	6,5	5,5	6,1
4,3	5,6	6,5	5,8	7,3	6,9
4,4	6,2	6,9	6,5	4,9	6,4
5,1	5,9	6,5	5,4	5,4	6,2
5,2	4,9	5,9	6,7	5,9	5,0
5,3	6,5	7,2	8,2	5,8	6,9
5,4	7,2	5,1	5,9	6,2	6,9

6,1	6,8	5,9	7,8	8,7	6,4
6,2	6,4	4,8	6,4	5,8	6,2
6,3	5,8	6,1	6,5	6,3	7,1
6,4	5,0	4,5	6,0	6,4	5,4
7,1	6,8	5,2	6,9	5,0	6,7
7,2	6,4	6,1	6,0	6,2	6,9
7,3	7,1	6,7	6,9	6,4	5,8
7,4	5,5	6,0	8,3	5,8	4,9
8,1	6,4	6,2	5,5	6,0	5,9
8,2	5,8	5,9	6,0	6,0	4,9
8,3	6,4	5,8	6,5	7,4	6,8
8,4	5,6	6,5	5,6	5,5	6,0
9,1	6,5	6,0	6,6	5,9	6,0
9,2	5,8	6,0	6,2	5,9	5,8
9,3	4,9	5,5	6,0	6,5	6,0
9,4	6,4	6,6	6,7	5,9	6,0

Quantidade de água do solo no início do período (mm): 12,0

Lâmina bruta aplicada à 100% de velocidade (mm): 12

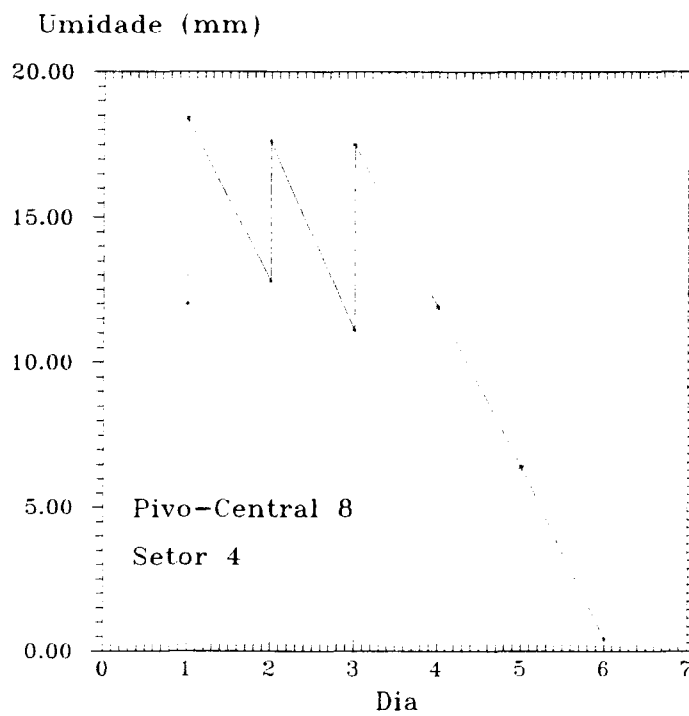
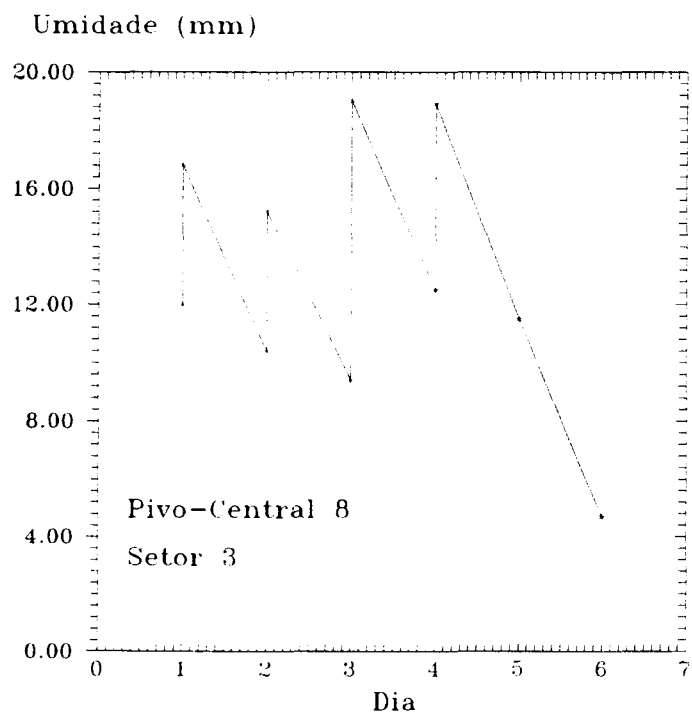
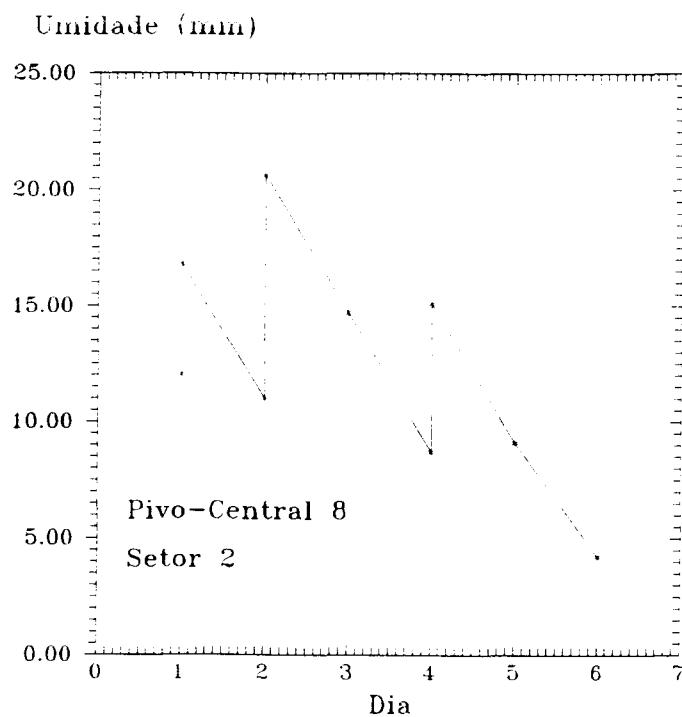
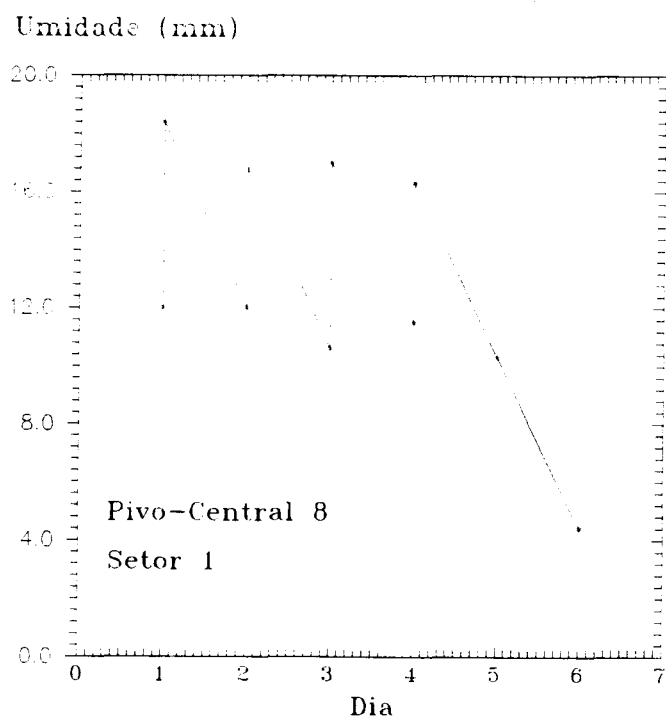
Lâminas hídras brutas possíveis L_n (mm):

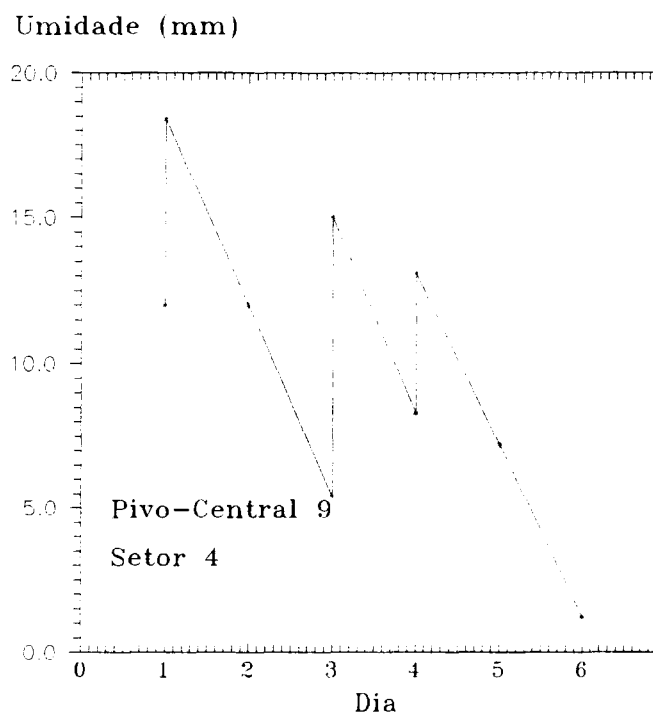
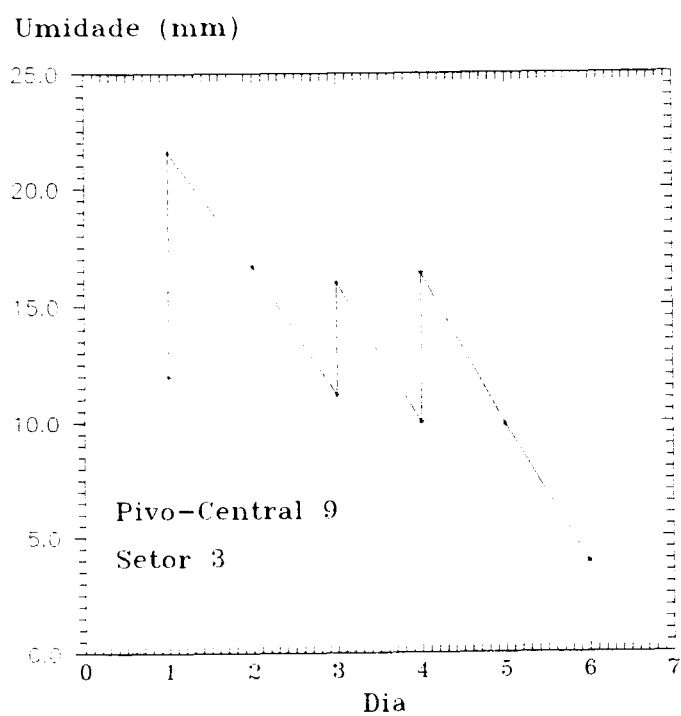
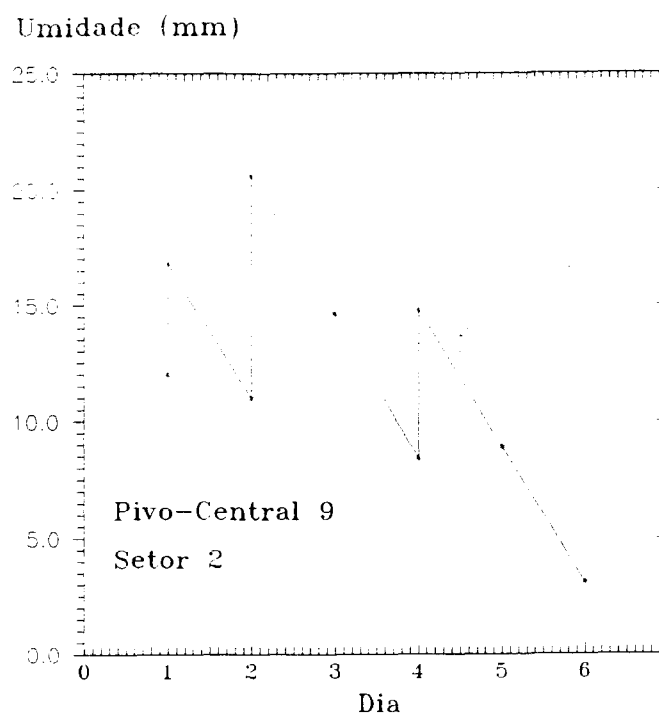
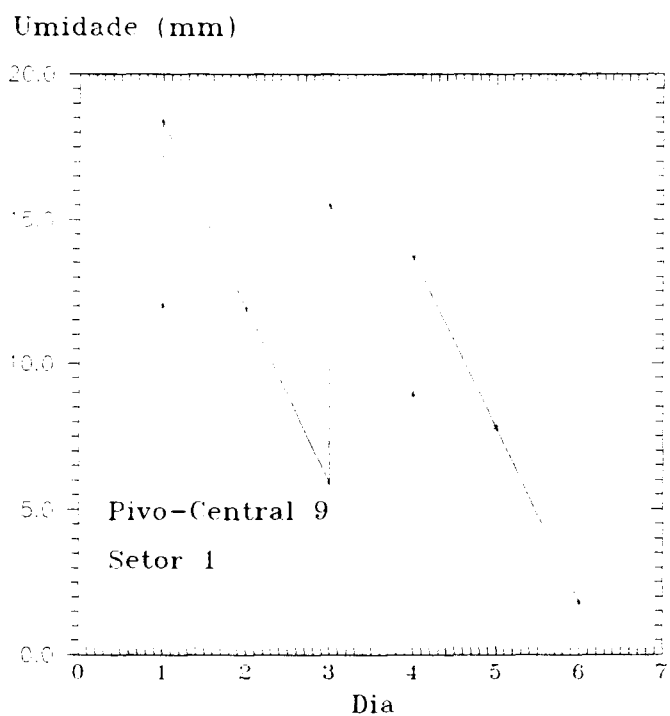
$L_1 = 6,000$ $L_2 = 8,000$ $L_3 = 10,000$ $L_4 = 12,000$

Lâminas hídras brutas selecionadas Lb_{isj} (mm)

	1	2	3	4	5
1,1	0,0	0,0	0,0	6,000	0,0
1,2	0,0	6,000	6,000	0,0	0,0
1,3	0,0	0,0	10,000	0,0	0,0
1,4	6,000	6,000	0,0	6,000	0,0
2,1	0,0	6,000	0,0	6,000	6,000
2,2	0,0	12,000	6,000	0,0	6,000
2,3	6,000	8,000	6,000	6,000	0,0
2,4	6,000	6,000	12,000	6,000	0,0
3,1	6,000	6,000	6,000	8,000	6,000
3,2	8,000	12,000	12,000	0,00	6,000
3,3	12,000	6,000	12,000	0,0	6,000
3,4	0,0	12,000	6,000	0,0	6,000
4,1	6,000	6,000	6,000	0,0	6,000
4,2	0,0	6,000	6,000	12,000	0,0
4,3	10,000	0,0	6,000	12,000	0,0
4,4	8,000	0,0	6,000	6,000	8,000
5,1	6,000	0,0	8,000	8,000	0,0
5,2	6,000	12,000	0,0	8,000	0,0
5,3	6,000	8,000	6,000	8,000	6,000
5,4	8,000	6,000	8,000	8,000	0,0
6,1	12,000	0,0	6,000	12,000	0,0
6,2	0,0	8,000	8,000	6,000	0,0

6,3	6,000	8,000	0,0	8,000	8,000
6,4	6,000	6,000	12,000	0,0	0,0
7,1	12,000	8,000	6,000	0,0	0,0
7,2	6,000	0,00	8,000	6,000	8,000
7,3	6,000	8,000	8,000	6,000	0,0
7,4	12,000	8,000	6,000	0,0	0,0
8,1	8,000	6,000	8,000	6,000	0,0
8,2	6,000	12,000	0,0	8,000	0,0
8,3	6,000	6,000	12,000	8,000	0,0
8,4	8,000	6,000	8,000	0,0	0,0
9,1	8,000	0,0	12,000	6,000	0,0
9,2	6,000	12,000	0,0	8,000	0,0
9,3	12,000	0,0	6,000	8,000	0,0
9,4	8,000	0,0	12,000	6,000	0,0





3.9. Gerenciamento da água destinada à irrigação

Na agricultura irrigada, muitos fatores contribuem para o aumento da produtividade e melhoria da qualidade dos produtos. Pode-se citar entre outros, o uso de sementes melhoradas, uso eficiente de fertilizantes, melhoria do controle fitossanitário, uso eficiente da água, etc. Dentre estes fatores, o gerenciamento da água aplicada é crítico para o êxito da cultura irrigada. O controle da umidade do solo através do manejo dos equipamentos de irrigação requer o conhecimento de como a cultura responde ao efeito do déficit de água sobre sua produtividade ao longo do ciclo fenológico. Nem sempre é possível definir o manejo da irrigação de modo a satisfazer as condições ótimas de umidade do solo, gerando níveis máximos de produtividade. Poderão haver restrições quanto a equipamentos, método de irrigação, clima, solos, mão de obra e principalmente de disponibilidade do recurso água. Cada cultura possui um período dentro do seu ciclo fenológico no qual o déficit hídrico produz uma queda significativa na sua produtividade. Na literatura, este período é denominado "período crítico da cultura". É claro que, qualquer cultura que seja submetida a déficit hídrico nos outros períodos do ciclo fenológico, sofrerá uma diminuição de sua produtividade, porém em menor escala. Todas estas informações, serão úteis e necessárias para que se possa estabelecer um plano ótimo de gerenciamento da água disponível para a irrigação, de modo a se obter a máxima produtividade.

3.9.1 O problema do gerenciamento da água disponível

Neste momento será tratada a questão na qual, obtidos os volumes v_{ij} necessários para operar cada pivô-central i no ciclo de operação j , como se poderá alocar estes volumes ao longo dos turnos de operação de cada ciclo, com custo mínimo. Será adotada a hipótese de que cada pivô-central será acionado uma única vez ao longo do conjunto de ciclos que compõe o horizonte de planejamento. Se por alguma razão isso não for possível, diminui-se o período de planejamento.

3.9.2 Formulação do problema do gerenciamento da água disponível para irrigação

Suponha determinados os volumes v_{ij} , necessários para operar cada pivô-central i , durante o ciclo j . A questão aqui será, como alocar o volume $\sum_i v_{ij}$ comprometido com a irrigação, segundo os turnos de operação definidos para cada ciclo.

Os ciclos de operação poderão ser de um ou dois dias, onde cada dia será dividido em 8 turnos com 3 horas de duração. Os horários correspondentes encontram-se abaixo.

turno	horário
1	06:00-09:00
2	09:00-12:00
3	12:00-15:00
4	15:00-18:00
5	18:00-21:00
6	21:00-24:00
7	24:00-03:00
8	03:00-06:00

Sejam as variáveis,

$x_{ij} = 1$ se o pivô-central i é acionado no ciclo j ,

$= 0$ caso contrário;

$y_{ijk} = 1$ se acionado o pivô-central i , o turno k é utilizado no ciclo j ,

$= 0$ caso contrário;

$C(k)_{ij}$: custo total de operação do pivô-central i durante o ciclo j , no turno k , (US\$);

$D(k)_j$: disponibilidade em volume de água no ciclo j , turno k (m^3).

Pode-se então formular o problema,

$$\text{Min} \sum_i \sum_j (C(1)_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k=2}^K C(k)_{ij} \cdot y_{ijk}) \quad (3.109)$$

s.a.

$$\sum_i v_{ij} \cdot x_{ij} \leq D(1)_j + \sum_i \sum_{k=2}^K D(k)_j \cdot y_{ijk} \quad (3.110)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad (3.111)$$

$$0 \leq y_{ijk} \leq 1 \quad (3.112)$$

$$x_{ij} = 0/1 \quad (3.113)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Os custos $C(k)_{ij}$ são ordenados de modo que o primeiro turno tenha sempre o menor custo para cada ciclo considerado. Um valor

diferente de 0 ou 1 para y_{ijk} indica que apenas uma percentagem do turno correspondente será utilizado.

Poderão ser adicionadas as restrições,

$$v_{ij} \cdot x_{ij} \leq VAP_{ij1} + \sum_k VAP_{ijk} \cdot y_{ijk}, \quad (3.114)$$

onde VAP_{ijk} é o volume (m^3) aplicado efetivamente pelo pivô-central i , no ciclo j , turno k , para garantir a aplicação da lâmina hídrica Lb_{ijk} .

A seguir são apresentadas soluções do modelo (3.109) a (3.114).

Caso 8

Número de pivôs-centrais ensaiados: $I = 30$

Horizonte de planejamento (ciclos de 2 dias): $J = 5$

Número de turnos de operação por ciclo: $K = 16$

Duração de cada turno: 3 horas

Variável de decisão (acionamento dos pivôs-centrais) x_{ij}

	1	2	3	4	5
1	1				
2	1				
3			1		
4	1				
5			1		
6				1	
7			1		
8			1		
9				1	
10				1	
11			1		
12				1	
13				1	
14	1				
15				1	
16			1		
17					1

18						1		
19	1							
20						1		
21	1							
22	1							
23						1		
24							1	
25			1					
26								1
27						1		
28	1							
29								1
30	1							

Variável de decisão (turnos de operação) y_{ijk}

	1	2	3	4	5	6	7	8
1,1	1	1		1		1	1	0,348
2,1	1	1		1				
3,3	1	0,906		1				
4,1	1	1		1		1	0,959	1
5,3	1	1		1				
6,4	1	1		1				
7,3	1	1		1				
8,3	1	1		1				
9,4	1	1		1				
10,4	1	1		1				
11,3	1	1		1				
12,4	1	1		1				
13,4	1	1		1				
14,1	1	1		1				
15,4	1	1		1				
16,3	1	1		1				
17,5	1	1		1				
18,3	1	1		1				
19,1	1	1		1				
20,3	1	1		1				
21,1	1	1		1				
22,1	1	1		1				
23,3	1	1		1				
24,4	1	1		1				
25,2	1	1		1				
26,5	1	1		1				
27,3	1	0,522						
28,1	1	1		1				
29,5	1	1		1				
30,1	1	1		1				

	9	10	11	12	13	14	15	16
1, 1	1	1	1	1		1		
2, 1	1	0, 901	1	1				
3, 3	1	1	1	1				
4, 1	1	1	1	1		1		
5, 3	1	0, 522		1				
6, 4	1	0, 522		1				
7, 3	1	0, 522		1				
8, 3	1	0, 522		1				
9, 4	1	0, 522		1				
10, 4	1	0, 522		1				
11, 3	1	0, 522		1				
12, 4	1		1	1				
13, 4	1	0, 522		1				
14, 1	1	1	0, 522					
15, 4	1	0, 522		1				
16, 3	1	0, 522		1				
17, 5	1	0, 522		1				
18, 3	1	0, 522		1				
19, 1	1	0, 522		1				
20, 3	1	0, 522		1				
21, 1	1	0, 522		1				
22, 1	1	1	0, 522					
23, 3	1	1	0, 522					
24, 4	1	0, 522		1				
25, 2	1	0, 522		1				
26, 5	1	0, 522		1				
27, 3	1	1	1	1				
28, 1	1	1	0, 522					
29, 5	1	0, 522		1				
30, 1	1	1	0, 522					

4. Resultados e discussão

4.1. Sobre a metodologia de cálculo da perda de carga em linhas laterais e dimensionamento econômico de adutoras de pivôs-centrais

Um dos elementos necessários para a formulação de modelos de dimensionamento de pivôs-centrais, é o cálculo da perda de carga devido ao atrito nas tubulações. Em condutos formados por uma única saída, não há dificuldade nenhuma neste processo. Por outro lado, quando o conduto possui múltiplas saídas, a situação é mais complexa, uma vez que a vazão ao longo da tubulação é variável. Para esta situação, foi desenvolvida em (3.5) uma metodologia de cálculo de perda de carga, que leva em conta o número real de aspersores existentes na linha lateral do pivô-central. Usualmente, a literatura considera um número infinito de saídas, o que permite um tratamento utilizando variável contínua, obtendo-se assim expressões tanto para perda de carga quanto para pressão, envolvendo integrais. Se por um lado estas expressões são mais simples, por outro lado, no caso de pivôs-centrais, subestima-se a perda de carga ao se considerar infinitas saídas na linha lateral. Os fatores de perda de carga F_{pc} , apresentados na Tabela 1, e calculados segundo a metodologia contida em (3.5), convergem para os valores encontrados na literatura. É importante observar a facilidade com a qual determina-se a perda de carga em tubulações de múltiplas saídas (com maior precisão), utilizando-se o fator F_{pc} .

Com relação ao dimensionamento econômico de adutoras de pivôs-centrais, o modelo apresentado em (3.6), minimiza a soma do valor presente dos custos fixos com os custos de energia, em base anual. Foram utilizados custos reais de, tubulações, bombas, motores, transformadores, chaves de partida e pivôs-centrais instalados. Para o cálculo da perda de carga na adutora, foram utilizadas, uma fórmula empírica (Hazen-Williams), e outra, com base cientificamente aceita (Universal). As Tabelas 17 a 20 mostram que existem diferenças nos resultados obtidos ao se usar uma ou outra fórmula. O diâmetro econômico obtido segundo Hazen-Williams, foi sempre maior ou igual ao diâmetro obtido ao se utilizar a fórmula Universal. Houve coincidência de aproximadamente 75% dos casos estudados. Foi observada uma tendência de que quanto maior o valor da lâmina hídrica aplicada maior é o percentual destas coincidências. Foi também analisada a possibilidade de ocorrência de inflação nos valores da tarifa de energia elétrica. Até o nível de 5% a.a. para a taxa de inflação, não houve alteração dos resultados. As Tabelas 21 a 24 apresentam os valores de diâmetros econômicos (CB), adotados pela Carborundun S/A. Em geral vale a relação $d_{CB} \leq d_{UN} \leq d_{HW}$, onde d_{CB} é o diâmetro utilizado pela Carborundun S/A, d_{UN} é o diâmetro econômico obtido com a fórmula Universal, enquanto que d_{HW} é relativo à fórmula de Hazen-Williams. Houve coincidência dos três diâmetros em cerca de 50% dos casos analisados.

4.2. Sobre a localização de pivôs-centrais

A questão da localização ótima de pivôs-centrais, deverá ser analisada para cada caso. Um estudo completo e detalhado deverá preceder a instalação de qualquer equipamento. Observou-se em situações reais que a instalação inadequada de um primeiro equipamento poderá comprometer futuras ampliações do projeto global. Observou-se ainda que esta não tem sido uma preocupação das firmas que produzem estes equipamentos, e que são elas que costumam decidir sobre quase todos os parâmetros dos projetos de irrigação. O modelo (3.77)...(3.80), mostrou-se viável e adequado para alocação de pivôs-centrais. Diversas situações foram analisadas, e as tabelas 25 e 26 mostram duas delas. Quanto menor a escala adotada, maior será a precisão na definição dos pontos, porém o modelo passa a conter um grande número de variáveis. A escala de $1/5$ do raio irrigado mostrou-se a mais adequada, combinando precisão e viabilidade na implementação do modelo. Se o tamanho do raio do pivô-central for considerado uma variável livre, a determinação da solução ótima é bastante complexa. O modelo formulado permite ainda gerar uma sequência de soluções que correspondem à configuração ótima quando fixado o número máximo de pivôs-centrais que deverão ser instalados ao longo do horizonte de planejamento. A sequência de instalação é determinada pelos custos associados a cada ponto. O modelo descrito por (3.77) a (3.80) é um modelo de programação linear inteira 0/1 do tipo (Packing Problem), e é sabido que sua resolução não é trivial. Foi

utilizado um algoritmo geral para esta finalidade, contido no software OSL, uma vez que não é objetivo deste trabalho a elaboração de algoritmos ou heurísticas de resolução.

4.3. Sobre o planejamento da irrigação para pivôs-centrais

A divisão de um pivô-central em setores, para o plantio de várias culturas, ou uma mesma cultura em estágios fenológicos diferentes, é uma estratégia para reduzir o pico de consumo de água pelas plantas. Procurou-se manter a umidade do solo, em cada setor, entre a umidade crítica e a capacidade de campo, minimizando o consumo total de água utilizada, ou de forma equivalente maximizando a eficiência dos pivôs-centrais, ou ainda maximizando o lucro por unidade de volume de água consumida. O modelo descrito por (3.96) a (3.100) é um modelo de programação linear que fornece os valores das lâminas hídricas a serem aplicadas pelos pivôs-centrais dentro da faixa estabelecida para operação dos mesmos. Já o modelo definido por (3.101) a (3.108) é um modelo de programação linear inteira mista 0/1 que cumpre basicamente a mesma finalidade, tendo por um lado a vantagem de escolher os valores das lâminas hídricas dentro de um conjunto pré-estabelecido, mas por outro lado exige maior esforço computacional e provavelmente a solução ótima neste caso terá custo maior em relação ao modelo anterior. Foram também estudados exemplos em que a função objetivo corresponde a minimizar o número de irrigações. Neste caso o modelo aponta para os maiores valores

da lâmina hídrica permitida pela disponibilidade do recurso água. Esta tem sido um estratégia bastante utilizada pelos agricultores irrigantes por trazer vantagens em relação à preservação do solo, diminuindo por exemplo a possibilidade de desenvolvimento de fungos.

4.4. Sobre o gerenciamento da água disponível para os pivôs-centrais

Uma decisão importante e complexa para o agricultor irrigante é que, detectada a necessidade de acionar cada pivô-central, em que instante do ciclo de operação isto deverá ocorrer? A operação de cada pivô-central deverá ser contínua ou intermitente? Quais os horários das operações liga/desliga, para cada equipamento, ao longo do ciclo? Os custos de mão de obra e de energia são variáveis ao longo de um mesmo dia, e também durante os dias da semana. Os turnos de operação iniciam-se às 06:00 horas com duração de 3 horas. Foi adotado o primeiro turno de cada dia como o de menor custo total de irrigação. Trabalhou-se com 5 e 7 dias como sendo o horizonte de planejamento, no qual cada pivô-central será acionado uma única vez. O modelo (3.109) a (3.113), cuja solução ótima indica o ciclo de operação de cada pivô-central, e seus correspondentes turnos de funcionamento é um problema com estrutura Dantzig-Wolfe. Se aproveitada esta estrutura especial, o tempo de processamento fica bastante reduzido. Este modelo linear misto com variável inteira 0/1 é razoavelmente grande em tamanho.

Para gerenciar 30 pivôs-centrais, operando com ciclos de 2 dias, num horizonte de planejamento de 7 dias, este modelo opera com 3571 variáveis, sendo 210 do tipo 0/1, 3360 reais no intervalo $[0,1]$ e 1 irrestrita.

5. Conclusões

O custo da água para a irrigação assim como sua disponibilidade estão forçando os agricultores irrigantes a exercerem um controle cada vez mais eficiente sobre sua aplicação. Irrigar com eficiência máxima será um objetivo a ser atingido. Nesta tarefa as técnicas da programação matemática serão de grande valia. O uso de funções objetivo bem elaboradas e a definição de restrições que possam representar com bastante realidade as condições de cultivo serão fundamentais nesta tarefa e constituem uma fonte de pesquisa importante e necessária a ser explorada.

Neste trabalho cuidou-se de utilizar a modelagem matemática como instrumento de formulação de problemas de programação matemática que permitam representar algumas questões enfrentadas pelos agricultores irrigantes.

Da análise dos modelos que representam os problemas aqui estudados e da interpretação das suas soluções, foi possível aceitar as hipóteses formuladas em (3.2.) Para o dimensionamento econômico da adutora foi obtido um problema de programação linear inteira cuja solução ótima é o diâmetro comercial a ser adotado no projeto. A localização de pivôs-centrais é resolvida com um modelo de programação linear inteira 0/1, conhecido na literatura como packing problem. O planejamento da irrigação para pivôs-centrais foi tratado com dois enfoques: o primeiro com liberdade de escolha para o valor da lâmina hídrica aplicada e o segundo com valores

pré-estabelecidos, com a fixação da velocidade de rotação do equipamento. O primeiro modelo é linear contínuo, e portanto de fácil resolução, enquanto que o segundo é um modelo linear misto 0/1. Para gerenciar o volume de água disponível para um conjunto de pivôs-centrais foi obtido um modelo também linear misto 0/1, tendo uma estrutura do tipo Dantzig-Wolfe. Ficou evidenciada a importância da metodologia adotada para definir os modelos estudados e da interdependência entre eles. Sem nenhuma dúvida, pode-se afirmar que projetos de sistemas de irrigação por aspersão tipo pivô-central, devem ser tratados sob o ponto de vista global, isto é, os aspectos dimensionamento, localização e operação, nunca poderão estar dissociados. Sómente o dimensionamento hidráulico do sistema não é garantia para o sucesso de um projeto desta natureza. A localização ótima dos equipamentos na área, e o controle efetivo da irrigação sempre deverão merecer atenção especial.

Finalmente, como futuras pesquisas relacionadas a este texto pode-se indicar o levantamento de parâmetros de cultivo que melhor representem as culturas irrigadas no Brasil, e no aspecto de resolução de modelos, a especialização de algoritmos ou heurísticas para os problemas de localização e gerenciamento da água disponível para pivôs-centrais, devido ao tipo de estrutura encontrada.

6. Referências Bibliográficas

- ANDERSON, C.; ROCHESTER, E.W.; HARDY JUNIOR, W.E. Position selection of center pivot irrigation systems using linear programming. Transactions of the ASAE, 28(5): 1551-6, Sept./Oct. 1985.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. Viçosa, Universidade Federal, 1982. 463p.
- BITTINGER, M.W. & LONGENBAUGH, R.A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. Transactions of the ASAE, 5(1): 26-30, 1962.
- CHU, S.T. Modified F factor for irrigation laterals. Transactions of the ASAE, 21(1): 116-8, Jan./Feb. 1978.
- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinklers. Davis, University of California, 1942. 65p. [Bulletin, 670]
- GUPTA, I.; HASSAN, M.Z.; COOK, J. Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points. Transactions of the American Institute of Industrial Engineers, 4(3): 200-4, 1972.
- HALL, W.A. & BUTCHER, W.S. Optimal timing of irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, 94(IR2): 267-75, 1968.
- HATCH, L.U. et al. Optimal irrigation pivot location on irregularly shaped fields. Southern Journal of Agriculture Economics, 163-70, Dec. 1985.
- HOLZAPFEL, E.A. & MARINO, M.A. Surface-irrigation nonlinear optimization models. Journal of Irrigation Drainage Engineering, 113(3): 379-92, Aug. 1987.
- HUANG, W.; LIANG, T.; WU, I. Optimizing water utilization through multiple crops scheduling. Transactions of the ASAE, 91(2): 293-8, 1975.
- JENSEN, M.C. & FRATINI, A.M. Adjusted "F" factors for sprinkler lateral design. Agricultural Engineering, 38(4): 247, 1957.

- KARMELI, D. D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Design of optimal water distribution networks. *Journal of the Pipeline Division*, 94(1): 1-10, 1968.
- KELLER, J. Selection of economical pipe sizes for sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, 8(2): 186-93, 1965.
- LABADIE, J.W. Otimização da operação de projetos hidroagrícolas. Brasília, Ministério da Irrigação, 1987. 109p.
- MANNOCCHI, F. & MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(3): 484-503, May/June, 1994.
- ORON, G. Technical and economic considerations in the design of closed conduit irrigation systems: a case study. *Agricultural Water Management*, 5(1): 15-27, 1982.
- . & KARMELI, D. Procedure for the economical evaluation of water networks parameters. *Water Resources Bulletin*, 15(4): 1050-60, Aug. 1979.
- . & ————. Solid set irrigation system design using linear programming. *Water Resources Bulletin*, 17(4): 565-70, Aug. 1981.
- . & WALKER, W.R. Optimal design and operation of permanent irrigation systems. *Water Resources Research*, 17(1): 11-7, 1981.
- PLEBAN, S. & AMIR, I. Design procedure of sprinkling laterals: the mathematical background of a computerized aid. *Agricultural Water Management*, 3(4): 269-78, July, 1981.
- ROCHESTER, E.W.; HATCH, L.U.; GILLESPIE, J.M. Small towable center pivots for irregularly shaped fields: an engineering-economic analysis. *Applied Engineering in Agriculture*, 4(3): 218-25, Sept. 1988.
- SAAD, J.C.C. Otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por microaspersão, utilizando programação não linear. Piracicaba, 1994. 114p. [Tese (Doutoramento) - ESALQ-USP]

- SOLIANI, R. Alocação ótima de pivôs-centrais em pequenas áreas com fronteira irregular. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 16., Uberlândia, 1993. Anais. Uberlândia, SBMAC, 1993.
- . Uma metodologia para o cálculo do fator de correção para perda de carga em linhas laterais de pivôs-centrais. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., Santiago, 1994. Anais. Santiago, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, 1994(a). p.231-8.
- . Um modelo Dantzig-Wolfe para alocação de água em pivôs-centrais. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 17., Vitória, 1994. Anais. Vitória, SBMAC, 1994(b).
- .; TAUBE, M.T.; FRIZZONE, J.A. Programação setorial de pivôs-centrais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., Campinas, 1994. Anais. Campinas, 1994.
- TRAVA, J.; HEERMANN, D.F.; LABADIE, J.W. Optimal on-farm allocation of irrigation water. Transactions of the ASAE, 20(1): 85-95, Jan./Feb. 1977.

7. Bibliografia complementar

- ALPEROVITS, E. & SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13(6): 885-900, Dec. 1977.
- BUCHLEITER, G.W.; HEERMANN, D.F.; DUKE, H.R. Integrated water-energy management system for center pivot irrigation: functional requirements. *Transactions of the ASAE*, 27(5): 1419-23, Sept./Oct. 1984.
- CARBORUNDUM. Pivô-central: manual de projetos. s.n.t.
- CHÁVEZ-MORALES, J.; MARINO, M.A.; HOLZAPFEL, E. A. Planning model of irrigation district. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 113(4): 549-64, Nov. 1987.
- CHEN, D. & WALLENDER, W.W. Economic sprinkler selection, spacing, and orientation. *Transactions of the ASAE*, 737-43, 1984.
- CHU, S.T. & MOE, D.L. Hydraulics of a center pivot system. *Transactions of the ASAE*, 15(5): 894-6, Sept./Oct. 1972.
- DILLON JUNIOR, R.C.; HILER, E.A.; VITTETOE, G. Center-pivot sprinkler design based on intake characteristics. *Transactions of the ASAE*, 15(5): 996-1001, Sept./Oct. 1972.
- EDLING, R.J. Variation of center pivot operation with field slope. *Transactions of the ASAE*, 22(5): 1039-43, Sept./Oct. 1979.
- GARTON, J.E. Design of irrigation pipe lines for minimum annual cost. *Transactions of the ASAE*, 3(1): 29-32, 1960.
- GILLEY, J.R. Suitability on reduced pressure center-pivots. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 110(1): 22-34, Mar. 1984.
- HEERMANN, D.F.; BUCHLEITER, G.W.; DUKE, H.R. Integrated water-energy management system for center pivot irrigation: implementation. *Transactions of the ASAE*, 27(5): 1424-9, Sept./Oct. 1984.
- HORN, D.L. Method for determining minimum-cost farm-irrigation pipeline design. *Transactions of the ASAE*, 10(2): 209-212; 216, 1967.

- JAMES, L.G. Modeling the performance of center pivot irrigation system operating on variable topography. Transactions of the ASAE, 25(1): 143-9, Jan./Feb. 1982.
- KELLER, J. Energy economics in pipe and system selection. Logan, Utah State University, 1976.
- KELLER, J. & BLIESNER, R.D. Sprinkle and trickle irrigation. New York, Van Nostrand, 651p.
- KINCAID, D.C. & HEERMANN, D.F. Pressure distribution on a center-pivot sprinkler irrigation system. Transactions of the ASAE, 13(5): 556-8, Sept./Oct. 1970.
- LASDON, L.S. Optimization theory for large systems. London, Mac Millan, 1970. 523p.
- MARTELO, S. & TOTH, P. Knapsack problems: algorithms and computer implementations. Bologna, University of Bologna; John Wiley, 1990. 296p.
- MILLAR, A.A. Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura, 1984. 57p.
- MURTY, K.G. Linear and combinatorial programming. New York; John Wiley & Sons, 1976. 567p.
- PIRKUL, H. & SCHILLING, D.A. The maximal covering location problem with capacities on total workload.
- REDDY, J.M. & APOLAYO, H. Friction correction factor for center-pivot irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 114(1): 183-5, Feb. 1988.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 3.ed. Piracicaba, CENA-USP-CNEN; Fundação Cargill, 1975. 286p.
- SOLOMON, K. & BEZDEK, J.C. Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. Transactions of the ASAE, 23(4): 899-906, July/Ago. 1980.
- STILLMUNKES, R.T. & JAMES, L.G. Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. Transactions of the ASAE, 25(1): 130-3, Jan./Feb. 1982.

- TSAI, Y.J.; JONES, J.W.; MISHOE, J.W. Optimizing multiple cropping systems: a systems approach. *Transactions of the ASAE*, 30(6): 1554-61, Nov./Dec. 1987.
- TSAI, ; MISHOE, J.W.; JONES, J.W. Optimizing multiple cropping systems: simulation studies. *Agricultural Systems*, 25: 165-76, 1987.
- VIEIRA, D.B. *As técnicas de irrigação*. São Paulo, Globo, 1989. p. 263.
- . SOLIANI, R.; RAMOS, A.R. Efeito do manejo da irrigação no dimensionamento hidráulico do pivô-central. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 15., Cartagena, 1992. *Anais*. Cartagena, 1992. p.573-82.

8. APÊNDICE

8.1 Aspectos gerais da Engenharia de Irrigação

A primeira concepção que se deve ter sobre irrigação, é que irrigar não é jogar água na cultura; isto é molhar VIEIRA (1989). A irrigação é uma ferramenta a mais que o agricultor poderá utilizar para produzir mais e melhor, com mais segurança, minimizando assim os riscos a que esta sujeito.

O agricultor que deseja planejar a instalação de um sistema de irrigação, depende de uma série de decisões a serem tomadas. Estas decisões envolvem respostas a questões objetivas que ele deverá fazer, tais como:

- a) Deve-se irrigar ?
- b) Existe água suficiente ?
- c) Há a dependência de chuvas ?
- d) A produção deve aumentar ?
- e) Que tipo de sistema deve ser utilizado ?
- f) Quais são as necessidades de energia ?
- g) Quais são as necessidades de mão de obra ?
- h) Qual a previsão para amortização do investimento ?

Se for possível prever;

- 1) De quanto deverá aumentar a produção,
- 2) Qual a melhora esperada na qualidade dos produtos,
- 3) Quanto de água será necessário, e ainda;
- 4) Se for possível dispor da quantidade necessária de água, o

agricultor estará apto a decidir se é possível ou não irrigar, e em caso afirmativo qual a lucratividade esperada.

Se a irrigação é lucrativa, o aumento médio no valor da cultura devido à irrigação deverá ser maior ou igual ao custo anual da irrigação. Existem culturas que são altamente rentáveis quando irrigadas. É impossível garantir que um sistema de irrigação seja lucrativo. A irrigação é um processo complexo, onde um grande número de variáveis interferem no processo. Ainda, aliado ao projeto do sistema de irrigação existe o manejo, que é de suma importância para o sucesso do empreendimento. O manejo da irrigação é a metodologia segundo a qual se opera o sistema, ou seja, o controle das variáveis; como, quanto e quando aplicar água à cultura. Para um manejo adequado é necessário um conhecimento detalhado da fenologia da cultura a ser irrigada.

A adoção da irrigação deve estar muito bem entrosada com outras operações e práticas recomendadas tais como: adubação nos níveis e épocas adequadas, uso de sementes melhoradas, combate às pragas e doenças, aplicação de fertilizantes, manejo adequado, etc.

A agricultura irrigada exige muito mais dedicação, técnica e planejamento do que a agricultura de sequeiro. Há uma grande transformação no modo de pensar e agir do agricultor, que passa de uma safra anual para até três. Ele terá que planejar a sequência de culturas a ser adotada, mas sem deixar de proteger o solo. Deverá dispor de sementes selecionadas e adaptadas à irrigação;

terá que contar com mão de obra especializada, com domínio das técnicas de manejo; terá que planejar também, como e onde armazenar, como transportar e comercializar a sua produção, que passa a ser muito maior. Portanto, a irrigação exige muito mais dedicação e sobretudo muita organização por parte do agricultor.

Antes que o agricultor decida-se pela irrigação, é preciso determinar qual é o aumento esperado na produção, se mais água estiver disponível.

Tabela 27. Produção média de culturas irrigadas e não irrigadas

Cultura	Produção por Hectare		
	Não Irrigada	Irrigada	Aumento
Aspargos	3,0 ton	9,0 ton	6,0 ton
Arroz	1,5 ton	6,0 ton	4,5 ton
Batata	9,5 ton	17,5 ton	8,0 ton
Cana-de-Açúcar	65,0 ton	120,0 ton	55,0 ton
Cebola	7,5 ton	20,0 ton	12,5 ton
Feijão	0,9 ton	2,4 ton	1,5 ton
Laranja	500 caixas	1000 caixas	500 caixas
Milho	1,7 ton	5,0 ton	3,3 ton
Tomate	37,0 ton	50,0 ton	13,0 ton

Fonte: Banco de dados da Markovitch Comunicações

A Tabela 27 fornece apenas uma idéia geral do efeito da irrigação nas culturas, uma vez que a produção varia também com o clima, solo, variedade da cultura, prática de cultivo, etc.

A irrigação também propicia o uso de forma mais eficiente dos fertilizantes, que podem ser aplicados pelo sistema, em quantidades e frequências ajustadas de acordo com as necessidades da planta. Esta prática pode reduzir significativamente as perdas

dos nutrientes mais voláteis, tais como o nitrogênio. Além do aumento da produção, pode-se esperar uma melhora na qualidade dos produtos cultivados sob irrigação. Diversas experiências e pesquisas tem comprovado que a irrigação melhora a qualidade dos produtos. Os frutos são geralmente maiores. O amendoim, por exemplo têm maior número de vagens e grãos. As maçãs são mais macias. Os tomates são maiores e de paladar mais agradável. O milho produz espigas maiores e mais uniformes. O feijão possui vagens maiores e mais uniformes. Todas estas qualidades certamente aumentam o valor de mercado dos produtos irrigados.

A irrigação, pode ainda ser utilizada para minimizar os efeitos das geadas, e também das altas temperaturas em dias de verão. Com a irrigação, as épocas de colheitas podem ser controladas (adiantadas ou retardadas), procurando-se assim efetuar a colheita de determinadas culturas (que não possam ser estocadas), em épocas mais apropriadas, com preços de mercado mais favoráveis (entre-safra por exemplo).

A disponibilidade do recurso água, via de regra, determina uma restrição ativa em projetos de irrigação. Na maioria das vezes, é um recurso limitado, em outras situações, é de qualidade imprópria para a irrigação, contendo por exemplo sais (cloreto de sódio, sulfato de magnésio, sulfato de cálcio, bicarbonato de sódio), cloro e boro. No sentido de racionalizar o uso da água existem diversos trabalhos na literatura especializada, que procuram fornecer um calendário para épocas de plantio, das mais

variadas culturas irrigadas, de modo a defasar os picos de consumo de água de cada cultura, em função de seu estágio de crescimento.

A área irrigada hoje no Brasil, (3 milhões de hectares), corresponde a 6% da área total agricultável do país, que é de aproximadamente 50 milhões de hectares. A aspersão é a forma de irrigação mais utilizada, e dentre os sistemas de aspersão o pivô-central o preferido.

8.2. Dimensões utilizadas para os pivôs-centrais

As tabelas a seguir referem-se a dimensões da Carborundum S/A, e serão as utilizadas neste trabalho.

Tabela 28. Dimensões de pivôs-centrais (*)

nº de torres j	raio da última torre (m)	raio irrigado (m)	área	tempo do irrigada (ha)	ciclo (h)
5	206,10	234,07		17,21	10,36
6	247,25	175,22		23,80	12,49
7	288,40	316,37		31,44	14,50
8	329,55	357,52		40,15	16,56
9	370,70	398,67		49,93	18,63
10	411,85	439,82		60,77	20,70
11	453,00	480,97		72,67	22,77
12	494,15	522,12		85,64	24,84
13	535,30	563,27		99,67	26,91
14	576,45	604,42		114,77	28,98
15	617,60	645,57		130,93	31,04

(*) vão curto (k = 1)

vão inicial: 41,50 m - vãos complementares: 41,15 m

lance em balanço: 27,97 m - sem bomba booster

Tabela 29. Dimensões de pivôs-centrais (*)

nº de torres j	raio da última torre (m)	raio irrigado (m)	área	tempo do irrigada (ha)	ciclo (h)
5	239,72	267,69		22,51	12,05
6	287,60	315,57		31,28	14,46
7	335,48	363,45		41,50	16,86
8	383,36	411,33		53,15	19,27
9	431,24	459,21		66,25	21,68
10	479,12	507,09		80,78	24,08
11	527,00	554,97		96,76	26,49
12	574,88	602,85		114,17	28,90
13	622,76	650,73		133,03	31,30

(*) vão médio (k = 2)

vão inicial: 48,20 m - vãos complementares: 47,88 m

lance em balanço: 27,97 m - sem bomba booster

Tabela 30. Dimensões de pivôs-centrais (*)

nº de torres j	raio da última torre (m)	raio irrigado (m)	área	tempo do irrigada (ha)	ciclo (h)
5	273,02	300,99		28,46	13,72
6	327,55	355,52		39,71	16,46
7	382,08	410,05		52,82	19,20
8	436,61	464,58		67,81	21,95
9	491,14	519,11		84,66	24,69
10	545,67	573,64		103,38	27,43
11	600,20	628,17		123,97	30,17
12	654,73	682,70		146,42	32,91

(*) vão longo (k = 3)

vão inicial: 54,90 m - vãos complementares: 54,53 m

lance em balanço: 27,97 m - sem bomba booster

8.3. A questão energética

O aumento dos custos de energia elétrica, ultimamente tem se verificado acima dos níveis de inflação e por isso tem estimulado a busca de alternativas de conservação. O consumo de energia elétrica de um conjunto elevatório para transportar um volume V, a uma altura H, pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$E = 0,00273 \cdot \frac{H \cdot V}{\eta} , \quad (8.1)$$

onde,

E : energia consumida (kwh),

H : altura manométrica de bombeamento (m),

V : volume de água bombeada (m³),

η : rendimento do conjunto motor-bomba (%).

O custo da energia é o produto da energia consumida E em kwh pelo valor da tarifa do kwh. Portanto para diminuir os custos de energia seria necessário reduzir a altura manométrica, e/ou o volume bombeado, ou aumentar a eficiência do conjunto motor-bomba. Para sistemas de irrigação, no sentido de reduzir o valor da altura manométrica foram desenvolvidos aspersores que funcionam com baixa ou média pressão. A altura manométrica também é reduzida com o aumento do diâmetro da tubulação adutora. Este aumento do diâmetro contudo provoca uma elevação dos custos fixos de implantação. Um bom projeto, terá que possuir um equilíbrio na relação de custos determinada pelo diâmetro da adutora e consumo de energia.

Um conhecimento detalhado das características do sistema tarifário da energia elétrica também proporciona diversas possibilidades de gerenciar o consumo de eletricidade e de reduzir as despesas com este insumo.

Qualquer estudo, visando a redução do consumo de energia elétrica de um sistema já implantado, passa por uma análise das contas de fornecimento de energia, que certamente levantam algumas possibilidades de redução do consumo. Uma cuidadosa inspeção no equipamento deve ser feita no sentido de detectar falhas de funcionamento, estudar a possibilidade de diminuição da lâmina bruta aplicada, analisar os horários escolhidos para efetuar a irrigação, estudar a possibilidade de redução da pressão de serviço, estudar o funcionamento da bomba, etc. Com relação ao rendimento do conjunto elevatório, ele está associado à escolha do motor e da bomba, de acordo com as características destes equipamentos.

8.4. Características do sistema de energia elétrica do Brasil

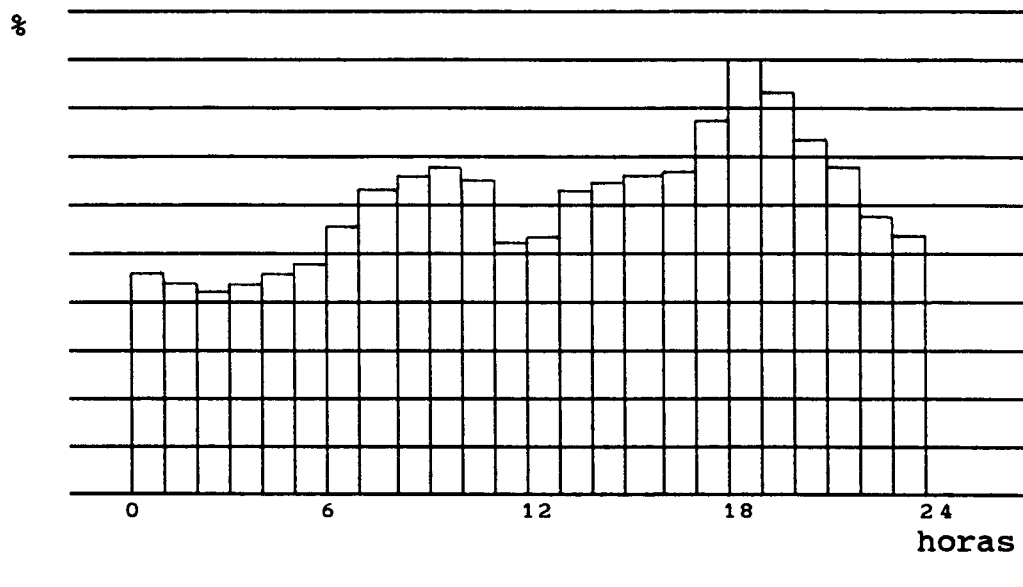
As tarifas de energia elétrica, hoje em vigor no Brasil, são calculadas em função de dois componentes básicos que compõem seu preço.

- componente devido à "demanda de potência" (kw) e,
- componente devido ao "consumo da energia" (kwh).

Até 1981, não havia diferenciação de preços segundo a utilização da energia durante as horas do dia e períodos do ano.

Até então, para o consumidor, era indiferente utilizar a energia elétrica no final da tarde ou de madrugada, no mes de janeiro ou agosto. Esta sistemática era conhecida como "convencional".

Figura 16. Curva de carga para o sistema num dia útil



Fonte: Codil: Comitê de Distribuição de Energia Elétrica

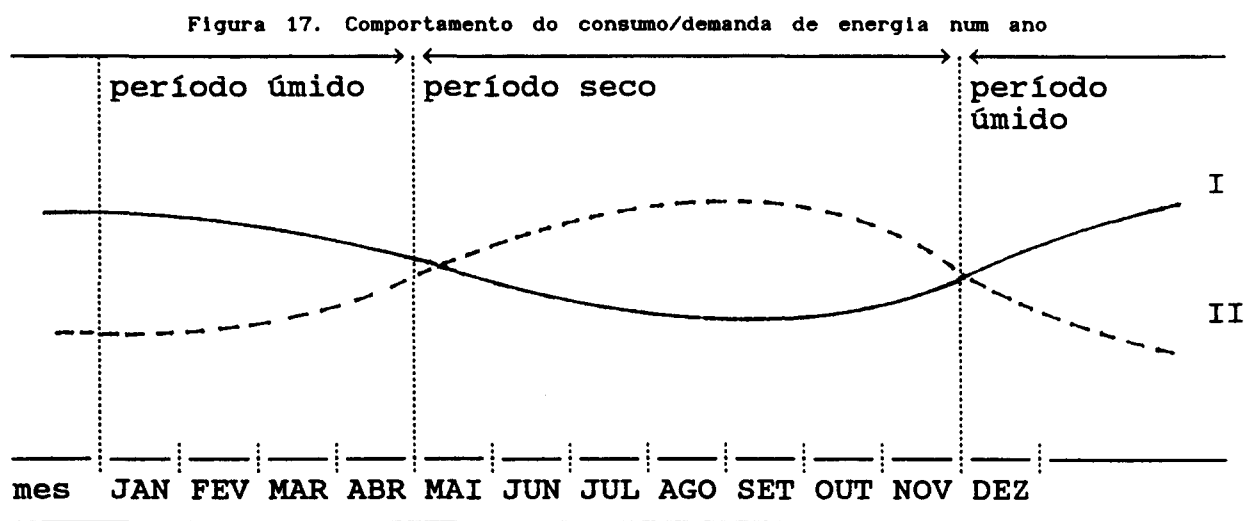
Do gráfico da curva de carga do sistema, observa-se que no horário aproximadamente das 17 às 22 horas, há uma intensa utilização da energia elétrica. Este horário de maior demanda, é denominado "horário de ponta" do sistema elétrico brasileiro, atingindo seu máximo aproximadamente às 19 horas. Para efeito de calculo de tarifas, o "horário de ponta" é definido pela concessionária como um intervalo de 3 (três) horas consecutivas, compreendido entre 17 e 22 horas, de segunda à sexta-feira, e o "horário fora de ponta", corresponde ao intervalo complementar às

3 (três) horas de ponta, mais as horas dos sábados e domingos. No Estado de São Paulo, a Companhia Paulista de Força e Luz, adota como horário de ponta a período compreendido entre a 18:00 horas e 21:00 horas.

Um novo consumidor, a ser atendido no horário de ponta, custará mais à concessionária, do que em qualquer outro horário do dia, em função da necessidade de ampliação do sistema, para o seu atendimento.

Uma outra característica do sistema, existe a influência da disponibilidade dos mananciais em gerar energia durante o ano.

A Figura 17 abaixo, descreve a relação entre a capacidade de gerar energia e o consumo ao longo do ano.



Fonte: Codl: Comite de Distribuição de Energia Elétrica

A curva (I) representa a disponibilidade média de água nos mananciais a ser represada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, constituindo o potencial predominante de geração de

eletricidade no Brasil.

A curva (II) representa o comportamento médio do mercado de energia elétrica a nível nacional, assumindo um valor máximo exatamente no período em que a disponibilidade de água nos mananciais é mínima.

A partir desta constatação, pode-se identificar em função da disponibilidade hídrica, uma época do ano, denominada "período seco", de maio a novembro de um mesmo ano, e outra chamada "período úmido", de dezembro de um ano até abril do ano seguinte.

O atendimento ao mercado no período seco só é possível devido à capacidade de armazenamento dos reservatórios das usinas geradoras de energia, que estocam água durante o ano. Assim o fornecimento de energia no período seco tem um custo de geração maior, devido à necessidade de construção de grandes reservatórios, e também da eventual geração de energia através de usinas térmicas ou atômicas a um custo ainda maior.

Em função da identificação destas características de comportamento da carga ao longo do dia e do ano, é que foi concebida a Estrutura Tarifária Horo-Sazonal - Tarifas Azul e Verde, que consiste na aplicação de preços diferenciados de acordo com o horário de consumo no dia (ponta e fora de ponta) e no ano (período seco e úmido).

8.5. Tarifas de energia elétrica vigentes no Brasil

A atribuição de preços diferenciados para as tarifas, de

acordo com o horário de utilização no dia e período do ano, tem como finalidade preservar o sistema elétrico em função da necessidade de:

a) estimular o deslocamento de parte da carga para os horários em que o sistema elétrico estiver menos sobrecarregado,

b) orientar o consumo de energia para períodos do ano em que houver maior disponibilidade de água nos reservatórios das usinas.

Os preços diferenciados ainda permitirão que o consumidor possa reduzir suas despesas com energia elétrica, promovendo por exemplo, quando possível, um deslocamento da carga e consumo de modo a se evitar ao máximo a utilização do "horário de ponta" e "período seco". Este fato tenderá a levar o mercado consumidor à uma utilização mais racional da energia, e conseqüentemente acarretará um menor investimento unitário com a entrada de novos consumidores.

Portanto, os consumidores rurais irrigantes, que utilizam equipamentos pivô-central, e que pretendam que o mesmo execute uma volta por dia, deveriam projetá-lo de modo que o tempo de uma rotação completa fosse no máximo de 20 ou 21 horas.

Atualmente as estruturas tarifárias disponíveis aos contratantes são:

a) Tarifa convencional

- Demanda de potência (kw)

- 1) um preço único

- Consumo de energia (kwh)

1) um preço único

b) Tarifa Azul

- Demanda de potência (kw)

1) um preço para a ponta

2) um preço para fora de ponta

- Consumo de energia (kwh)

1) um preço para ponta em período úmido

2) um preço para fora de ponta em período úmido

3) um preço para ponta em período seco

4) um preço para fora de ponta em período seco

c) Tarifa Verde

- Demanda de potência (kw)

1) um preço único

- Consumo de energia (kwh)

1) um preço para ponta em período úmido

2) um preço para fora de ponta em período úmido

3) um preço para ponta em período seco

4) um preço para fora de ponta em período seco

A opção por um dos tipos de tarifas é feita sob forma de contrato com a concessionária, e deve ser decidida após um cuidadoso estudo das condições de operação do equipamento, particularmente no horário de ponta, uma vez que existem sobretaxas, chamadas tarifas de ultrapassagem, que incidem sobre a parcela da demanda medida que superar o valor da demanda contratada, respeitados certos limites de tolerância.