

**JOÃO CARLOS GUIMARÃES**

**MODELO MATEMÁTICO PARA DIMENSIONAMENTO E  
ANÁLISE DE REDES HIDRÁULICAS EM IRRIGAÇÃO POR  
ASPERSÃO CONVENCIONAL**

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

**Orientador**

Prof. Dr. ELI FERREIRA

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
1995**

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

Guimarães, João Carlos

Modelo matemático para dimensionamento e análise de redes hidráulicas de irrigação por aspersão convencional / João Carlos Guimarães. -- Lavras : UFLA, 1995.

102 p. : il.

Orientador: Eli Ferreira.

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Irrigação por aspersão. 2. Redes hidráulicas. 3. Regime de  
[redacted] Dimensionamento. 5. Modelo matemático. 6. Método  
Hardy-Cross. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-627.52

631.587

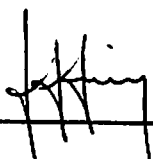
631.7

**JOÃO CARLOS GUIMARÃES**

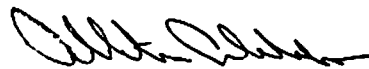
**MODELO MATEMÁTICO PARA DIMENSIONAMENTO E  
ANÁLISE DE REDES HIDRÁULICAS EM IRRIGAÇÃO POR  
ASPERSÃO CONVENCIONAL**

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

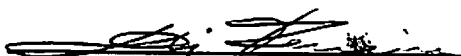
**APROVADA em 14 de Agosto de 1995**



**Prof. Luiz Antônio Lima**



**Prof. Alberto Colombo**



**Prof. Eli Ferreira**

**(Orientador)**

**À minha mulher, Cléa Venina**

**À meus filhos, Camila, Daniel e Gabriela**

**Aos meus pais, Álvaro e Íris**

**DEDICO**

**Aos Professores e Amigos**

**Antônio Marciano da Silva**

**Alberto Colombo**

**Eli Ferreira**

**Luiz Antônio Lima e**

**Manoel Alves de Faria**

**OFEREÇO**

## **AGRADECIMENTOS**

**A Universidade Federal de Lavras, por intermédio do Departamento de Engenharia , pela acolhida e apoio dispensados;**

**Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos;**

**A Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais, pela liberação e apoio durante a vigência do curso;**

**Ao professor Eli Ferreira, pela segura orientação e apoio recebidos no decorrer do curso e na realização deste trabalho;**

**Aos professores Luiz Antônio Lima e Alberto Colombo, pela valiosa colaboração e pelas sugestões apresentadas;**

**Aos professores Antônio Marciano da Silva e Manoel Alves de Faria pela orientação, apoio, dedicação e, especialmente pela amizade;**

**Ao colega Tadayuki Yanagi Júnior, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho e especialmente pela amizade;**

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

Aos colegas de curso Renato, Sílvia, Artur, José Aparecido, Rute, Marcus Metri e Luiz Gonzaga pelo convívio e amizade;

À minha esposa e aos meus filhos, pelo incentivo, carinho e paciência durante o curso;

Aos demais colegas do curso e a todos que direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xvi
“SUMMARY”.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Considerações Gerais.....	4
2.2 Métodos de Irrigação.....	6
2.3 Método de Irrigação por Aspersão.....	7
2.4 Aspensor.....	12
2.5 Tubulação.....	15
2.6 Perda de Carga Contínua.....	15
2.6.1 Perda de Carga Localizada.....	29
2.7 Linhas de Tubulações.....	32

2.7.1 Dimensionamento baseado na perda de carga preestabelecida entre a primeira e a última linha lateral.....	33
2.7.2 Dimensionamento baseado na análise econômica, método das tentativas.....	34
2.8 Redes de Conduitos Forçados.....	37
2.8.1 Fundamentos do Método de Hardy-Cross.....	38
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 Modelo Matemático.....	43
3.2 Dimensionamento do Sistema.....	44
3.2.1 Algoritmo.....	56
3.2.2 Fluxograma.....	64
3.2.3 Programa.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5 CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99



## LISTA DE TABELAS

TABELA		Página
1	Rugosidade absoluta para tubos de pvc, segundo Bernuth e Wilson (1989).....	23
2	Variação do coeficiente "C" de Hazen Williams com tempo de uso do conduto, para tubos de ferro fundido, segundo King (1957).....	24
3	Coeficiente de resistência $\xi$ , devido a brusca contração de seção, segundo Neves (1989).....	29
4	Coeficiente de resistência $\xi$ , devido a brusca contração de diâmetro, segundo Neves (1989).....	30
5	Coeficiente de resistência $\xi$ , para algumas peças segundo Azevedo Netto (1985).....	30
6	Coeficiente de resistência $\xi$ , para algumas peças de diâmetro menor que 100 mm segundo Lencastre (1985).....	31
7	Coeficiente de resistência $\xi$ , para várias conexões segundo Streeter (1982).....	31

8	Coefficiente KP para tanque "classe A" para estimativa da evapotranspiração de referência, segundo Doorenbos e Pruitt (1977).....	45
9	Coefficiente de cultura $K_c$ correspondente a algumas culturas extensivas e de hortaliças, em diferentes fases de seu crescimento e segundo condições climáticas predominantes, segundo Doorenbos e Pruitt (1977).....	47
10	Classificação das culturas em grupo para obtenção fator de disponibilidade "f", segundo manual da TIGRE (1990).....	48
11	Valores do fator "f" em função da evapotranspiração máxima em mm/dia, segundo manual da TIGRE (1990).....	47
12	Classificação da chuva promovida por um aspersor, conforme o valor do Grau de pulverização (G.P), segundo manual da TIGRE (1990).....	50
13	Dados de entrada referentes ao exemplo de projeto nº 1.....	71
14	Resultados da simulação do exemplo nº 1, para $\epsilon = 0,02$ mm e $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s.....	78
15	Dados de entrada referentes ao exemplo de Projeto nº 2.....	81
16	Resultados da simulação do exemplo nº 2, para $\epsilon = 0,02$ mm e $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s.....	87
17	Dados de entrada referentes ao exemplo de Projeto nº 3.....	89
18	Resultados da simulação do exemplo nº 3, para $\epsilon = 0,02$ mm e $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s.....	94

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Fluxograma.....	64
2	Esquema da rede do projeto do exemplo n° 1.....	76
3	Pressão operacional dos aspersores do modelo 1.....	80
4	Esquema da rede do projeto do exemplo n° 2.....	86
5	Pressão operacional dos aspersores do modelo 2.....	88
6	Esquema da rede do projeto do exemplo n° 3.....	93
7	Pressão operacional dos aspersores do modelo 3.....	97

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0, A_1, A_2, A_3$	= coeficientes da equação da bomba;
$A_{ur}$	= área da unidade de rega ( $m^2$ );
$A_t$	= área total ( $m^2$ );
$C$	= coeficiente de Hazen-Williams;
$CFA$	= custo fixo anual (R\$);
$C_1$	= valor do investimento (R\$);
$Chf$	= custo anual da perda de carga (R\$);
$CCV$	= custo da energia (R\$);
$COD$	= consumo de óleo diesel (l/cv/hora);
$CT$	= custo total anual (R\$);
$D$	= diâmetro interno (m);
$D_b$	= diâmetro do bocal (mm);
$DN$	= diâmetro nominal (mm);
$DE$	= diâmetro externo (mm);
$DI$	= diâmetro interno (m);
$DEFA$	= rugosidade absoluta do tubo (m);

DW	= Darcy-Weisbach;
DDQ	= elemento de correção da vazão nos trechos ( $m^3/s$ );
DPV	= déficit de pressão de vapor (mca);
$E_a$	= espaçamento entre aspersores (m);
$E_l$	= espaçamento entre linhas laterais (m);
$E_{ca}$	= evaporação do tanque classe "A" (mm);
$f$	= coeficiente de atrito (adm);
F	= coeficiente de Christiansen;
FRC	= fator de recuperação de capital;
$f$	= fator de disponibilidade de água no solo;
$g$	= aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
GP	= grau de pulverização;
$h_r$	= perda de carga contínua que ocorre na tubulação dotada de múltiplas saídas (m);
$H_r$	= perda de carga na tubulação percorrida por uma vazão constante igual a inicial (m);
HFA	= horas trabalhadas no sistema (h/ano);
$h_{fp}$	= perda de carga na linha principal (mca);
$h_{fr}$	= perda de carga na tubulação de recalque (m);
$h_r$	= altura geométrica de recalque (m);
$h_{fs}$	= perda de carga na tubulação de sucção (mca);
$h_s$	= altura geométrica de sucção (m);
$h_{fl}$	= perda de carga localizada (mca);

$H_{man}$	= altura manométrica total (mca);
$h_{raiz}$	= profundidade do sistema radicular (cm);
$H_1$	= altura manométrica da bomba na vazão zero (m);
$H_2, H_3, H_4$	= altura manométrica da bomba na vazão DQ, 2DQ, 3DQ, respectivamente (m);
$H(N)$	= altura piezométrica no ponto (mca);
$I$	= número do elemento (trecho, bomba etc);
$IND$	= vetor;
$IND(I)$	= cada elemento do vetor;
$II$	= número do nó ou ponto conhecido da rede;
$IX$	= vetor;
$J_{trab}$	= jornada de trabalho (horas);
$KK$	= número de interações;
$K_c$	= coeficiente da cultura (adm);
$K_p$	= coeficiente do tanque classe "A";
$L$	= comprimento do trecho, ou tubulação (m);
$m, n$	= coeficientes que dependem das características da tubulação e do escoamento;
$N_b$	= potência necessária no eixo da bomba (cv);
$N_{P/D}$	= número de posições irrigadas por dia;
$N_{TP}$	= número total de posições;
$N_{PI}$	= número de trechos na rede;
$N_{PS}$	= número de trechos imaginários;

$N_{PU}$	= número de bombas no sistema;
$N_I$	= número de itens que compõem os anéis da rede;
$N_u$	= número de nós ou pontos de altura piezométrica conhecida;
NODES	= string;
$N$	= número do nó ou aspersor;
$N$	= número de saídas ao longo da tubulação;
$P$	= intensidade de aplicação de água (mm/h);
$P_s$	= pressão de operação (mca);
$P_{sc}$	= pressão de serviço do aspersor obtida no catálogo (mca);
$P_t$	= preço do metro de tubo (R\$);
PD	= perda por deriva (%);
PKH	= preço do quilowatt hora (R\$ / Kwh);
POD	= preço do óleo diesel (R\$/litro);
$P_{ih}$	= pressão necessária no início da lateral (mca);
$P_I$	= período de irrigação (dia);
$P_s$	= pseudo elemento;
$P_u$	= bomba no sistema;
$Q_s$	= vazão do aspersor ( $m^3/h$ );
$Q_{sc}$	= vazão do aspersor obtida no catálogo ( $m^3/h$ );
$Q$	= vazão na tubulação ( $m^3/s$ );
$Q_T$	= vazão fictícia ( $m^3/s$ );
$Q_J$	= vazão a jusante da tubulação ( $m^3/s$ );
$Q_m$	= vazão a montante da tubulação ( $m^3/s$ );

QT	= vazão total ( $m^3/s$ );
QQ	= vazão no trecho ( $m^3/s$ );
Q(I)	= vazão corrigida em cada trecho ( $m^3/s$ );
R	= valor de resgate do equipamento;
$\eta_b$	= rendimento da moto bomba (decimal);
SI	= sistema internacional de medidas;
TAJ	= taxa anual de juros (decimal);
$T_r$	= turno de rega (dia);
$T_I$	= tempo de irrigação (horas);
TOL	= tolerância desejada;
V	= velocidade de escoamento (m/s);
$V_a$	= velocidade de atrito (m/s);
v	= velocidade do vento (Km/h);
VUT	= vida útil do equipamento (ano);
$U_c$	= umidade no solo na capacidade de campo ( $cm^3/g$ );
$U_m$	= umidade no solo no ponto de murcha permanente ( $cm^3/g$ );
UR	= umidade relativa do ar (%);
$\mu$	= evapotranspiração diária da cultura (mm);
$\mu_0$	= evapotranspiração de referência (mm/dia);
$\lambda_I$	= irrigação total necessária (mm);
$\lambda_u$	= lâmina unitária (cm $H_2O/cm$ solo);
$\lambda_{disp}$	= lâmina total disponível no solo (mm);
$\lambda_{resp}$	= lâmina reposta em cada irrigação (mm);



- $\eta_a$  = eficiência de aplicação (decimal);
- $\delta_0$  = espessura da subcamada laminar (m);
- $\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s);
- $\tau_0$  = resistência da parede por unidade de área (Kg/m<sup>3</sup>);
- $\rho$  = massa específica do líquido (Kg/m<sup>3</sup>);
- $\rho_a$  = densidade aparente do solo (g/cm<sup>3</sup>);
- $\epsilon$  = tamanho da aspereza do tubo (mm);
- $\Delta Z_1$  = diferença de nível na linha lateral (m);
- $\xi$  = coeficiente de resistência ao escoamento.

## RESUMO

**GUIMARÃES, João Carlos. Modelo Matemático para Dimensionamento e Análise de Redes Hidráulicas de Irrigação por Aspersão Convencional. Lavras, UFLA, 1995 100p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola / Irrigação e Drenagem)\*.**

Um modelo matemático capaz de fazer o dimensionamento hidráulico de um sistema fixo de irrigação por aspersão convencional em redes de tubos na forma de circuito fechado é apresentado, de maneira a ser uma ferramenta eficiente para o balanceamento da distribuição de vazão e pressão em sistema de múltiplos elementos, permitindo simulações rápidas que podem resultar no emprego de diâmetros menores, de custos relativamente menor.

O modelo baseia-se no método Hardy-Cross, bastante empregado por engenheiros para o cálculo de abastecimento de água em redes públicas, com algumas modificações para análise dos movimentos laminares e turbulentos e o uso da equação de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga, recomendada para tubulações de quaisquer diâmetros e natureza de suas

---

\*Orientador: Eli Ferreira. Membros da Banca: Eli Ferreira, Alberto Colombo e Luiz Antônio Lima.

paredes, e para qualquer fluido Newtoniano, sob qualquer temperatura. O modelo foi testado, selecionando exemplos de projetos elaborados por técnicos da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais, dentro desta modalidade de projetos. Estes exemplos foram simulados no modelo e dos resultados obtidos pode-se concluir que este modelo matemático desenvolvido mostrou ser uma ferramenta eficiente para analisar muitos tipos de problemas de escoamento de líquidos em regime permanente que incorporam diferentes elementos, como bombas e redes de condutos, podendo ser empregado por técnicos para o cálculo de novos projetos.

## **SUMMARY**

### **MATHEMATICAL MODEL FOR DIMENSIONING AND AVALIATION OF HYDRAULICAL NETWORK OF SPRINKLER IN CONVENTIONAL IRRIGATION**

A mathematical model for calculating the hydraulics of a fixed system, in conventional sprinkler irrigation using pipe networks in closed circuits was developed, as a manner to be an effective tool for balancing outflow and pressure in multi-element systems, allowing fast simulations that can result into the employment of smaller diameters, of relatively lower costs.

The model is based upon the Hardy-Cross method, highly employed by engineers for the calculation of water supply in public networks, with some alterations for analysis of laminar and tubulent movements by using the Darcy-Weisbach equation for calculation of head loss, recommended for piping of any diameter and nature of their walls, and any newtonian fluid, under any temperature.

The model was tested, selecting examples of projects designed by technicians at the Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais, within this modality of projects. These examples were simulated in the model and from the results obtained, it can be concluded that the mathematical

model developed proved to be an efficient tool for analysing several problems of liquid flow under constant flow type which encompass different elements such as pumps and pipe networks. It can also be employed by technicians for calculating new projects.

## 1 INTRODUÇÃO

A irrigação, independente de como seja realizada, tem por objetivo levar a todos os pontos da área irrigada água em quantidade suficiente, em tempo oportuno e a um custo razoável.

Irrigação por aspersão é o método no qual a água (sob pressão adequada) é distribuída sob a forma de gotas, imitando a chuva, por intermédio de aspersores.

A aspersão é um dos métodos mais usados para irrigação, e essa preferência deve-se a fatores, como elevada uniformidade de distribuição da água, eficiência de irrigação, bom controle da água aplicada e adaptabilidade a diversas culturas, relevos e tipos de solos, bem como possibilidade de uso em culturas estabelecidas ou em fase de plantio.

O método de irrigação por aspersão pode empregar uma variedade de equipamentos, desde os mais simples como canos perfurados até os mais complexos como os sistemas mecanizados de funcionamento totalmente automatizados.

A aspersão é também o método de irrigação que consome mais energia por unidade de área, isto por causa da perda de carga nas tubulações, e da pressão necessária para funcionamento do aspersor.

A instalação de uma rede fixa de tubos enterrados em circuito fechado é uma alternativa de fácil manejo e baixo custo operacional para o sistema de irrigação por aspersão. Trata-se de uma contribuição valiosa proposta por Antunes e Mourthé (1991), e que interessa a todos que se dedicam ao planejamento de projetos de irrigação e especialmente aqueles que se preocupam em tornar o sistema de aspersão acessível a pequenos produtores.

Os autores adotaram para o cálculo hidráulico do sistema, a mesma metodologia utilizada para o dimensionamento da irrigação por aspersão convencional, usando a equação de Hazen Willians para o cálculo da perda de carga, indiferente do diâmetro da tubulação selecionada e do regime de escoamento existente. Estamos propondo um modelo para o cálculo hidráulico do sistema que leve em consideração o regime de escoamento do fluido na tubulação, com utilização da equação de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga.

O dimensionamento econômico da tubulação e das linhas de distribuição e recalque envolve uma solução por tentativa. o processo deve-se à solução implícita de um sistema de equações que requer correções a cada interação.

Nesta proposta, pressupõe-se que cada circuito será atendido por um único aspersor. Sendo o circuito fechado, a perda de carga na tubulação torna-se muito menor, por haver vazão nos dois trechos de tubulação que fluem ao aspersor. Esta disposição permite melhor distribuição da pressão no sistema, podendo permitir que os tubos sejam de diâmetro menor, as moto bombas também menores, assim como os cabos elétricos, mais finos e de menor custo.

O procedimento de cálculo empregado também pode ser aplicado em sistemas mais complexos, mesmo que demande mais tempo para investigar

todas as combinações de diâmetros e vazão, para maior equilíbrio na distribuição de água etc. Com o mesmo propósito de melhorar a distribuição de pressão e vazão, o método é bastante empregado por engenheiros para abastecimento de água em redes públicas. É óbvio que algumas restrições se aplicam e muitas condições devem ser observadas. Por exemplo, as redes laterais devem sempre atender a exigências de uniformidade de distribuição de água ao longo da tubulação e devem ser dimensionadas com no máximo dois diâmetros. Sendo assim, é preciso a adaptação dos procedimentos já existente para obter um modelo matemático que venha possibilitar o dimensionamento de tubulações em circuito fechado também em um sistema de irrigação por aspersão.

Levando-se em consideração o exposto, os objetivos deste trabalho foram:

-Apresentar um modelo matemático com a finalidade de dimensionar a rede hidráulica de sistemas de irrigação por aspersão em circuito fechado, utilizando tubos de pequenos diâmetros.

-Com a melhor distribuição de pressão sugerir, aos usuários da irrigação, alternativas para reduzir custos tais como redução no diâmetro da tubulação ou mesmo nos requerimentos energéticos de conjuntos moto bombas.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Considerações Gerais.

A irrigação é uma técnica absolutamente necessária para a implantação de uma agricultura racional de clima árido e semi-árido, em regiões como na Califórnia (EUA), Neguev (Israel), Ceres (República Sul Africana), Nordeste Brasileiro, etc; regiões onde a precipitação pluviométrica anual é insuficiente para suprir a demanda hídrica das culturas. A irrigação pode também ser uma técnica obrigatória em outras regiões, onde se faz necessária a complementação já que pode haver irregularidades nas chuvas. Neste caso, os totais anuais de precipitação pluviométrica são suficientes para satisfazer as necessidades hídricas das culturas, todavia a irregularidade da distribuição das chuvas, estações seca e úmida definidas, e ainda a ocorrência de veranicos, compromete o metabolismo das plantas, afetando seu desenvolvimento e conseqüentemente sua produção.

A irrigação suplementar aplicada sistematicamente, permite, além da melhoria na qualidade e na produtividade das safras, obter mais colheitas no mesmo ano, como é o caso do feijoeiro (três safras). Permite ainda a obtenção

de colheita fora da época normal (limão Taiti na entre safra) e a introdução de culturas não tradicionais (ameixa carmesim no planalto central).

A irrigação não é uma simples aplicação de água à cultura, é antes de tudo uma técnica altamente sofisticada que, para proporcionar bons resultados deve preencher os quesitos:

a) Projeto bem executado: computando-se todos os parâmetros de solo (topografia, natureza, capacidade de retenção de água, infiltração, etc), da planta (variedade, necessidade hídrica, tensão crítica, profundidade efetiva do sistema radicular, altura, espaçamento, ciclo vegetativo, etc) e da hidráulica do sistema (dimensionamento hidráulico de canalizações, canais, estações de recalque e captação) e da potencialidade da propriedade (recursos hídricos, recursos e incentivos financeiros, transportes, comercialização rede elétrica, etc).

b) Equipamento de boa qualidade: o equipamento de irrigação deve ter desempenho real idêntico ao citado nos catálogos, deve-se certificar da idoneidade da empresa, assistência técnica e facilidade de reposição;

c) Treinamento do irrigante, isto é, do operador do sistema de irrigação, de forma a transmitir-lhe a importância e os subsídios necessários à agricultura irrigada, a fim de que possa proceder a operação e a manutenção do sistema de forma adequada e eficiente;

d) Sistema de controle das aplicações de água: de forma a proceder perfeito manejo da irrigação aplicando-se lâminas hídricas corretas em

intervalos certos. Dessa forma, estabelece-se durante o andamento da cultura, quando e quanto irrigar.

## 2.2 Métodos de Irrigação.

Os métodos de irrigação podem ser divididos em pressurizados e não pressurizados. Nos métodos de irrigação pressurizados, a água é conduzida em tubulações sob pressão superior à atmosférica, até o ponto de aplicação. Estão incluídos nesta categoria os métodos de irrigação por aspersão, em que a água é aspergida na atmosfera, caindo em forma de chuva artificial, e os métodos de irrigação localizada em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular com baixa intensidade e alta frequência (Soares, 1991).

Denomina-se Aspersão Convencional, o sistema básico de irrigação por aspersão constituído de tubulações leves, de engate rápido, sobre as quais são montados os aspersores. É a partir deste sistema, através de adaptações e melhorias que se desenvolveram todos os outros sistemas de irrigação por aspersão.

A expansão do uso deste tipo de irrigação, associada ao grande número de fabricantes que atuam nesta faixa de mercado, tem permitido um grande número de variações no esquema adaptando-se as mais diferentes situações de campo, difíceis até de se listar.

Bernardo (1982) apresenta uma classificação em que os sistemas de irrigação por aspersão são classificados em móveis e fixos, dividindo os

sistemas móveis em dois grupos, os de movimentação manual e os de movimentação mecânica. Os sistemas fixos, são divididos fixo-portátil e fixo-permanente. Para cada um dos sistemas cita-se, diversos subsistemas normalmente usados na irrigação.

Os sistemas de irrigação por aspersão do tipo convencional (portátil e semiportátil) são os mais usados no Brasil, pois requerem menor investimento de capital, apesar de exigir mais mão-de-obra no manejo da irrigação. Para minimizar o seu custo por unidade de área, o sistema deve ser projetado para trabalhar o maior número de horas possível por dia (Bernardo, 1982 e Soares, 1991).

### 2.3 Método de Irrigação por Aspersão.

No dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão (aspersores, linha principal, linhas laterais e conjunto moto bomba), é necessário que se conheçam as características hidráulicas das tubulações, conexões e aspersores, em especial das relações existentes entre perda de carga, diâmetro e rugosidade da tubulação, e da relação pressão-vazão e perfil de distribuição dos aspersores.

O vento, a umidade relativa do ar e a temperatura são segundo Bernardo (1982), os principais elementos climáticos que afetam o uso da irrigação por aspersão. O vento afeta o perfil de distribuição de água dos aspersores e, juntamente com a temperatura e a umidade relativa do ar, afetam

a perda de água por evaporação. Quanto maior for a velocidade do vento e menor o diâmetro das gotas d'água, menor será a uniformidade de aplicação.

A uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão, foi estudado pela primeira vez por Christiansen (1942), procurando determinar o efeito da pressão de serviço, do diâmetro do bocal, do espaçamento entre aspersores e da velocidade do vento sobre a distribuição da água, estabelecendo o parâmetro conhecido como coeficiente de uniformidade de Christiansen:

$$CUC = \left[ 1 - \frac{\sum |x_i - \bar{X}|}{n\bar{X}} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

em que:

CUC - coeficiente de uniformidade, (%);

$x_i$  - precipitação no pluviômetro de ordem  $i$ , (mm);

$\bar{X}$  - média aritmética das precipitações, (mm); e

$n$  - número de pluviômetros.

O Serviço de Conservação de solos dos Estados Unidos propôs um índice de uniformidade (ou eficiência padrão de Criddle), que considera a média de 25% dos menores valores de precipitação em relação à média total;

$$CUD = \frac{\bar{x}}{\bar{X}} \quad (2)$$

em que:

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, (%); e

$\bar{x}$  - média de 25% do total de pluviômetros com as menores precipitações, (mm)

Na irrigação por aspersão, a uniformidade de aplicação de água é afetada pela diferença na vazão dos aspersores situados ao longo da linha lateral e em diferentes laterais, pelo perfil de distribuição do aspersor e também pela uniformidade da precipitação dentro da área efetiva irrigada por cada aspersor. Para uso eficiente da água, o volume total perdido não deve ultrapassar de 10 a 15% do total que flui do sistema (Ribeiro, 1982; Paz, 1990).

Corry, citado por Olitta (1984), afirma que o valor do coeficiente de uniformidade de Christiansen é o parâmetro estatístico mais comum para a avaliação do sistema de aspersão, e 80%, é o valor mínimo aceitável para o desempenho normal do sistema.

Merriam, Keller e Alfaro (1973), afirmam que para culturas de alto rendimento econômico, com sistema radicular raso, o sistema de aspersão deve apresentar alta uniformidade de distribuição, geralmente com CUD acima de 80%. e que para cultivos com sistema radicular médio, CUD pode variar de 70% a 80%. No caso de árvores frutíferas e culturas com sistema radicular profundo, em que a irrigação é suplementar, a uniformidade mais econômica (CUD) pode variar de 50 a 70%.

O coeficiente de uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão, é afetado pelo espaçamento entre aspersores, pela

relação entre pressão e diâmetro do bocal e pelas condições de vento. Uma combinação ideal entre esses fatores resultará numa boa uniformidade.

Segundo Ribeiro (1982), o vento é o fator climático responsável pelas maiores variações na uniformidade de aplicação de água. A sua velocidade tem um papel importante na eficiência do sistema, enquanto sua direção deve ser levada em consideração para o posicionamento das linhas laterais.

Bernardo (1982) afirma que regiões sujeitas a ventos acima de 4 m/s, a perda por evaporação e arrastamento pelo vento pode chegar a 30% ou mais, e que essas perdas são inversamente proporcionais à duração da irrigação.

De acordo com Daker (1970) e Christiansen e Davis (1976), a perda por evaporação na irrigação por aspersão depende da temperatura e umidade relativa do ar, vento e tamanho das gotas provenientes do fracionamento do jato de água. Esta perda pode ser estimada entre 2 a 8% da vazão total do aspersor.

Segundo Cuenca (1989) o tamanho das gotas também influenciam nas perdas por deriva, e esta perda pode ser calculada pela Equação:

$$PD = \left[ \frac{1,98}{D_b^{0,72}} + 0,937 \cdot DPV^{0,63} + 0,0052 \cdot P_a^{1,16} + 0,057 \cdot v^{0,7} \right]^{4,2} \quad (3)$$

em que:

PD = perda por deriva em, (%)

$D_b$  = diâmetro do bocal em, (mm)

$P_a$  = pressão de operação em, (mca)

$v$  = velocidade do vento em, (Km/h)

DPV = déficit de pressão de vapor em, (mca)

$$DPV = 0,061 \left[ \frac{100 - UR}{100} \right] \exp \left[ \frac{17,27}{T + 237,3} \right] \quad (4)$$

em que:

UR = umidade relativa do ar em, (%)

T = temperatura em, ( $^{\circ}$ C)

Bernardo (1982) propõe o parâmetro eficiência de aplicação em potencial ( $E_{ap}$ ) como sendo a razão entre o volume de água que chega ao solo e o volume que deixa o aspersor, durante uma irrigação. Esse parâmetro reflete as perdas por evaporação e por arrastamento pelo vento.

Keller e Bliesner (1990) definiram um parâmetro que considera as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento e a uniformidade de aplicação de água, que indiretamente refletem as perdas por percolação, segundo a Equação;

$$E_q = CUD \cdot E_c \cdot E_{ap} \quad (5)$$

em que:

$E_q$  - eficiência do menor quartil, decimal; e

$E_c$  - eficiência de condução, decimal.

Segundo os autores, ao utilizar esse parâmetro, o engenheiro garante que, aproximadamente, 90% da área receberá uma lâmina de irrigação maior ou igual à lamina real necessária. Portanto, recomendam o uso desse parâmetro somente quando a cultura a ser irrigada é de alto valor comercial. Para o caso de culturas de baixo valor comercial, pode-se trabalhar com 80% da área



recebendo uma lâmina de irrigação maior ou igual a lâmina necessária, utilizando-se o parâmetro definido pela Equação;

$$E_m = CUC \cdot E_c \cdot E_{ap} \quad (6)$$

em que:

$E_m$  = a eficiência da menor mediana, decimal.

#### 2.4 Aspensor.

A vazão do aspensor é função do diâmetro do bocal e da pressão de operação ou pressão de serviço. A faixa de pressão, na qual o perfil de distribuição é considerado adequado, é diferente para os vários tipos de aspersores e diâmetros de bocal existentes (Oliveira, 1991). Segundo Pair et al (1983), a pressão de serviço dos aspersores varia de 70 a 900 kPa (7,136 a 91,743 mca). A maioria dos aspersores usados no campo estão na faixa de pressão intermediária desses valores. No entanto, o aumento do custo de energia tem determinado a escolha de aspersores de menor pressão.

De acordo com Bernardo (1982), os aspersores existentes no mercado podem ser agrupados, para fins de classificação, em função da pressão de operação:

a) aspersores de pressão de operação muito baixa, trabalham com pressão variando entre 40 e 100 kPa (4,077 e 10,194 mca), e possuem pequeno raio de alcance;

b) aspersores de pressão de operação baixa, trabalham com pressão variando entre 100 e 200 kPa (10,194 e 20,387 mca), com raio de alcance atingindo entre 6 e 12 m;

c) aspersores de pressão de operação média, trabalham com pressão variando entre 200 e 400 kPa (20,387 e 40,775 mca), e raio de ação o atinge 12 e 36 m; e

d) aspersores gigantes ou canhão hidráulico, dentro dessa categoria existem os aspersores de médio e de longo alcance. Os de médio alcance trabalham com pressão variando de 400 a 800 kPa (40,775 a 81,549 mca), e possuem um raio de alcance entre 30 e 60 m. Os de longo alcance trabalham com pressão variando entre 500 e 1000 kPa (50,968 e 101,937 mca ), e possuem um raio de alcance entre 40 e 80 m.

Na escolha da taxa de aplicação de água dos aspersores, é critério básico que a intensidade de aplicação seja igual ou menor que a velocidade de infiltração básica determinada pelo teste de infiltração. Leme (1987) ressalta que a seleção do aspersor, com base nesse critério, fornece boa margem de segurança na prevenção do escoamento superficial sobre o terreno, mas, geralmente, desconsidera o intervalo de tempo em que o solo teria condições de receber uma intensidade de aplicação ainda mais elevada.

De acordo com Finkel (1982), a combinação de pressão e diâmetro do bocal determina a formação de tamanhos de gota e sua distribuição sobre a área molhada. Fixando-se o diâmetro do bocal, um aumento da pressão provoca acréscimo da velocidade do jato e maior velocidade relativa entre a água e o ar,

resultando em número maior de gotas pequenas. Por outro lado, fixando-se a pressão, um aumento do diâmetro do bocal reduz a velocidade, ocasionando gotas maiores. Na ausência de vento, as gotas maiores caem mais distantes, enquanto as gotas menores, possuindo maior área específica, sofrem maior resistência do ar e, por isso, caem próximo do aspersor.

Segundo Arruda (1981), a irrigação por aspersão oferece determinadas vantagens em relação aos outros sistemas de irrigação, por ser um método flexível para a aplicação de água no solo quanto à intensidade e ao tempo de aplicação. A intensidade de aplicação de água pode ser ajustada, para cada tipo específico de solo, por seleção do diâmetro do bocal, pressão de operação e espaçamento entre aspersores.

Bernardo (1982) e Soares (1991) mencionam que a intensidade de aplicação do aspersor pode ser modificada para satisfazer ao projeto, modificando-se a vazão, conforme a Equação:

$$P = \frac{1000.Qa}{Ea.El} \quad (7)$$

em que:

P - intensidade de aplicação de água, mm/h;

Qa - vazão do aspersor, m<sup>3</sup>/h;

Ea - espaçamento entre aspersores, m; e

El - espaçamento entre linhas laterais, m.

A vazão do aspersor é proporcional à raiz quadrada da pressão de operação, portanto, pode-se determinar a nova pressão de operação com a utilização da Equação.

$$P_a = \left( \frac{Q_a}{Q_{ac}} \right)^2 \cdot P_{ac} \quad ( 8 )$$

em que:

$Q_{ac}$  - vazão do aspersor obtida no catálogo, ( $m^3/h$ ); e

$P_{ac}$  - pressão de serviço do aspersor recomendada pelo fabricante, (mca).

## 2.5 Tubulações.

A condução de água num sistema de irrigação por aspersão pode ser feita em tubulações de diferentes materiais e diâmetros. As indústrias de tubulações oferecem um grande número de opções na área de irrigação, cabendo ao projetista escolher as mais adequadas. São encontrados os seguintes materiais de tubulações à disposição no comércio: aço zincado, PVC, alumínio, polietileno, ferro fundido, fibrocimento, etc.

O processo de escolha da tubulação a ser adquirida é influenciado por diversos fatores, como perda de carga, preço e material da tubulação, existência do diâmetro no mercado, pressão de serviço, peso e durabilidade da tubulação (Mantovani, 1989).

## 2.6 Perda de Carga Contínua.

Kamand (1988) enfatiza que o conhecimento da perda de carga é um fator importante no dimensionamento do diâmetro da tubulação, das características da moto bomba e também no balanço hidráulico de uma rede.

Alerta para o fato de todas as equações de perda de carga trazerem a incerteza da estimativa da rugosidade das paredes internas da tubulação. Quando um coeficiente de atrito é usado, diferentes equações estimam diferentes perdas de carga dependendo do diâmetro e vazão. Dessa maneira, quando se usa equações empíricas, como Hazen-Williams, Manning, e Scobey, para determinar a perda de carga, um fator de rugosidade único é assumido para todos os diâmetros e velocidade de escoamento. Tal suposição é a maior limitação de tais equações.

O mesmo autor apresenta um estudo comparativo entre coeficientes de atrito calculados por Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning, e conclui que o resultado das equações empíricas pode diferenciar significativamente dos resultados obtidos através de Darcy-Weisbach, onde o coeficiente de atrito varia de acordo com as condições de escoamento.

Assim o emprego da Equação de Darcy-Weisbach é recomendada por vários autores, como Assy (1977), Bernuth e Wilson (1989) e também pela ABNT (1977), em sua NB-591.

As várias fórmulas empíricas propostas para descrever a perda de carga contínua que ocorre em uma tubulação podem ser representadas, todas elas, pela forma genérica:

$$h_f = L \cdot \frac{V^m}{D^n} \quad (9)$$

$h_f$  = perda de carga contínua, (m);

$L$  = comprimento da tubulação, (m); e

$m, n$ , = coeficiente que dependem das características da tubulação e do escoamento.

$V$  = velocidade de escoamento em, (mm)

$D$  = diâmetro interno em, (m)

Humpherys e Lauritzen (1962), afirmam que o valor de  $m$  para escoamento laminar é igual à unidade e, para escoamento turbulento,  $m$  varia entre 1,7 para condutos hidraulicamente lisos e 2,0 para condutos hidraulicamente rugosos. Afirmam também, que o valor de  $n$  é igual a 2,0 para escoamento laminar e, para regime de escoamento turbulento,  $n$  varia de 1,0 a aproximadamente 1,3.

Dentre as fórmulas utilizadas para o cálculo da perda de carga contínua em uma tubulação, destacam-se:

a) Fórmula de Hazen-Williams, recomendada para tubulações de diferentes materiais, com diâmetro interno igual ou acima de 50 mm:

$$h_f = \frac{10,641Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \cdot L = \frac{6,806V^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{1,17}} \cdot L \quad (10)$$

em que:

$Q$  = vazão que escoar na tubulação, ( $m^3/s$ ); e

$C$  = coeficiente, função da natureza das paredes da tubulação.

b) Fórmula Universal ou de Darcy-Weisbach, recomendada para tubulações de quaisquer diâmetros e natureza de suas paredes e para qualquer fluido Newtoniano sob qualquer temperatura:

$$h_f = f \cdot \frac{LV^2}{D \cdot 2g} \quad (11)$$

em que:

$f$  = coeficiente de atrito, adimensional;

$g$  = aceleração da gravidade em, ( $m/s^2$ ).

O coeficiente de atrito da fórmula Universal é função de características da tubulação, do fluido que a percorre e do regime de escoamento. Em condutos circulares, para número de Reynolds até  $2 \times 10^3$ , onde o regime é laminar, o coeficiente  $f$  da fórmula de Darcy-Weisbach depende exclusivamente das propriedades do líquido e da velocidade do escoamento, sendo a perda de carga independente do material de que é feita a canalização.

Atualmente a rugosidade é caracterizada pelo tamanho  $\epsilon$  das asperezas da parede que se projeta para o interior do conduto. Define-se o grau de rugosidade pela rugosidade relativa, que é a relação entre o tamanho das asperezas e o raio ou, e o diâmetro do conduto.

A hipótese de Prandtl, é que junto as paredes se forma uma película de líquido onde o movimento é laminar (subcamada laminar), seguindo-se a zona do movimento turbulento; a espessura da subcamada laminar é dada pela fórmula:

$$\frac{V_* \cdot \delta_0}{\nu} = 5 \quad (12)$$

onde:

$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  é a velocidade de atrito (m/s);

$\delta_0$  é a espessura da sub camada laminar (m);

$\nu$  é a viscosidade cinemática ( $m^2/s$ );

$\tau_0$  é a resistência da parede por unidade de área ( $Kgf/m^2$ );

$\rho$  é a massa específica do líquido ( $Kg/m^3$ ).

Como a espessura ( $\delta_0$ ) é pequena, praticamente todo o escoamento se dá na zona onde o movimento é turbulento.

Se o tamanho  $\epsilon$  das asperezas é menor que a espessura da subcamada laminar,  $\epsilon < \delta$  a mesma fica inteiramente coberta pela subcamada laminar e o conduto é considerado liso.

Deve-se notar que a espessura da subcamada laminar diminui com o aumento do número de Reynolds, e que um conduto pode ser liso para um fluido e rugoso para outro e que para um mesmo fluido pode ser liso nas baixas velocidades e rugoso nas maiores.

Nos condutos rugosos a condição da parede tem influência direta sobre a turbulência e, conseqüentemente, sobre a perda de carga.

Nos condutos rugosos devem-se distinguir três tipos de escoamento; um de transição, regime de conduto liso, e outro em que a turbulência é completa.

No regime de transição  $\delta < \epsilon < 14\delta$ , o coeficiente depende da natureza do líquido e do grau de rugosidade das paredes; nesse regime, apenas parte das asperezas atravessam a camada laminar e contribuem para a turbulência do movimento.

Em condição de completa turbulência, que ocorre quando  $\epsilon > 14\delta$  a espessura da camada laminar é tão pequena em relação ao tamanho das asperezas, que esta a perfura completamente e contribui portanto para manter e aumentar a turbulência. Segundo Nikuradse (1933), nesse regime o coeficiente "f" depende apenas da rugosidade relativa e independe do número de Reynolds.



O melhor critério para se determinar, se o regime de escoamento em uma tubulação é laminar ou turbulento, é através do numero de Reynolds( $\mathfrak{R}$ );

$$\mathfrak{R} < 2000 \text{ (Escoamento Laminar)} \quad (13)$$

$$2000 \leq \mathfrak{R} \leq 4000 \text{ (Escoamento Intermediário - Região Crítica)} \quad (14)$$

$$\mathfrak{R} > 4000 \text{ (Escoamento Turbulento)} \quad (15)$$

$$\frac{\mathfrak{R}\sqrt{f}}{D/\epsilon} < 14 \text{ (Escoamento Turbulento - Hidraulicamente Liso)} \quad (16)$$

$$\frac{\mathfrak{R}\sqrt{f}}{D/\epsilon} > 200 \text{ (Escoamento Turbulento - Hidraulicamente Rugoso)} \quad (17)$$

$$14 \leq \frac{\mathfrak{R}\sqrt{f}}{D/\epsilon} \leq 200 \text{ (Escoamento Turbulento - Hidraulicamente Misto)} \quad (18)$$

Para uma tubulação em regime de escoamento laminar, o valor do coeficiente de atrito pode ser determinado pela fórmula de Hagen-Poiseuille:

$$f = \frac{64}{\mathfrak{R}} \quad (19)$$

Para uma tubulação em regime de escoamento turbulento de parede lisa, o coeficiente de atrito pode ser determinado pela Equação de Von Karmam, (1934) e Prandtl (1952),

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{Log} \left( \frac{2,51}{\mathfrak{R}\sqrt{f}} \right) \quad (20)$$

Também para uma tubulação em regime de escoamento turbulento de parede lisa, o valor do coeficiente de atrito pode ser determinado pela fórmula de Blasius válida para números de Reynolds até  $1 \times 10^5$ :

$$f = 0,316\mathfrak{R}^{-0,25} \quad (21)$$

Para uma tubulação em regime de escoamento turbulento hidraulicamente rugoso o valor do coeficiente de atrito pode ser determinado pela Equação proposta por Nikuradse (1933),

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{Log} \left( \frac{\epsilon/D}{3,71} \right) \quad (22)$$

De um modo geral, o cálculo do coeficiente de atrito no regime de escoamento turbulento pode ser feito pela Equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{f^{0,5}} = 1,74 - 2 \text{Log} \left[ \frac{18,7}{\text{Re} \cdot f^{0,5}} + 2 \frac{\epsilon}{D} \right] \quad (23)$$

em que:

$\epsilon$  = rugosidade das paredes da tubulação, expressa a altura média das saliências das paredes, (m); e

$\epsilon/D$  = parâmetro adimensional, denominado rugosidade relativa da tubulação.

Swamee e Jain, (1976) propõem equações explícitas do fator "f" da fórmula Universal para escoamento turbulento:

-Para Regime Turbulento-Hidraulicamente Liso;

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (24)$$

-Para Regime Turbulento-Hidraulicamente Rugoso;

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{\epsilon}{3,7D} \right) \right]^2} \quad (25)$$

-Equação explicitada do fator "f" para Regime Turbulento-Hidraulicamente Misto;

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (26)$$

Segundo os autores, a comparação da Equação 24, proposta com a Equação de Colebrook White (21), mostrou que o erro da estimativa de  $f$ , fica na faixa de 1%, para  $10^{-6} \leq \epsilon/D < 10^{-2}$  é número de Reynolds compreendido entre  $5 \times 10^3 \leq \Re \leq 10^8$ .

Para uma estimativa do coeficiente de atrito, pode-se também usar o diagrama de Moody citado por Azevedo Netto (1985), que fornece o valor deste coeficiente em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação.

Segundo King (1957), a tendência é generalizar o emprego de fórmulas com base racional, como as de Prandtl (1952), Von Karmam (1934) e Nikuradse (1933), e sobretudo a de Colebrook (ca. 1939). A objeção ao emprego dessas fórmulas provém da dificuldade da determinação da rugosidade absoluta  $\epsilon$  que nas condições reais varia muito; e não é possível estabelecer regras definidas para o seu valor. A determinação da rugosidade pode ser feita pela observação direta do tamanho " $\epsilon$ " das asperezas (pôr exemplo, por meio do perfilômetro, que permite medir com precisão o tamanho da partícula), mesmo indiretamente, determinando as perdas de carga e, através das fórmulas, o grau de rugosidade das paredes.

Além da rugosidade própria do material deve-se levar em conta o grau de deterioração do conduto com a idade, com a natureza e as propriedades do líquido que nela escoar, os condutos envelhecem.

Conforme a sua composição, as águas podem não só atacar as paredes da canalização, como provocar a formação de incrustações, que gradativamente aumentam com o tempo de serviço.

Ao projetar uma canalização deve-se levar em conta esse fenômeno, porque a capacidade de descarga diminui com a idade, em consequência do aumento da rugosidade que, evidentemente acarreta o aumento da perda de carga. Os tubos de pequeno diâmetro deterioram-se com maior facilidade devido ao maior efeito da resistência da parede e a rápida diminuição da seção da vazão, em consequência da formação de incrustações.

Para tubos de PVC, a rugosidade absoluta destes segundo Bernuth e Wilson (1989), tem os seguintes valores em função dos diâmetros;

**TABELA 1. Rugosidade absoluta para tubos de PVC, segundo Bernuth e Wilson (1989).**

DI (mm)	$\epsilon$ (mm)
17,6	0,001
15,6	0,002
26,2	0,001

Albertson, Barton e Simons (1960) citam valores da rugosidade absolutas para tubos de PVC variando de 0,003 a 0,03 mm. Bastos (1983) apresenta valores da rugosidade absoluta para tubos de PVC, variando de 0,009 a 0,050 mm e cita como mais usual 0,015 mm.

Segundo King (1957), o envelhecimento dos condutos não obedece a regras definidas e esse fenômeno é considerado nas fórmulas empíricas através do valor de seus coeficientes. Uma vantagem da fórmula de Hazen-Williams é a de permitir a comparação da capacidade do conduto em diferentes épocas, conforme se verifica pela tabela de registro que reúne os resultados de diferentes observações. Esta variação depende enormemente da qualidade da água e do regime de escoamento.

**TABELA 2. Variação do Coeficiente C de Hazen-Williams com tempo de uso do conduto, para tubos de ferro fundido, segundo King 1957.**

Tempo de Serviço do Conduto	Valor de C	Capacidade Percentual (%)
novas	130	100
10 anos	106	86
20 anos	88	76
30 anos	75	69
40 anos	64	63
50 anos	56	38

c) Fórmula de Flamant, recomendada para tubos plásticos, com diâmetro entre 1/2" (12,7 mm) e 4" (200 mm), conduzindo água fria; segundo Assy (1977):

$$h_f = 0,000859 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \cdot L = 0,000563 \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}} \cdot L \quad (27)$$

Esta fórmula é utilizada para o cálculo da perda de carga contínua em tubulações de redes de distribuição das instalações hidráulicas prediais.

d) **Fórmula de Fair-Whipple-Hsiao**, recomendada pela ABNT (1977) para o cálculo das redes de distribuição das instalações hidráulicas prediais, para tubos de cobre ou latão com diâmetros entre 1/2" e 4", conduzindo água fria:

$$h_f = 0,000859 \frac{Q^{1,754}}{D^{4,754}} \cdot L = 0,000563 \frac{V^{1,754}}{D^{1,246}} \cdot L \quad ( 28 )$$

Urbina, citado por Bezdek e Solomon (1978), afirma que a fórmula universal é mais precisa do que a de Hazen-Williams para o cálculo da perda de carga contínua em tubulações de plástico de pequeno diâmetro.

Howell e Barinas (1980), calcularam a perda de carga contínua em linha lateral de polietileno com 25 mm de diâmetro nominal, conduzindo água a 24°C, para número de Reynolds entre  $3 \times 10^3$  e  $1 \times 10^5$ , usando a fórmula de Hazen-Williams e a Universal. Nestas condições, fazendo  $C = 150$  e determinando o coeficiente de atrito (f) pela fórmula de Blasius verificaram não haver diferenças significativas entre os resultados obtidos com o uso destas duas fórmulas, até um número de Reynolds igual a  $5 \times 10^4$ , correspondente a uma vazão de  $9,72 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Segundo Assy (1977), a fórmula de Hazen-Williams ajusta-se bem a condutos hidraulicamente lisos, para números de Reynolds maiores do que  $5 \times 10^5$ ; nesta situação, o coeficiente C assume valor sensivelmente constante da ordem de 158. Em outras situações, o valor de C é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação.

Para tubulações de polietileno, de diâmetros nominais entre 3/8" e 1/2", operando com escoamentos com números de Reynolds entre  $4 \times 10^3$  e  $2 \times 10^4$ , o valor médio para o coeficiente C é igual a 144 (Oliveira et al, 1979).

King, Wisler e Woobuen (1945), apontam como um dos inconvenientes da fórmula Universal o fato de o expoente da velocidade nesta ser igual a 2,0, quando na verdade a perda de carga no regime turbulento varia com uma potência da velocidade entre 1,7 e 2,0. Outro inconveniente é o fato de que as experiências revelam que o expoente de D deve ser aproximadamente 1,25 e não 1,0.

As fórmulas propostas para o cálculo da perda de carga contínua que ocorre em uma tubulação consideram que esta é percorrida por uma vazão constante ao longo de todo o seu comprimento. Entretanto, como as linhas laterais ao longo de seu comprimento, são dotadas de saídas laterais com vazão decrescente, observa-se, como consequência, redução da perda de carga ao longo da tubulação.

Para calcular a perda de carga em tubulações com diâmetro único, com saídas laterais, Christiansen (1942), admitindo que as saídas são igualmente espaçadas, que a vazão em todas as saídas é a mesma e, ainda que a vazão no final da tubulação é nula, propôs um coeficiente dado pela Equação:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^{0,5}}{6N^2} \quad (29)$$

F = coeficiente de Christiansen;

m = coeficiente que depende das características da tubulação e do escoamento;

N = número de saídas ao longo da tubulação.

Este coeficiente foi proposto para o cálculo da perda de carga contínua em tubulações dotadas de saídas laterais, nas quais a distância entre o seu início e a primeira saída é igual ao espaçamento entre saídas. Esta perda de carga é então obtida, multiplicando-se por este coeficiente  $F$  a perda de carga contínua calculada ao se considerar que a tubulação é percorrida por vazão constante, igual à vazão inicial.

De acordo com Neves (1968), quando se tem distribuição de vazão em marcha ao longo de uma tubulação, para se determinar a perda de carga contínua que aí ocorre pode-se admitir uma distribuição linear de vazão ao longo desta tubulação, ou seja, a vazão que deixa a tubulação o faz contínua e uniformemente. Para se obter então a perda de carga contínua nesta tubulação, define-se uma vazão fictícia que percorrendo toda tubulação, origina a mesma perda de carga que ocorre na situação real. Função linear do primeiro grau do comprimento desta e adotando a fórmula Universal para o cálculo da perda de carga contínua, Garcez (1960), Neves (1968), Silvestre (1982), entre outros, apresentam equações que fornecem valores aproximados para a vazão fictícia, como, por exemplo:

$$Q_f = Q_j + 0.55 (Q_m - Q_j) \quad (30)$$

em que:

$Q_f$  = vazão fictícia, ( $m^3/s$ );

$Q_j$  = vazão a jusante da tubulação, ( $m^3/s$ ); e

$Q_m$  = vazão a montante da tubulação, ( $m^3/s$ ).

A vazão fictícia substituída na fórmula de perda de carga contínua, permite a determinação desta perda na tubulação com distribuição em marcha.



Azevedo Netto (1973) e Silvestre (1982), concluem também que, para o caso particular de uma tubulação com distribuição de vazão em marcha com vazão nula no seu final, admitindo-se a hipótese de que a vazão é descarregada contínua e uniformemente ao longo da tubulação e, ainda, usando-se a fórmula Universal, a perda de carga que aí ocorre é igual a um terço da que ocorreria, se toda a tubulação fosse percorrida por uma vazão constante, igual à vazão inicial.

Scaloppi (1986), admitindo que o número de saídas laterais na tubulação é infinito, que a vazão no final desta é nula e que a vazão descarregada ao longo da tubulação é uniforme chegou à conclusão de que:

$$h_f = H_f \frac{1}{(m+1)} \quad (31)$$

em que:

$h_f$  = perda de carga que ocorre na tubulação dotada de múltiplas saídas, (m)

$H_f$  = perda de carga que ocorreria na tubulação se esta fosse percorrida por uma vazão constante, igual à vazão inicial, (m)

O coeficiente  $1/(m+1)$  é o próprio coeficiente de Christiansen, quando o número de saídas laterais tende para o infinito. Para a fórmula Universal, este coeficiente é igual a  $1/3$ ; para as fórmulas de Hazen-Williams, de Flamant e de Fair-Whipple-Hsiao, este coeficiente assume os valores:  $1/2,85$ ;  $1/2,75$ ; e  $1/2,75$  respectivamente.

### 2.6.1 Perda de Carga Localizada.

Segundo Neves (1968), sempre que há mudanças de direção ou de grandeza da velocidade, há perda de carga decorrente da alteração das condições do movimento, a qual se adiciona a perda devido ao atrito. Tais perdas são denominadas singulares ou localizadas, e podem ser calculadas pela expressão;

$$h_f = \xi \cdot V^2 / 2g \quad (32)$$

Sendo  $\xi$ , um coeficiente próprio do elemento causador da perda (curvas, registros mudança de diâmetro etc) e  $V$ , a velocidade na canalização. O efeito de perdas singulares pode ser desprezado quando a velocidade da água é pequena ( $V < 1\text{m/s}$ ), e existir poucas peças e, em geral, quando o comprimento do conduto é de 500 a 1000 vezes o seu diâmetro, bastando assim considerar a perda por atrito, (perda contínua).

Nos cálculos de maior responsabilidade convém verificar a influência das perdas singulares que nos condutos de pequeno comprimento é prudente considera-las.

Alguns valores de  $\xi$  são apresentados por Neves (1968) para registros de gaveta e válvulas inteiramente aberto.

**TABELA 3. Coeficiente de resistência  $\xi$ , devido a brusca contração de seção, segundo Neves (1968)**

$A_2/A$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\xi$	0,624	0,632	0,643	0,659	0,681	0,712	0,755	0,813	0,892

**TABELA 4. Coeficiente de resistência  $\xi$ , devido a brusca contração de diâmetro, segundo Neves (1968)**

$D_2/D$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\xi$	0,50	0,48	0,45	0,42	0,38	0,30	0,25	0,15	0,10

**TABELA 5. Coeficiente de resistência  $\xi$ , para algumas peças, segundo Azevedo Netto (1985).**

<b>PEÇAS</b>	<b>VALORES DE <math>\xi</math></b>
Registros de gaveta aberto	0,20
Registro de globo aberto	10
Junção	1
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,40
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Válvula de retenção	2,50
Válvula de pé	1,75
Tê de passagem direta	0,60
Tê de saída de lado	1,30
Tê de saída bilateral	1,80
Redução gradual	0,15
Entrada normal/canalização	0,50
Regulador de Vazão	2,50
Hidrômetro de disco	3 a 15
Ampliação gradual	0,30
Medidor venturo (velocidade no estrangulador)	0,03 a 0,10
Medidor venturo (velocidade na seção maior)	2,50

**TABELA 6. Coeficiente de resistência  $\xi$  para algumas peças - diâmetro menor que 100 mm, segundo Lencastre (1972).**

PEÇAS	VALORES DE $\xi$
Válvula de retenção esférica	65
Válvula de retenção horizontal	8
Válvula de pé	15
Curva revessa de 90°	2,2
Curva de 90°	0,40
Cotovelo de raio longo (r/d=2 a 8)	0,25
Idem peças rosqueadas	0,50
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio normal	0,90
Cotovelo de 45°	0,40

**TABELA 7. Coeficientes de resistência  $\xi$  , para várias conexões, segundo Streeter e Wylie (1982).**

CONEXÕES	VALORES DE $\xi$
Válvula globo(totalmente aberta)	10,0
Válvula angular(totalmente aberta)	5,00
Válvula de retenção(totalmente aberta)	2,5
Válvula de gaveta(totalmente aberta)	0,19
Curva de raio curto	2,2
Tê comum	1,8
Cotovelo comum	0,9
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio longo	0,60

## 2.7 Linhas de Tubulações.

O conjunto de tubulações de um sistema de irrigação por aspersão constitui-se de linha principal, linhas secundárias que nem sempre existem) e linhas laterais ou de irrigação.

A linha principal conduz água da moto bomba até as linhas secundárias ou laterais, e geralmente são fixas. As linhas secundárias, quando existem, fazem a conexão entre as linhas principais e as laterais e, de modo geral, são fixas. As linhas laterais conduzem água das linhas principais ou secundárias até os aspersores, ou seja, são as linhas nas quais estão instalados os aspersores.

As linhas laterais devem, sempre que possível, trabalhar de forma rotativa em torno da linha principal, para minimizar a mão-de-obra e o custo da tubulação (Olitta (1984), Vargas (1990) e Soares (1991)).

No sistema de irrigação por tubos enterrados, utiliza-se de tubos de pequeno diâmetro, para não inviabilizar, economicamente o sistema.

O cálculo de tubulação obedece alguns critérios de dimensionamento. De um modo geral a variação de pressão ao longo da linha lateral é função da perda de carga e da diferença de nível não devendo ultrapassar 20% da pressão de operação média dos aspersores:

$$h_f < 0,20 \text{ Pa} - \Delta Z_1, \quad ( 33 )$$

em que  $\Delta Z_1$  é a diferença de nível na linha lateral, metros.

A diferença de nível na linha lateral deve apresentar valor positivo quando a linha estiver em aclave, e valor negativo, quando em declive.

$$\Delta Z_l = Z_{\text{final}} - Z_{\text{inicial}} \quad ( 34 )$$

Keller e Karmeli (1974) recomendam limitar as perdas na unidade operacional (lateral + distribuição) em 20%, sendo 11% na distribuição e 9% na lateral.

No dimensionamento de linhas laterais de irrigação por aspersão, é muito comum dividir as linhas em dois trechos de diâmetros diferentes, para economizar.

São três os critérios mais usados para o dimensionamento das linhas principais e secundárias de um sistema de irrigação por aspersão convencional: 1- dimensionamento baseado na velocidade média da água permitida ao longo da linha, 2- dimensionamento baseado na perda de carga preestabelecida entre a primeira e a última linha lateral, 3- o dimensionamento baseado na análise econômica. É muito importante lembrar que, independente do método a ser utilizado no dimensionamento, a velocidade em cada trecho deve ficar nos limites aceitáveis de 1,5 a 3,0 m/s (Bernardo (1982) e Keller, Bliesner (1990)).

### **2.7.1 Dimensionamento baseado na perda de carga preestabelecida entre a primeira e última linha lateral.**

Segundo Bernardo (1982), Este critério baseia-se em permitir uma perda de carga no trecho da linha lateral, de 15 a 20% da pressão de serviço

dos aspersores, o que, praticamente compreende uma perda de carga de 4 a 9 mca. Nesta perda de carga não está incluída a diferença de nível, ao longo da linha principal. Quando as condições topográficas em virtude da declividade impõem uma grande diferença de nível, ao longo da linha principal, faz-se necessário usar válvulas de controle de pressão ou registros no início das linhas laterais. Quando registros ou válvulas de controle de pressão são instalados no início das linhas laterais, pode-se permitir uma maior perda de carga na linha principal.

### 2.7.2 Dimensionamento baseado na análise econômica, método das tentativas.

Esse método usa como parâmetros, a análise de custos. Isso não quer dizer que, hidraulicamente, a linha não fique bem dimensionada. Sob o aspecto técnico, a seleção econômica das tubulações de um sistema de irrigação, deve receber tanta consideração quanto a solução hidráulica do problema, Bernardo (1982).

O método consiste basicamente, em calcular o custo anual total (custo fixo + custo anual variável) para cada trecho, usando vários diâmetros. Será escolhido o diâmetro que propicie o menor custo anual total.

Inicialmente, encontra-se o fator de recuperação de capital, da seguinte forma:

$$FRC = \frac{(1+TAJ)^{na} \cdot TAJ}{(1+TAJ)^{na} - 1} \quad ( 35 )$$

sendo:

FRC - fator de recuperação do capital;

TAJ - taxa anual de juros (decimal);

VUT - vida útil do equipamento.

Em seguida, calcula-se o custo fixo anual. A Equação original, é a seguinte:

$$CFA = (C_1 - R).FRC \quad (36)$$

sendo:

$C_1$  - valor do investimento;

R - valor de resgate do equipamento, ao final do período de vida útil.

Bernardo (1982) comenta que o valor de resgate do equipamento, para o caso de tubulações, normalmente é considerado como 10% do valor inicial. Mas como se está comparando diferentes diâmetros, pode-se, desprezar o valor de resgate.

Sendo assim, a Equação do custo fixo anual, ficará:

$$CFA = C . FRC \quad (37)$$

Como os cálculos são feitos para cada trecho, o valor do investimento "C" é o valor do metro de tubulação vezes o comprimento do trecho. Ficando a Equação do "CFA" da seguinte maneira:

$$CFA = Pt . L . FRC \quad (38)$$

sendo:

Pt - preço do metro de tubo do diâmetro escolhido (R\$);

L - comprimento do trecho (m);



Para o cálculo da perda de carga é usado a Equação 10, de Hazen-Williams. Ela é recomendada apenas para escoamento de água a temperatura ambiente e para diâmetros maiores ou iguais a 50 mm. Entretanto, dificilmente tem-se diâmetros inferiores a 50 mm na linha principal.

Em seguida, calcula-se o custo anual da perda de carga, com a seguinte Equação:

$$CHF = \frac{\gamma \cdot Q \cdot h_f \cdot (HFA) \cdot (CCV)}{75 \cdot \eta_b} \quad (39)$$

sendo:

CHF - custo anual da perda de carga (R\$);

HFA - horas de trabalho do sistema por ano (h/ano);

CCV - custo da energia (R\$/cv.hora);

$\eta_b$  - rendimento da moto bomba (decimal).

O custo da energia é calculado de duas maneiras, conforme a energia utilizada no motor. Se for elétrica, a Equação é a seguinte:

$$CCV = PKH \cdot 0,7357 \quad (40)$$

sendo:

PKH - preço do quilowatt hora (R\$/kwh).

Se for a diesel, a Equação é a seguinte:

$$CCV = POD \cdot COD \quad (41)$$

sendo:

POD - preço do óleo diesel (R\$/litro);

COD - consumo de óleo diesel (0,22 a 0,32)l/cv.hora.

Por último, calcula-se o custo total anual com a seguinte Equação:

$$CT = CFA + CHF \quad (42)$$

sendo:

CT - custo total anual, (R\$);

CFA - custo fixo anual, (R\$); e

Chf - custo anual da perda de carga, (R\$).

Todas essas equações, com exceção da "FRC", são calculadas para cada trecho, usando todos os diâmetros. Para cada trecho, será escolhido o diâmetro que obtenha o menor custo total anual.

## 2.8 Redes de Conduitos Forçados.

Segundo Epp e Fowler (1970) e Streeter (1982), os conduitos interligados, onde o escoamento em dado ponto pode vir de vários circuitos, são chamados redes de conduitos, similar às redes elétricas. Uma rede é vista como uma combinação de elementos interligados em nós.

Esses problemas são complicados e requer soluções por tentativas, onde os circuitos elementares são equilibrados em seqüência até que todas as condições sejam satisfeitas. As seguintes condições devem ser satisfeitas numa rede de conduitos:

- 1- A soma algébrica das quedas de pressões ao longo de cada trecho do circuito é a mesma;
- 2- A vazão que chega a um nó deve ser igual á vazão que saí;

A perda de carga deve ser satisfeita em cada conduto; isto é, uma relação específica entre perda de carga e vazão deve existir para cada conduto; Como não é prático resolver problemas de rede analiticamente, utilizam-se métodos de aproximação sucessiva. O método de Hardy-Cross admite vazões em cada conduto de modo que a Equação da continuidade seja satisfeita em todos os nós. Calcula-se uma correção na vazão em cada malha em seqüência até que se consiga um equilíbrio entre as malhas.

Perdas singulares são incluídas como comprimentos equivalentes de cada conduto ou calculadas pela Equação 32. Usualmente emprega-se fórmulas exponenciais, na forma de  $h_f = r.Q^n$ , onde  $r = R.L/D^n$ . O valor de  $r$  é uma constante para cada conduto (exceto quando se usa Equação de Darcy-Weisbach), sendo determinado antes de se iniciar o processo de balanceamento dos anéis.

### 2.8.1 Fundamentos do Método de Hardy-Cross.

Para um tubo qualquer no qual se admite uma vazão inicial  $Q_0$ ,

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (43)$$

onde  $Q$  é a vazão correta e  $\Delta Q$  é a correção. Então; para cada conduto,

$$h_f = rQ^n = r(Q_0 + \Delta Q)^n = r(Q_0^n + nQ_0^{n-1} \Delta Q + \dots) \quad (44)$$

Se  $\Delta Q$  é pequena em relação a  $Q_0$ , todos os termos da serie após o segundo podem ser desprezados. Para uma malha,

$$\sum h_f = \sum rQ[Q]^{n-1} = \sum rQ_0[Q_0]^{n-1} + \Delta Q \sum rn[Q_0]^{n-1} = 0 \quad (45)$$

onde  $\Delta Q$ , foi posto fora do sinal de somatório porque é o mesmo para todos os condutos da malha e o sinal de módulo foi usado para levar em conta o sentido de percurso do circuito.

A última Equação é resolvida em  $\Delta Q$  para cada malha da rede.

$$\Delta Q = \frac{\sum rQ_0|Q_0|^{n-1}}{\sum rn|Q_0|^{n-1}} \quad (46)$$

Quando  $\Delta Q$  é aplicada a cada trecho de uma malha, de acordo com a Eq. (43), o sentido de percurso é importante; isto é soma-se  $\Delta Q$  às vazões no sentido horário e subtraí-se das vazões no sentido anti-horário.

A seqüência de cálculo aritmético pode ser relacionada da seguinte maneira:

- 1- Admite-se a melhor distribuição de vazão que satisfaça a continuidade pelo exame cuidadoso da rede;
- 2- Para cada conduto de uma malha, calcula-se a perda de carga e obtém-se a soma  $\sum h_f = \sum rQ^n$ . Calcula-se também  $\sum rn[Q]^{n-1}$  para malha. O quociente indicado na Equação para o cálculo de  $\Delta Q$ , fornece a correção que é então somada algebricamente a cada uma das vazões da malha para corrigí-las;
- 3- Repetir na outra malha o processo de correção do número 2, continuar para todas as malhas;

4- Repetir os passos 2 e 3 quantas vezes for necessário até que as correções ( $\Delta Q$ 's) se tornem relativamente pequenos.

Os valores de  $r$  aparecem tanto no numerador como no denominador; portanto, valores proporcionais ao  $r$  verdadeiro podem ser usados para encontrar a distribuição. Analogamente, as vazões podem ser expressas como porcentagem das vazões verdadeiras.

Para achar uma perda de carga em particular, deve-se usar os valores reais de  $r$  e de,  $Q$  depois que se determinou a distribuição proporcional das vazões.

Existem vários métodos mais generalizados, baseados em esquemas de balanceamento dos anéis de Hardy-Cross ou de balanceamento dos nós. Nesses métodos o sistema é normalmente modelado por um sistema de equações simultâneas que são resolvidas pelo método numérico de Newton-Raphson.

Algumas soluções programadas são muito úteis como ferramenta de projeto, pois os diâmetros dos tubos ou sua rugosidade podem ser tratados como incógnitas além das pressões e vazões. Exemplos podem ser vistos em Epp e Fowler (1970) e Streeter (1982).

A altura manométrica do sistema pode ser determinada utilizando-se a Equação:

$$H_{man} = p_{IL} + h_{f_{LP}} + \Delta Z_{LP} + h_f + h_r + h_{f_s} + h_s + \sum h_{f_{loc}} \quad (47)$$

em que:

$H_{man}$  = altura manométrica, (mca);

$p_{IL}$  = pressão necessária no início da lateral, (mca);

$h_{f_{LP}}$  = perda de carga na linha principal, (mca);

- $\Delta Z_{LP}$  = diferença de nível na linha principal, (m);  
 $h_{fr}$  = perda de carga na tubulação de recalque, (mca);  
 $h_r$  = altura geométrica de recalque, (m);  
 $h_{fs}$  = perda de carga na tubulação de sucção, (mca);  
 $h_s$  = altura geométrica de sucção, (m); e  
 $h_{fl}$  = perda de carga localizada (mca).

A potência absorvida pela bomba, ou potência necessária no eixo da bomba ( $P_b$ ), pode ser determinado pela Equação:

$$N_b = \frac{\gamma \cdot Q_t \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta_b} \quad (48)$$

em que:

- $\gamma$  = peso específico do líquido, (Kgf/m<sup>3</sup>);  
 $N_b$  = potência necessária no eixo da bomba, (cv);  
 $\eta_b$  = rendimento da bomba (decimal);  
 $H_{man}$  = altura manométrica total, (mca); e  
 $Q_t$  = vazão total, (m<sup>3</sup>/s).

Se uma rede é alimentada por um bombeamento, de um reservatório ou de uma captação, deve-se conhecer as características da bomba. A bomba no sistema é considerada como componente de perda de carga negativa, igual ao aumento de carga que corresponde à vazão pelo elemento. A curva característica pressão x vazão da bomba pode ser representada segundo Streeter (1982) por uma Equação cúbica, tal como:

$$H = A_0 + A_1Q + A_2Q^2 + A_3Q^3 \quad (49)$$

onde  $A_0$  é a carga de vazão nula ("shutoff") da bomba.

O ajuste da curva da bomba e a determinação dos coeficientes:  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ , e  $A_3$  podem ser obtidos pelas equações:

$$A_3 = \frac{H_4 - 3(H_3 - H_2) - H_1}{6\Delta Q^3} \quad (50)$$

$$A_2 = \frac{H_3 - 2H_2 - H_1}{2\Delta Q^2} - 3A_3 \cdot \Delta Q \quad (51)$$

$$A_1 = \frac{H_2 - H_1}{\Delta Q} - A_2\Delta Q - A_3\Delta Q^2 \quad (52)$$



### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Modelo Matemático.**

Um modelo matemático foi apresentado com a finalidade de dimensionar sistemas de irrigação por aspersão em rede fixa de tubos enterrados, objetivando a minimização de custos e a otimização na utilização de equipamentos, além da satisfação dos requisitos técnicos.

O projeto na área deve obedecer critérios técnicos, que dependem do manejo, da topografia, da direção predominante dos ventos, da posição da estação de captação de água etc. Este deverá ser dimensionado de maneira a otimizar a solução técnica e econômica, em áreas que apresentem formas retangulares ou não e sistemas complexos de linhas de distribuição em rede fechada.



### 3.2 Dimensionamento do Sistema.

Os cálculos deste sistema segue em geral, os procedimentos para cálculo de projetos de aspersão convencional. A partir de dados referentes ao solo (capacidade de campo; ponto de murcha permanente; e massa específica aparente) e referentes à cultura e condições climáticas (evapotranspiração máxima, fator de disponibilidade, profundidade efetiva das raízes) etc, são então calculados a necessidade de água e o sistema de irrigação em três fases distintas:

#### 1ª - Fase - Cálculo de Água no Solo:

##### A) Disponibilidade total de água no solo ( $\lambda_u$ );

$$\lambda_u = (U_c - U_n) \cdot \rho_a \quad (53)$$

$\lambda_u$  = lâmina unitária (cm H<sub>2</sub>O/g solo)

$U_c$  = umidade do solo na capacidade de campo (cm<sup>3</sup> água/g solo seco);

$U_n$  = umidade do solo no ponto de murcha permanente (cm<sup>3</sup> água/g solo seco);

$\rho_a$  = densidade aparente do solo (g\cm<sup>3</sup>)

##### B) Capacidade total de água no solo;

$$\lambda_{disp} = \lambda_u \cdot h_{raiz} \quad (54)$$

sendo,

$\lambda_{disp}$  = capacidade total de água do solo (cm H<sub>2</sub>O)

$h_{raiz}$  = profundidade do sistema radicular (cm)

## C) Evapotranspiração de referência;

$$\mu_0 = KP \cdot Eca \quad (55)$$

sendo:

 $\mu_0$  = evapotranspiração de referência (mm)

KP = coeficiente do "tanque classe A" (Tabela 8)

Eca = evaporação do "tanque classe A" (mm)

TABELA 8. Coeficiente KP para tanque "classe A" para estimativa da evapotranspiração de referência, segundo Doorenbos e Pruitt (1977)

UR(% média Vento (Km/dia)	EXPOSIÇÃO A				EXPOSIÇÃO B			
	Tanque circundado por grama				Tanque circundado por solo nu			
	Posição do tanque R(m)*	Baixa < 40 %	Média 40-70 %	Alta > 70 %	Posição do tanque R(m)*	Baixa < 40 %	Média 40-70 %	Alta > 70 %
Leve < 175	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Moderado 175-425	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Forte 425-700	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,75
	100	0,60	0,65	0,75	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
Muito forte > 700	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Nota: Para extensas áreas de solo nu, reduzir os valores de  $K_p$  em 20%, em condições de alta temperatura e vento forte, e de 5 a 10% em condições de temperatura, vento e umidade moderados.

\*Por R(m), entende-se a menor distância(m) do centro do tanque ao limite da bordadura (grama ou solo nu).

**D) Evapotranspiração da Cultura;**

$$\mu = \mu_0 \cdot K_c \quad ( 56 )$$

sendo,

$\mu$  = Evapotranspiração da cultura, (mm)

$\mu_0$  = Evapotranspiração de referência, (mm)

$K_c$  = coeficiente da cultura, (adimensional)

A escolha do valor de  $K_c$  deve levar em conta as características da cultura, a época do plantio, a fase de desenvolvimento da cultura e as condições climáticas. Com relação a estas, a temperatura, vento e umidade do ar tem grande influência na taxa de transpiração.

**TABELA 9.** Coeficiente de cultura  $K_c$  correspondente a algumas culturas extensivas e de hortaliças, em diferentes fases de seu crescimento e segundo condições climáticas predominantes, segundo Doorenbos e Pruitt (1977).

Cultivo	Umidade Vento (m/seg)	U.R. min > 70%		U.R. min < 20%	
		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
	Fase de desenvol- vimento Inicial 1 Desenvolvimento 2 Reprodução 3 Maturação 4				
Feijão	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,3	0,3	0,25	0,25
Beterraba	3	1,0	1,0	1,05	1,1
	4	0,9	0,9	0,95	1,0
Cenoura	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,7	0,75	0,8	0,85
Mamona	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,5	0,5	0,5	0,5
Milho	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,55	0,55	0,6	0,6
Algodão	3	1,05	1,15	1,2	1,25
	4	0,65	0,65	0,65	0,7
Amendoim	3	0,95	1,0	1,05	1,1
	4	0,55	0,55	0,6	0,6
Cebola	3	0,95	0,95	1,05	1,1
	4	0,75	0,75	0,8	0,85
Batata	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,7	0,7	0,75	0,75

Nota: Para efeito de projeto utiliza o valor do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) da fase 3.

#### E) Água repostada em cada Irrigação;

$$\lambda_{rep} = \lambda_{disp} \times f \quad (57)$$

sendo,

$\lambda_{rep}$  = lâmina de água repostada em cada irrigação, (mm)

f = déficit de água no solo tolerado pela cultura, (fração)

**TABELA 10. Classificação das culturas em grupos para obtenção do fator de disponibilidade "f", segundo manual da TIGRE(1990).**

GRUPO	CULTURAS
1	pimentão, cebola, batata
2	banana, repolho, uva, ervilha, tomate
3	alfafa, feijão, citrus, abacaxi, amendoim, melancia, trigo
4	algodão, milho, sorgo, soja, cana, beterraba, fumo

**TABELA 11. Valores do fator "f" em função da evapotranspiração máxima diária em mm/dia, segundo manual da TIGRE (1990).**

GRUPO	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,43	0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,20	0,18
2	0,67	0,57	0,47	0,40	0,35	0,32	0,27	0,25	0,23
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,42	0,37	0,35	0,30
4	0,87	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,43	0,40

## 2ª - Fase - Cálculo do Sistema de Irrigação por Aspersão:

### D) Turno de Rega;

$$T_r = \lambda_{rep}/\mu \quad ( 58 )$$

onde,

$T_r$  = turno de rega (dias);

### E) Período de Irrigação ( $P_i$ );

O período de irrigação corresponde ao turno de rega, subtraindo de um dia, para manutenção do sistema. Casos em que o turno de rega é menor que cinco dias, o período de irrigação iguala-se ao turno de rega.

$$P_i = T_r - \text{folga (manutenção)} \quad ( 59 )$$

F) Irrigação total necessária;

$$\lambda_I = \lambda_{rep} / \eta_a \quad (60)$$

sendo:

$\eta_a$  = eficiência de aplicação, (decimal)

G) Seleção do Aspersor;

A precipitação do aspersor (P), pode ser calculada por;

$$P = \frac{1000 \cdot Q_a}{E_a \cdot E_l} \quad (61)$$

onde:

P = precipitação do aspersor (mm/h);

$E_a$  = espaçamento entre aspersor (m);

$E_l$  = espaçamento entre laterais (m);

Outros dados referentes à seleção do aspersor são: modelo; diâmetro do bocal; pressão de serviço e vazão. Deve ser selecionado aspersor um que tenha precipitação menor que  $I_b$  (capacidade de infiltração básica do solo), e no caso do sistema de rede fixa enterrada, tenha vazão de no máximo 0,556 l/s, preferencialmente de baixa pressão de serviço e que proporcione grau de pulverização adequado (GP), definido como a relação entre pressão de serviço e o diâmetro do bocal.

$$GP = \frac{PS}{D_{bocal}} \quad (62)$$

sendo:

GP = grau de pulverização

PS = pressão de serviço do aspersor, (mca)

$D_{\text{bocal}}$  = diâmetro do bocal, (mm)

**TABELA 12.** Classificação da chuva promovida por um aspersor, conforme o valor do Grau de pulverização (G.P), segundo manual da TIGRE (1990).

G.P	Plantas / cobertura	Classificação da Cobertura	Tipo de chuva
< 3.0	pastagem	insensível	grossa
3.1 - 5.0	cana, forragem	pouco sensível	semi-grossa
4.1 - 5,5	pomar	+/- sensível	semi-fina
5.1 - 6.0	feijão, flores	sensível	fina
> 6.0	hortaliças delicadas	muito sensível	finíssima

H) Tempo de funcionamento por dia;

É função do manejo, da mão de obra, ventos, custo da energia, leis trabalhistas. Para melhor funcionamento deste sistema, as condições ideais são alcançadas quando funciona no mínimo 20 horas, por dia.

I) Tempo de Irrigação da Unidade de Rega ( $T_I$ );

$$T_I = \lambda_I / P \quad ( 63 )$$

sendo:

P = taxa de precipitação do sistema de aspersão (mm/h).

Neste sistema, o tempo por posição caracteriza-se por ser mais longo, pelo fato da vazão ser muito restrita, para que as perdas de carga não comprometam o bom equilíbrio do sistema.

**J) Número de posições por dia:**

O tempo por posição relativamente longo, implica que as mudanças de posições dos aspersores serão de no máximo 2 vezes por dia, evitando o incomodo trabalho de trocas noturnas.

$$N_{P/D} = J_{\text{trab}} / T_I \quad ( 64 )$$

sendo:

$N_{P/D}$  = número de posições por dia

$J_{\text{trab}}$  = jornada de trabalho, (horas)

$T_I$  = tempo de irrigação, (horas)

**K) Número total de posição na área:**

$$N_{TP} = P_i \cdot N_{P/D} \quad ( 65 )$$

sendo:

$N_{TP}$  = número total de posição, (unidade)

$P_i$  = período de irrigação em, (dias)

**L) Área da Unidade de Rega:**

$$A_{UR} = A_T / N_{TP} \quad ( 66 )$$

sendo:

$A_{UR}$  = área da unidade de rega, ( $m^2$ )

$A_T$  = área total, ( $m^2$ )

**M) Número de aspersor por Unidade de rega ( $N_{aUR}$ ):**

$$N_{aUR} = A_{UR} / (E_a \cdot E_l) \quad ( 67 )$$

sendo:



$N_{aUR}$  = número de aspersor por unidade de rega;

$(E_a, E_l)$  = área efetiva coberta por um aspersor;

### 3ª - Fase - Cálculo Hidráulico do projeto - modelo matemático:

Definido o layout do projeto que melhor se aplica a área, às necessidades de água e aos dados técnicos da irrigação, executa-se então os cálculos hidráulicos do projeto procurando definir diâmetros da tubulação das linhas de recalque, distribuição e laterais em rede fixa enterrada, bem como a moto bomba necessária para alimentação do sistema se for o caso.

Neste processo emprega-se o modelo matemático adotado do método do Hardy-Cross, proposto por Streeter (1982), com algumas modificações para análise dos movimentos laminares e turbulentos, pela equação 11, de Darcy-Weisbach segundo a seguinte metodologia:

a) São definidos inicialmente os seguintes parâmetros:

O sistema de unidades a ser usado na análise, sendo definido pelo caracter SI ou si para o Sistema Internacional e EN para o sistema de unidade inglesa. Um número inteiro define o número máximo de interação admissíveis durante o balanceamento. Fixa-se uma tolerância aceitável para a soma dos valores absolutos das correções em cada anel durante cada interação. A viscosidade cinemática do líquido deve ser especificada quando se usa a equação 11, de Darcy-Weisbach para perdas nos condutos; sendo adotado para água a 20°C, o valor de  $1,03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Também um valor para rugosidade

absoluta da parede da tubulação pode ser fixado, ser for o mesmo para toda tubulação da rede.

**b) Entrada dos elementos:**

Os elementos que compõem a rede, são tubulações, bombas e elementos imaginários que são usados para criar pseudo anéis.

Os elementos de tubulação exigem a indicação do caracter DW ou dw, para indicar a equação para solução do problema, e o número de trechos que compõem a rede. Em seguida, cada trecho é numerado no máximo de 100, sem duplicação, e não necessariamente de modo consecutivo; e em linhas separadas são definidos para cada trecho a vazão estimada em função das necessidades do projeto em ( $m^3/s$ ); o comprimento em (metros); o diâmetro interno em (metros); (se o valor da aspereza não for usado) a rugosidade absoluta do tubo no trecho em (metros) devem ser indicados e em seguida o valor do somatório das singularidades que ocorrem no trecho para o cálculo da perda localizada. Na seleção dos diâmetros da tubulação nos trechos que compõem as linhas de distribuição e linhas laterais, o critério adotado é o baseado numa perda de carga preestabelecida entre a primeira e a última posição da linha de distribuição e lateral, admitindo-se uma perda de carga de 20% da pressão de serviço em todo sistema.

O elemento imaginário, ou trecho imaginário é usado quando se tem no sistema mais de uma altura piezométrica pré-fixada, sendo utilizado para criar circuitos imaginários que permitam incluir como incógnitas as vazões de entrada e saída nos pontos de captação e saídas de água (aspersores), para

satisfazer as condições de continuidade durante o balanceamento dos circuitos. Estes trechos imaginários interligam cada par de pontos de altura piezométrica fixa; não transportam fluido mas mantêm uma certa queda na linha de energia igual a diferença entre as alturas piezométricas. São definidos por um caracter PS para indicar seu tipo, o número do trecho, um zero ou branco para a vazão e uma diferença de altura piezométrica (cota do terreno + cota piezométrica) entre os níveis de carga de pressão fixadas dos nós interligados com queda de carga positiva. Este é um artifício usado para calcular a pressão necessária na bomba, para que o aspersor funcione com pressão recomendada no ponto de maior altura piezométrica.

Quando existem uma ou mais bombas no sistema, os elementos da bomba necessitam do caracter PU para indicar seu tipo, o número da bomba, a vazão estimada, o incremento de vazão  $\Delta Q$  entre os valores em que se especificam as cargas manométricas da bomba, e quatro valores da carga manométrica da curva característica, começando pela carga de vazão nula e mais três intervalos iguais de vazão  $\Delta Q$ . A curva característica da bomba passa a ser representada por uma equação cúbica (49), e seus coeficientes são determinados pelas equações (50, 51, e 52).

Uma série de valores inteiros identifica cada circuito seqüencialmente através do número de elementos existentes num circuito (máximo de 20), seguido do número de cada trecho no circuito com sinal negativo para indicar sentido anti-horário de escoamento e positivo para

sentido horário. Esta informação é repetida até que todos os circuitos da rede estejam definidos.

A indexação dos circuitos para balanceamento é feito por um vetor IND, o cálculo da perda de carga é feito utilizando a Equação (11) de Darcy-Weisbach, sendo a análise dos movimentos laminares e turbulentos pelas equações (equações, 13 a 18) para verificar qual regime de escoamento esta ocorrendo em cada trecho , em seguida em função do regime são aplicados as equações (24, 25 e 26) no cálculo do coeficiente de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach.

Em seguida os nós de altura piezométrica fixas (cota topográfica + cota piezométrica) são identificados; dando a quantidade de nós de altura piezométrica fixa existente na rede, seguido do caracter NODES, e a seguir declara o número do nó e sua altura piezométrica.

O caminho a ser percorrido no cálculo das alturas piezométricas que se deseja conhecer, como as pressões de trabalho dos aspersores e a altura manométrica da bomba, é feito por um vetor IX, partido do nó onde a carga é conhecida, seguido do número de um trecho contíguo e de seu nó terminal, observando que o número do trecho positivo, é usado para sentido de escoamento admitido, sendo que o número do trecho com sinal negativo é usado quando se percorre um trajeto em sentido contrário ao do escoamento admitido no trecho.

Qualquer percurso contínuo pode ser interrompido pela inserção de um zero, começando então um novo percurso com um novo nó inicial onde a

altura piezométrica já seja conhecida, um trecho, um nó etc; sendo então impressas todas as alturas piezométricas calculadas.

No balanceamento das alturas piezométricas é novamente repetido o processo de balanceamento dos anéis, onde a perda de carga é calculada pela Equação 11, de Darcy-Weisbach, e a análise dos movimentos laminares e turbulentos através das Equações (13 a 18) para verificação do regime de escoamento e coeficiente de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach calculado pelas equações (24, 25, 26).

O modelo matemático proposto pode ser melhor compreendido em duas grandes partes: a primeira realiza o balanceamento seqüencial de cada circuito da rede e, a seguir, repete os cálculos de modo iterativo até que a soma de todas as correções de vazão dos circuitos seja inferior a uma certa tolerância especificada. Ao final deste processo de balanceamento, as vazões nos trechos são ordenados e impressas, bem como o regime de escoamento que está ocorrendo em cada trecho. A segunda parte da análise envolve o cálculo das alturas piezométricas nos nós da rede que são os aspersores e bombas.

A preparação dos dados no modelo matemático é melhor visualizada pelos três módulos mostrados no algoritmo descrito abaixo, como também através do fluxograma e do programa computacional em seguida.

### 3.2.1 Algoritmo.

#### Algoritmo

```

Defina tipo das variáveis
Defina I, J, K, N, ITYPE, ELEM, IND, Q, H, S, IX,
      FLUXO, VEL, CPL
Declare
      TITLE      {titulo do projeto}
      TT         {sistema de unidade}
      KK         {número de interações}
      TOL        {tolerância desejada}
      VNU        {viscosidade cinemática}
      DEFA       {rugosidade absoluta}
Leia
      TITLE, TT, KK, TOL, VNU, DEFA
Imprima
      TITLE, TT, KK, TOL, VNU, DEFA
Declare
      NPI{número de trechos na rede}
      TT{equação de Darcy-Weisbach(DW)}
Leia
      NPI, TT
Fazer o valor I1 variar de um até o número de trechos
      da rede.
Declare
      I          {número do trecho}
      QQ         {vazão no trecho}
      L          {comprimento do trecho}
      D          {diâmetro do trecho}
      X3         {rugosidade absoluta}
      X4 . . .   {somatório das resistências no
                  trecho}
Leia
      I, QQ, L, D, X3, X4

Então se (X3) for = 0, fazer X3 = (DEFA)
Se TT = DW calcular as funções,
      E(KP)      = L/(2.G.D^5.0,7854^2){utilizada
                  para o cálculo da perda de
                  contínua}
      E(KP+1)    = 1/(0.7854.D.VNU)      {utilizada
                  para o cálculo do n° de Reynolds}

```

$E(KP+2) = X3/(3,7.D)$  {utilizada  
 para o cálculo de f de DW}  
 CPL =  $X4/(2.G.D^4.0,7854^2)$  {coeficiente  
 de perda de carga localizada}  
 CEV =  $VNU/D$  {coeficiente  
 de velocidade}

Imprime

I, QQ, L, D, X3, X4

Fim se  
Declare

NPS {número de trechos imaginários}  
 TT {string para indicar seu tipo(PS)}

Leia

NPS, PS

Fazer I1 variar de 1 até o NPI

Declare

I {número do trecho imaginário}  
 DH {diferença de altura Piezométrica  
 entre os níveis de carga de pressão  
 fixados dos nós interligados}

Leia

I, DH

Imprime

I, DH

Fim se  
Declare

NPU {número de bombas existente no  
 sistema}  
 TT {string para indicar seu tipo(PU)}

Leia

NPU, PU

Se NPU for = 0, ir para rótulo label chuva(onde inicia-  
 se o segundo módulo do programa)

Fazendo I1 variar de 1 até NPU

Declare

I {número da bomba na rede}  
 QQ {vazão da bomba}  
 DQ {intervalo de vazão entre os valores  
 em que se especificam as cargas  
 manométricas da bomba}  
 H<sub>1</sub> {altura manométrica da bomba na vazão  
 zero}  
 H<sub>2</sub> {altura manométrica da bomba na vazão  
 DQ}  
 H<sub>3</sub> {altura manométrica da bomba na vazão  
 2DQ}

$H_4$             {altura manométrica da bomba na vazão  
                   $3DQ$ }

Calcule os coeficientes da equação da bomba

$$E(KP) = H_1 = A_0$$

$$E(KP+3) = (H_4 - 3 \cdot (H_3 - H_2) / 6 \cdot DQ^3) = A_3$$

$$E(KP+2) = (H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1) / 2 \cdot DQ^2 - 3 \cdot E(KP+3) \cdot DQ = A_2$$

$$E(KP+1) = (H_2 - H_1) / DQ - E(KP+2) \cdot DQ - E(KP+3) \cdot DQ^2 = A_1$$

Imprime

I, QQ, DQ, E(KP), E(KP+1), E(KP+2), E(KP+3)

Fim se

Segundo módulo são definidos e lidos todos os anéis que compõem a rede e feito o seu balanceamento, com a modificação das vazões nos trechos em função da perda de carga em cada trecho dos anéis.

Declare

NI            {soma número de elementos que com-  
                  põe os anéis}  
TT            {string para indicar seu tipo (vetor  
                  IND)}

Leia

NI, IND

Se NI = 0 vai para rótulo de label dado e imprime o elemento de correção de vazão

Fazendo I variar de 1 até NI

Leia

IND(I)        {cada elemento ou trecho dos anéis}

Fim se

Fazendo K(contador) variar de 1 até KK definido no módulo 1 do modelo, e então balanceado os anéis dentro da rede.

Calcule

número de Reynolds pela equação

$$\Re = E(KP+1) \cdot \text{ABS}(Q(I))$$

Teste para verificar qual o regime de escoamento que está ocorrendo em cada trecho da rede



$$\text{Teste} = \Re^{0,9} / (D/X_3)$$

Se  $\Re \geq 2000$  e  $\Re \leq 4000$

Imprime  $\Re$  entre 2000 e 4000

Calcule

$$R = E(KP) \cdot 1,325 / (\text{LOG}(E(KP+2) + 5,74/\Re^{0,9}))^2 + \text{CPL} \text{ (para cálculo da perda de carga total)}$$

Fim se

Se  $\Re < 2000$  vai para o rótulo de label limão

Calcule

$$R = E(KP) \cdot 64/\Re + \text{CPL}(I)$$

Fluxo = laminar

Fim se

Se teste  $> 31$  e teste  $< 448$

Calcule

$$R = (E(KP) \cdot 1,325 / (\text{LOG}(E(KP+2) + 5,74/\Re^{0,9}))^2 + \text{CPL}(I)$$

Fluxo = intermediário

Fim se

Se teste  $\leq 31$

calcule

$$R = E(KP) \cdot 1,325 / (\text{LOG}(5,74/\Re^{0,9}))^2 + \text{CPL}(I)$$

Fuxo = turbulento hidraulicamente liso

Fim se

Se teste  $\geq 448$

Calcule

$$R = E(KP) \cdot 1,325 / (\text{LOG}(E(KP+2)))^2 + \text{CPL}(I)$$

Fluxo = turbulento hidraulicamente rugoso

Fim se

O balanceamento dos anéis e então realizado

Calcule

$$DH = DH + S(J) \cdot R \cdot Q(I) \cdot \text{ABS}(Q(I))^{EN}$$

$$HDQ = HDQ + EX \cdot R \cdot \text{ABS}(Q(I))^{EN}$$

$$DH = DH - S(J) \cdot (E(KP) \cdot (E(KP+1) + Q(I)) \cdot (E(KP+2) + Q(I) \cdot E(KP+3)))$$

$$HDQ = HDQ - (E(KP+1) + 2 \cdot E(KP+2) \cdot Q(I) + 3 \cdot E(KP+3) \cdot Q(I)^2)$$

$$DQ = -DH/HDQ$$

$$DDQ = DDQ + \text{ABS}(DQ)$$

$$Q(I) = Q(I) + S(J) \cdot DQ$$

Imprime

KK

{número de interações}

DDQ                    {vazão de correção}

Se a vazão de correção for menor que a tolerância desejada vai para o rótulo de label "dado"

Fazendo I variar de 1 até 100

Imprime

I                    {número do trecho}  
 Q(I)                {vazão do trecho corrigida}  
 FLUXO                {regime de escoamento do líquido no  
                           trecho}

Fim se

Terceiro módulo do modelo, são realizados os cálculos das alturas piezométricas em cada nó ou ponto solicitado (aspersores)

Declare

NU                    {são números de nós de cota fixa}  
 TT                    {string para indicar o seu tipo  
                           (NODES)}

Se NU = 0 vai para o rótulo de label água (início do programa)

Fazendo I variar de 1 até NU

Leia

I1                    {número do nó}  
 H<sub>I1</sub>                {altura piezometrica do nó}

Fim se

Declare

NI                    {número de nós e trechos existente  
                           no caminho a ser percorrido para o  
                           cálculo das alturas piezométricas}  
 TT                    {string para indicar o seu tipo  
                           (vetor IX)}

Leia

NI, IX

Se NI = 0 vai para o rótulo de label água (início do programa)

Declare

IX(I)                {o percurso a ser percorrido  
                           começando pelo nó onde a  
                           alturapiezométrica seja conhecida,  
                           seguido do trecho correspondente}

Fazendo I variar de 1 até NI

Leia  
 IX(I)            {cada item do caminho}  
Fim se  
Imprime  
 IX

Fazendo I variar de 1 até NI  
Imprime  
 IX(I)  
Fim se

No balanceamento dos nós, e aplicado novamente o teste para verificar o regime em seguida calcular o f da fórmula de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga. E em seguida a altura piezométrica de cada ponto, nó ou aspersor solicitado; bem como a velocidade de escoamento da água no trecho.

Calcule  
 $R = E(KP+1).ABS(Q(I))$   
Se  $R < 1$  fazer  $R = 1$   
 Teste =  $(R^{0,9}) / (D/X_3)$   
 $VEL = R.CEV(I)$

Se  $R \geq 2000$  e  $R \leq 4000$   
Imprime  
 $R$  entre 2000 e 4000

Calcule  
 $R = E(KP).1,325 / (\text{Log}(E(KP+2)+5,74/R^{0,9}))^2 + CPL(I)$   
Fim se

Se  $R < 2000$   
 Calcule  
 $R = (E(KP).64/R) + CPL(I)$   
 Fluxo = laminar  
Fim se

Se teste  $> 31$  e teste  $< 448$   
 $R = (E(KP).1,325 / (\text{Log}(E(KP+2)+5,74/R^{0,9}))^2) + CPL(I)$   
 Fluxo = intermediário  
Fim se

Se teste  $\leq 31$   
 Calcule  
 $R = (E(KP).1,325 / (\text{Log}(5,74/R^{0,9}))^2) + CPL(I)$   
 Fluxo = Turbulento hidraulicamente liso

Fim se

Se teste  $\geq 448$

Calcule

$$R = (E(KP) \cdot 1,325 / (\text{Log}(E(KP+2)))^2) + \text{CPL}(I)$$

Fluxo = turbulento hidraulicamente rugoso

Fim se

Calcula-se então as alturas piezométricas em cada nó ou ponto solicitado através da Equação

Calcule

$$H(N) = H(K) - SS \cdot R \cdot Q(I) \cdot \text{ABS}(Q(I))^{EN}$$

$$H(N) = H(K) - SS \cdot E(KP)$$

$$H(N) = H(K) + SS \cdot (E(KP) + Q(I) \cdot (E(KP+1) + Q(I) \cdot (E(KP+2) + Q(I) \cdot E(KP+3))))$$

Fazendo N variar de um até 100

Imprime

N {número do ponto ,nó ou aspersor solicitado}

H(N) {altura piezométrica do aspersor, nó ou ponto solicitado}

Fim se

**Fim Algoritmo**

### 3.2.2 Fluxograma.

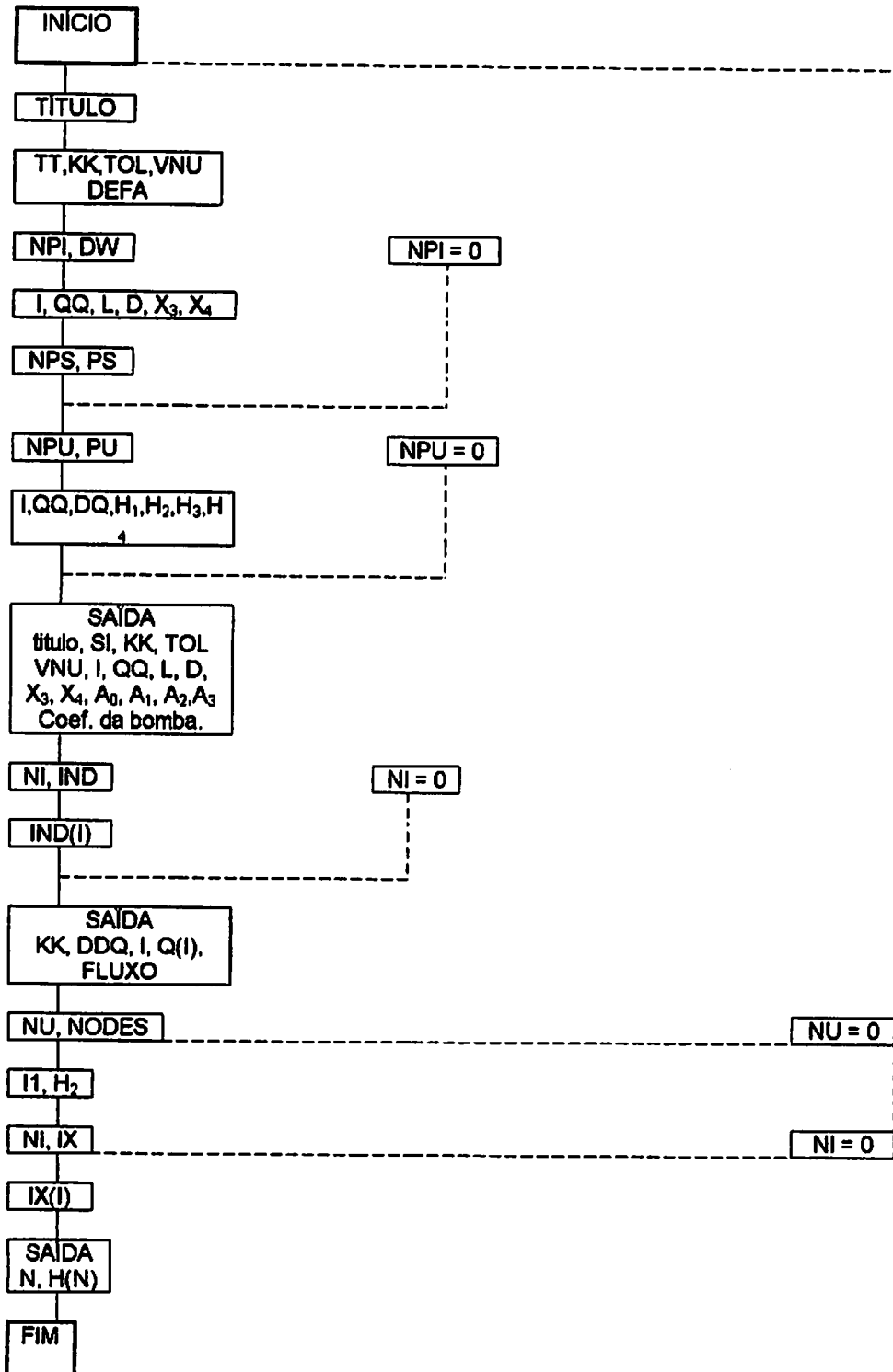


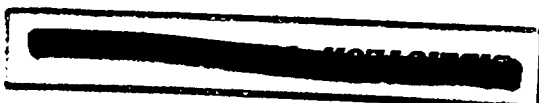
FIGURA 2. Fluxograma para dimensionamento hidráulico da rede.

### 3.2.3 Programa.

```

' PROGRAMA PARA BALANCIAMENTO DE REDES DE TUBOS EM CIRCUITO
FECHADO,
' U.S. CUSTOMARY (USC) OR SI UNITS (SI) MAY BE USED.
' COM O EMPREGO DO METODO HARDY-CROSS SENDO UTILIZADO PARA O
CALCULO, DA PERDA DE CARGA AS EQUACOES DE DARCI-WEIBACH.
' DATA DE ENTRY VIA READ AND DATA DE STATEMENTS.
' *****READ DATA AND PRINT REDES INFORMACAO*****
,
DEFINT I, J, K, N
AGUA:
DIM ITYPE(1000), ELEM#(500), IND(500), Q#(100), H#(100), S(20), IX(240),
FLUXO(100), VEL#(100), CPL#(100)
FOR J=1 TO 100:      ITYPE(J)=5:      H#(J)=-1000:      NEXT J
READ TITLE$:
LPRINT:              LPRINT"      ";TITLE$
READ TT$, KK#, TOL#, VNU#, DEFA# 'NT$=USC OU SI, KK=NO. OF ITER.,
VNU=KIN. VISC.
'TOL=TOLERANCIA IN INTERATION, DEFA=DEFAULT COEF.-EITHER C OR EPS
IF (TT$="SI" OR TT$="si") THEN GOTO RIO
UNITS=4.727:      G=32.174:
LPRINT" US CUSTOMARY UNITS SPEC., VISCOSITY IN FT^2/S=";VNU#: GOTO MAR
RIO:
UNITS=10.674:      G=9.806:
LPRINT" UNITS=";UNITS; "GRAVIDADE=";G
LPRINT" SI UNITS SPEC., VISCOSITY IN M^2/S=";VNU#
MAR:
LPRINT" DESIRED TOLERANCE=";TOL#; " NO. OF ITERATIONS=";KK#
LPRINT" TRECHOS      Q(CFS OR M^3/S) L(FT OR M)      D(FT OR M) HW C OR EPS
X4 (ADM)"
READ NPI, TT$:      IF NPI=0 THEN PERDA
'NPI=NO. OF TRECHOS NA REDE, TT$="HW"OR "DW"
FOR I1 =1 TO NPI:  READ I, QQ#, L#, D#, X3#, X4#: IF X3#=0 THEN
X3#=DEFA#
'I=TRECHO NO., QQ=VAZAO, L=COMPRIMENTO, D=DIAMENTRO, X3=C OR
EPS, X4=COEF.DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA
Q#(I)=QQ#:      KP=4*(I-1)+1
IF TT$="HW" OR TT$="hw" THEN ASPERSOR
ITYPE (I)=2:      ELEM#(KP)=L#/(2*G*D#^5*.7854^2):      'DW
ELEM#(KP+1)=1/(.7854*D#*VNU#): ELEM#(KP+2)=X3#/(3.7*D#):
CPL#(I)=X4#/(2*G*D#^4*.7854^2):
CEV#(I)=VNU#/D#:
EX#=2:      GOTO QUENTE
ASPERSOR:
ITYPE(I)=1:      EX#=1.852:
ELEM#(KP)=UNITS*L#/(X3#^EX#*D#^4.8704) 'HW
QUENTE:
EN#=EX#-1:      LPRINT"      ";I:
LPRINT USING" #####.#####";Q#(I);L#;D#;X3#;X4#
NEXT I1

```



```

PERDA:
  READ NPS,TT$:
  IF NPS=0 THEN TEMPERA
  ' NPS=NO. OF PSEUDO ELEMENTS, TT$="PS"
  FOR I=1 TO NPS:
  READ I, DH#:
  ELEMENT(KP)=DH#:
  LPRINT " ";I;" RESERVOIR ELEV. DIFFERENCE="',DH#
  NEXT I
  TEMPERA:
  READ NPU, TT$:
  IF NPU=0 THEN CLIMA
  'NPU=NO. OF PUMPS, TT$="PU"
  FOR I=1 TO NPU:
  READ I,QO#,DQ#,H1,H2,H3,H4:
  'I=PUMP NO., QO=VAZAO, DQ=DEL Q, H1, H2, H3, H4=EQUALLY SPACED PTS ON
  PUMP CURVE
  KP=4*(I-1)+1:
  Q(I)=QO#:
  ELEMENT(KP)=H1
  ELEMENT(KP+3)=(H4-3*(H3-H2)-H1)/(6*DQ^3)
  ELEMENT(KP+2)=(H3-2*H2+H1)/(2*DQ^2)-3*ELEMENT(KP+3)*DQ#
  ELEMENT(KP+1)=(H2-H1)/DQ#-ELEMENT(KP+2)*DQ#-ELEMENT(KP+3)*DQ#^2
  LPRINT " ";I;" PUMP CURVE, DQ#="';DQ#;" H#="';H1,H2,H3,H4
  LPRINT"COEF. IN PUMP EQ.="';ELEMENT(KP); ELEMENT(KP+1); ELEMENT(KP+2);
  ELEMENT(KP+3)
  NEXT I
  *****READ LOOP INDEXING DATA AND BALANCE ALL LOOPS*****
  CLIMA:
  READ NI, TT$:
  IF NI=0 THEN GOTO DADO
  'NI=NO. OF ITEMS IN VECTOR IND, TT$="IND"
  FOR I=1 TO NI
  READ IND(I)
  NEXT I
  IND(NI+1)=0
  LPRINT"IND="";
  FOR I=1 TO NI
  LPRINT IND(I);
  NEXT I
  FOR K=1 TO KK#:
  DDQ#=0:
  IP=1
  CHUVA:
  I1=IND(IP):
  IF I1=0 THEN GOTO FIO
  DH#=0:
  HDQ#=0
  FOR J=1 TO I1:
  I=IND(IP+J):
  IF I<0 THEN SOLO
  IF I=0 THEN GOTO CURVA ELSE GOTO SULCO
  SOLO:
  S(J)=-1:
  I=-1:
  GOTO SEIVA
  SULCO:
  S(J)=1
  SEIVA:
  NTY=ITYPE(I):
  KP=4*(I-1)+1
  ON NTY GOTO ARADO,UVA,ARCO,MARCO
  ARADO:
  R#=ELEMENT(KP):
  GOTO TEIVA
  UVA:
  RYEM#(KP+1)+ABS(Q(I)):
  IF RYEM#>1 THEN
  RYEM#=1:TEST=(RYEM#^9)/(D#/X3#)
  IF RYEM#>=2000 AND RYEM#<=4000 THEN
  LPRINT"RYEM# ENTRR 2000 E 4000"
  R#=ELEMENT(KP)*1.325/(LOG(ELEM#(KP+2)+5,74/RYEM#^9))^2+CPL(I)
  END IF

```

```

      IF REY#<2000 THEN LIMAO ELSE GOTO CERCA
LIMAO:
      R#=(ELEM#(KP)*64/REY#)+CPL#(I): FLUXO$="LAMINAR": GOTO LEIVA
CERCA:
      IF TEST>31 AND TEST<448 THE
      R#=(ELEM#(KP)*1.325/(LOG(ELEM#(KP+2)+5.74/REY#^.9))^2)+CPL#(I):FLUXO$="
      INTERMEDIARIO"
      END IF

      IF TEST<=31 THEN
      R#=(ELEM#(KP)*1.325/(LOG(5.74/REY#^.9))^2)+CPL#(I):FLUXO$="LISO"
      END IF

      IF TEST>=448 THEN
      R#=(ELEM#(KP)*1.325/(LOG(ELEM#(KP+2)))^2)+CPL#(I):FLUXO$="RUGOSO"
      END IF
LEIVA:
      DH#=DH#+S(J)*R#*Q#(I)*ABS(Q#(I))^EN#
      HDQ#=HDQ#+EX#*R#*ABS(Q#(I))^EN#: GOTO CURVA
ARCO:
      DH#=DH#+S(J)*ELEM#(KP): GOTO CURVA
MARCO:
      DH#=DH#-S(J)*(ELEM#(KP)+Q#(I)*(ELEM#(KP+1)+Q#(I)*(ELEM#(KP+2)+Q#(I)*
      _ELEM#(KP+3))))
      HDQ#=HDQ#-(ELEM#(KP+1)+2*ELEM#(KP+2)*Q#(I)+3*ELEM#(KP+3)*Q#(I)^2)
CURVA:
      NEXT J
      IF ABS(HDQ#)<.0001 THEN HDQ#=1
      DQ#=-DH#/HDQ#: DDQ#=DDQ#+ABS(DQ#)
      FOR J=1 TO I1: I=ABS(IND(IP+J)): IF ITYPE(I)=3 THEN LIVRE
      Q#(I)=Q#(I)+S(J)*DQ#
LIVRE:
      NEXT J
      IP=IP+I1+1: GOTO CHUVA
FIO:
      LPRINT: LPRINT"INTERATION NO. ";K;" SUM OF VAZAO CORRECTIONS=";
      LPRINT USING"###.#####";DDQ#
      IF DDQ#<TOL# THEN GOTO DADO
      NEXT K
DADO:
      LPRINT"ELEMENT VAZAO"
      FOR I=1 TO 100
      NTY= ITYPE(I)
      ON NTY GOTO REGUA,REGUA,CANETA,REGUA,CANETA
REGUA:
      LPRINT " ";I::LPRINT USING"###.#####";Q#(I)::LPRINT " FLUXO(I)=
      _";FLUXO$::LPRINT " FLUXO$=";FLUXO$
CANETA:
      NEXT I
      '*****DATA FOR PATH THRU SYSTEM TO COMPUTE HGL*****
      READ NU, TT$: IF NU=0 THEN GOTO AGUA 'NU=NO. OF NODES WITH GIVEN HGL,
      TT$=NODES
      FOR I=1 TO NU
      READ I1,H2: H#(I1)=H2

```



```

NEXT I
READ NI, TT$: IF NI=0 THEN GOTO AGUA, NI=NO.OF ITEMS IN PATH, TT$="IX"
FOR I=1 TO NI
  READ IX(I)
NEXT I
IX(NI+2)=0
LPRINT"IX=";
FOR I=1 TO NI
  LPRINT IX(I);
NEXT I
PRINT:
IP=1
FIXO:
FOR J=1 TO 238 STEP 2: IF J=1 THEN K=IX(IP)
I=IX(IP+J): N=IX(IP+J+1)
IF I>1 THEN SS=-1: I=-I: GOTO DIESEL
IF I=0 THEN PRECO ELSE SS=1
DIESEL:
NTY=ITYPE(I): KP=4*(I-1)+1
ON NTY GOTO LINHA, FEITO, USO, MODELO, PRECO
LINHA:
R#=ELEM#(KP): GOTO BANCO
FEITO:
R#=(ELEM#(KP+1)+ABS(Q#(I))): IF REY#<1 THEN REY#=1:
TEST=(REY#^.9)/(D#/X3#)
VEL#=REY#+CEV#(I): LPRINT"VEL#=";VEL#
IF REY#>=2000 AND REY#<=4000 THEN
  LPRINT"REY ENTRE 2000 E 4000"
R#=ELEM#(KP)+1.325/(LOG(ELEM#(KP+2)+5.74/REY#^.9))^2+CPL(I)
END IF
IF REY#<2000 THEN R#=(ELEM#(KP)+64/REY#)+CPL#(I): FLUXO$="LAMINAR":
GOTO BANCO
IF TEST>31 AND TEST<448 THEN
  R#=(ELEM#(KP)+1.325/(LOG(ELEM#(KP+2)+5.74/REY#^.9))^2+CPL#(I): FLUXO$="
INTERMEDIARIO"
END IF
IF TEST<=31 THEN
  R#=(ELEM#(KP)+1.325/(LOG(5.74/REY#^.9))^2+CPL#(I): FLUXO$="LISO"
END IF
IF TEST>=448 THEN
  R#=(ELEM#(KP)+1.325/(LOG(ELEM#(KP+2))^2+CPL#(I): FLUXO$="RUGOSO"
END IF
BANCO:
H#(N)=H#(K)-SS+R*Q#(I)+ABS(Q#(I))^EN#: GOTO PRECO
USO:
H#(N)=H#(K)-SS+ELEM#(KP): GOTO PRECO
MODELO:
H#(N)=H#(K)+SS+(ELEM#(KP)+Q#(I))*(ELEM#(KP+1)+Q#(I))*(ELEM#(KP+2)+
Q#(I)+ELEM#(KP+3)))
PRECO:

```

```
IF IX(J+IP+3)=0 THEN TEMPO
```

```
IF IX(J+IP+2)=0 THEN CELA
```

```
  K=N:
```

```
  NEXT J
```

```
CELA:
```

```
  IP=IP+J+3:  GOTO FIXO
```

```
TEMPO:
```

```
  LPRINT" JUNCTION HEAD"
```

```
  FOR N=1 TO 100:  IF H#(N)=-1000 THEN MOTOR
```

```
    LPRINT" ";N;:  LPRINT USING" ###.####";H#(N)
```

```
MOTOR:
```

```
  NEXT N:
```

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Desempenho do modelo.**

Foram realizadas simulações de forma a testar o modelo. Para tanto, selecionou-se três exemplos de projetos elaborados pelos autores, projetos estes já implantados e em funcionamento normal no campo, dentro desta modalidade da aspersão, em redes fixas de tubos. Utilizando-se os dados destes exemplos; lâmina a ser aplicada, turno de rega, características dos aspersores (vazão, pressão de serviço, espaçamento, etc), e trabalhando com os mesmos diâmetros e comprimento de trechos de tubulações. Os resultados são apresentados nos tabelas 14, 16 e 18. Com este procedimento adotado, buscou-se verificar o funcionamento do modelo no dimensionamento e avaliação de redes hidráulicas, sem a preocupação de se comparar procedimentos de cálculos, mas de forma a se constituir numa ferramenta de fácil compressão e utilização onde o conhecimento da técnica aplicada é indispensável.

**TABELA 13. Dados de entrada referentes ao exemplo de Projeto nº 1.**

**-Projeto de Irrigação por Aspersão Sistema Fixo com Tubos Enterrados.**

**-PROPRIETÁRIO: Dr. Dalton Moreira Canabrava.**

**-PROPRIEDADE: Fazenda da Lapa - Área: 394 ha**  
**Estrada de Monjolos - Km 16**  
**Município de Curvelo - MG**

**-DADOS DO SOLO:**

**-Fertilidade: alta**

**-Tipo Solo: não relacionado**

**-Capacidade de Infiltração: não relacionado**

**-Uso Atual: lavouras anuais**

**-Cobertura Vegetal Original: Mata de médio porte**

**-DADOS DO CLIMA\*:**

**-Altitude: 609 m**

**-Temperatura média anual: 21,9° C**

**-Precipitação anual: 1307 mm**

**-Precipitação Média Mensal (mm):**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	236	164	163	68	19	7	5	6	35	97	190	317

**-Estimativa da Evapotranspiração Potencial (mm):**

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	121	106	109	91	77	64	65	77	92	110	111	115
P/Dia	4,03	3,65	3,63	3,03	2,56	2,13	2,16	2,56	3,06	3,66	3,70	3,83

\* FONTE: ENG<sup>o</sup> AGR<sup>o</sup>. Abilio José Antunes  
 Coordenadoria de Apoio Técnico  
 EMATER- MG (Dados de Média de 30 Anos)

---

 Continuação

**-Balanço Hídrico - Estimativa de superavits (mm):**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	115	58	54	-	-	-	-	-	-	-	79	202

**-Balanço Hídrico - Estimativa de Déficit (mm):**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	-	-	-	23	58	57	60	71	57	13	-	-

**-DADOS DO PROJETO:**

-Área Irrigada: 7,02 ha

-Culturas: (milho, feijão, Cana)

**-Características do Aspensor:**

.Fabricante/Modelo----- : ASBRASIL / ZE-30  
 .Bocal ----- : 5 mm  
 .Vazão ----- : 1,54m<sup>3</sup>/h  
 .Pressão de Serviço----- : 30 mca  
 .Intensidade de Aplicação----- : 4,28 mm/h  
 .Espaçamento Entre Aspersores ----- : 20 x 18 m (triângulo)  
 .Coeficiente de Uniformidade ----- : não informado

**-Lâmina de Irrigação:**

.Lâmina Bruta Necessária----- : 42,8 mm  
 .Lâmina Útil Aplicada----- : 32,1 mm  
 .Lâmina Líquida Disponível p/ Dia ----- : 4,28 mm  
 .Eficiência de Aplicação ----- : 75%  
 .Turno de Rega ----- : 7,5 dias  
 .Período de Irrigação----- : 7,5 dias

**-Linha de Recalque:**

.Trecho -----	: A
.Vazão -----	: 20,02 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 192 m
.Diâmetro Interno -----	: 70,5 mm
.Diâmetro Externo -----	: 75 mm
.Pressão no Início -----	: 54,04 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 3,90 m
.Perda de Carga no Trecho (h) -----	: 5,96 m

**-Linha de Distribuição:**

.Trecho -----	: B
.Vazão -----	: 10,78 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 117
.Diâmetro Interno -----	: 46,7 mm
.Diâmetro Externo -----	: 50,5 mm
.Pressão no Início -----	: 38,51 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 0,073 m
.Perda de Carga no Trecho (h) -----	: 8,54 m

**-Linha Lateral:**

.Vazão -----	: 0,77 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 150 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro externo -----	: 25 mm
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 1,98 m
.Perda de Carga no Trecho (h) -----	: 2,97 m

**-Ponto do Aspersor:**

.Vazão -----	: 1,54 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 2,0 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro Externo -----	: 25,0 mm
.Pressão -----	: 30 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 7,15 m
.Perda de Carga no trecho (h) -----	: 0,86 m

**-Manejo Do Sistema:**

.Período de Irrigação-----	: 7,5 dias
.Número total de posições -----	: 195
.Tempo de irrigação por posição -----	: 10 horas
.Número de posições irrigadas / dia-----	: 2
.Área irrigada por aspersor -----	: 0,54 ha
.Número de aspersores em operação -----	: 13

**-Conjunto Moto-bomba:**

.Marca/Modelo-----	: KSB ETANORM/32-160-1
.Vazão total do sistema -----	: 20 m <sup>3</sup> /h
.Altura manométrica total-----	: 54 m
.Potência da bomba-----	: 7,47 HP
.Potência do motor -----	: 10 HP
.Diâmetro da sucção-----	: 75 mm
.Rendimento -----	: 55,5%
.Rotor -----	: 176

**-Custo Do Sistema:**

.Consumo anual de energia elétrica -----	: 22200
.Custo fixo anual -----	: Não informou
.Custo variável anual-----	: Não informou
.Custo total do projeto [US\$ ] -----	: 8.591,39
.Custo do projeto / hectares [US\$] -----	: 1.248,67
.Custo da aspersão conv./ha[US\$] -----	: 1.423,57

**-Listagem de Aspersores, Tubulações E Acessórios:**

26 Aspersores conforme especificações anteriores

**.Tubulações - Linha de distribuição e recalque**

Fabricante/Modelo.....: Tupy, Tigre/ ponta e bolsa soldável  
 35 tubos pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 75 mm  
 33 tubos pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 50 mm

**-Tubulações - Linha Lateral:****Fabricante/Modelo.....: Tupy, Tigre/ ponta e bolsa soldável****700 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 25 mm****-Acessórios:**

5	cotovelos de pvc de 45° de diâmetro de 75mm, azul soldável
40	cotovelos de pvc de 90° de diâmetro de 25 mm, azul soldável
4	tê de pvc azul soldável de diâmetro de 75 mm
12	tê de pvc azul soldável de diâmetro de 50 mm
230	tê de pvc marrom soldável de diâmetro de 25 mm
1	curva de 90° azul soldável de diâmetro de 75 mm
6	luvas de redução de pvc azul de 75 x 50 mm
2	buchas de redução de pvc de 75 x 50 mm
2	conjuntos de redução de pvc azul de 75 x 25 mm
195	buchas de redução de pvc de 32 x 25 mm
1	adaptador rosca macho de pvc, bolsa soldável de 75 mm
6	adaptador rosca macho de pvc, bolsa soldável de 50 mm
195	adaptador rosca macho de pvc, bolsa soldável de 32 mm
1	redução de pvc rosca macho de 3"
1	redução de pvc rosca fêmea de 2 1/2"
1	válvula de pé de 3" de bronze
1	válvula de retenção de 3"
1	registro de gaveta metálico de 2"
200	registro de pressão de pvc de 25 mm
200	mourões de cerca
7	tubos de cola para pvc
10	folhas de lixa para pvc
300	metros de arame liso para amarração
1	conjunto motobomba conforme especificações anteriores
2	flanges de 2" para bomba



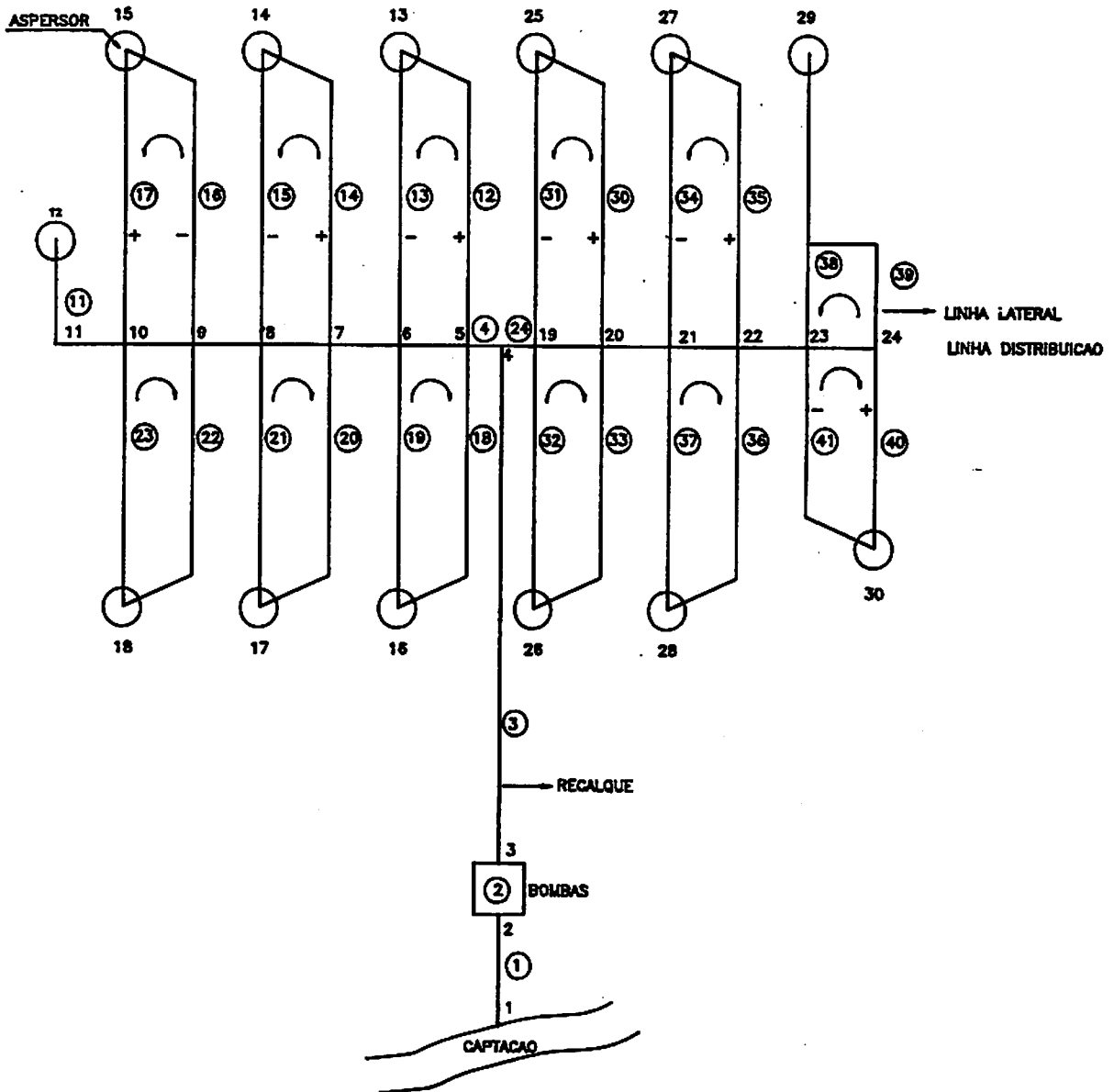


FIGURA 2. Esquema da rede do projeto do exemplo n<sup>o</sup> 1.

A tabela 14 a seguir, dá o resumo da saída de dados do modelo matemático proposto, os dados de entrada foram tirados do exemplo n° 1, projeto do Sr. Dalton Canabrava mantendo os mesmos dados técnicos do projeto original.

TABELA 14. Resultados da simulação do exemplo nº 1, para  $\epsilon = 0,02$  mm e  $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Trecho	Vazão (m/h)	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Perda de carga no trecho (m)	Número Reynolds	Regime de Fluxo	Velocidade (m/s)	Pressão no Trecho (mca)	Observações
1	20,03	6	70,5		97542,0	Liso	1,4250		
2	20,03							49,82	Bomba
3	20,03	200	70,5	6,7547	97542,0	Liso	1,4250		
4	10,80	10	46,7	1,0231	79436,7	Liso	1,7520	35,03	
5	9,12	20	46,7	1,2070	66969,3	Liso	1,4771		
6	7,73	20	46,7	0,8941	56831,2	Liso	1,2534		
7	6,12	20	46,7	0,5830	44972,6	Liso	0,9912		
8	4,66	20	46,7	0,3552	34225,8	Liso	0,7548		
9	3,10	20	46,7	0,1699	22764,3	Liso	0,5021	31,83	
10	1,58	20	46,7	0,0511	11620,4	Liso	0,2563		
11	1,58	54	46,7	0,1425	11620,4	Liso	0,2563	31,78	Aspersor
12	0,82	146	22,4	3,7715	12637,5	Liso	0,5810		
13	0,71	135	22,4	2,5645	10929,7	Liso	0,5024	31,27	Aspersor
14	0,79	146	22,4	3,4068	12030,4	Liso	0,5532		
15	0,75	135	22,4	2,8238	11533,7	Liso	0,5303	29,54	Aspersor
16	0,76	146	22,4	3,1706	11644,1	Liso	0,5354		
17	0,78	135	22,4	3,0007	11920,0	Liso	0,5481	28,83	Aspersor
18	0,87	137	22,4	3,3455	13354,9	Liso	0,6141		
19	0,67	126	22,4	2,1365	10209,3	Liso	0,4694	31,70	Aspersor
20	0,83	137	22,4	2,9599	12747,8	Liso	0,5862		
21	0,71	126	22,4	2,3769	10947,3	Liso	0,5034	29,98	Aspersor
22	0,80	137	22,4	2,7122	12455,3	Liso	0,5727		
23	0,73	126	22,4	2,5423	11394,1	Liso	0,5239	29,29	Aspersor
24	9,22	10	46,7	0,7613	67816,3	Liso	1,4957		
25	7,53	20	46,7	0,8525	55375,4	Liso	1,2213		
26	6,15	20	46,7	0,5888	45210,9	Liso	0,9971		
27	4,53	20	46,7	0,3372	33272,9	Liso	0,7738		
28	3,07	20	46,7	0,1679	22605,4	Liso	0,4986		
29	1,67	20	46,7	0,0554	12176,2	Liso	0,2686		
30	0,70	146	22,4	2,6488	10650,8	Liso	0,4897	31,80	Aspersor
31	0,84	135	22,4	3,5013	12913,4	Liso	0,5938		
32	0,85	126	22,4	3,3281	12968,6	Liso	0,5963	31,98	Aspersor
33	0,69	137	22,4	2,4756	10595,6	Liso	0,4872		
34	0,81	135	22,4	3,2101	12416,7	Liso	0,5709	30,65	Aspersor
35	0,73	146	22,4	2,8729	11147,4	Liso	0,5126		
36	0,72	137	22,4	2,6967	11092,3	Liso	0,5100		
37	0,81	126	22,4	3,0339	12471,9	Liso	0,5735	30,83	Aspersor
38	0,67	135	22,4	2,3379	10264,5	Liso	0,4720	31,02	Aspersor
39	0,87	74	22,4	2,2825	13299,7	Liso	0,6115		
40	0,79	108	22,4	2,5089	12085,6	Liso	0,5557	30,79	Aspersor
41	0,75	119	22,4	2,5643	11478,6	Liso	0,5278		

Conforme os resultados apresentados, para esta simulação, verifica-se que o regime de escoamento predominante em quase todos os trechos da rede, foi o turbulento liso. O que confirma a hipótese de Prandtl que a subcamada laminar diminui com o aumento do número de Reynolds e que para um mesmo fluido, pode ocorrer ser o regime liso nas baixas velocidades e rugoso nas maiores.

Neste exemplo a velocidade de escoamento esteve em 67% dos trechos da rede inferior a 0,6m/s. Contrariando a recomendação de Bernardo (1982) e Keller e Bliesner (1990), que a velocidade média da água em cada trecho deve estar compreendida entre 0,6 a 2,4 m/s, e que inferior a este limite, os diâmetros, são excessivos e a tubulação fica mais cara. Por sua vez em função da qualidade da água utilizada poderemos ter problemas de formação de sedimentos, o que pode ser favorecido nas baixas velocidades ocorridas nos trechos.

Obteve-se uma variação de pressão de serviço dos aspersores de 6,45% entre o primeiro e o último aspersor na linha lateral para as condições mais desfavoráveis do projeto, e bem abaixo do limite de variação máxima de 20% recomendado por Keller e Karmeli (1974) e Bernardo (1982). O que significa que poderíamos ter uma perda de carga maior em alguns trechos da rede, permitindo em alguns trechos da rede utilizar diâmetros menores que 22,4 mm.

O conjunto moto bomba deste exemplo, atingiu o seu ponto de funcionamento pelos cálculos do modelo com 49,82 metros de altura

manométrica, com um rendimento de 49%. A variação das pressões dos aspersores ao longo da rede para a pior situação do projeto, pode ser visualizada pela figura abaixo. Mostrando uma homogeneidade de distribuição de água ao longo de toda área irrigada.

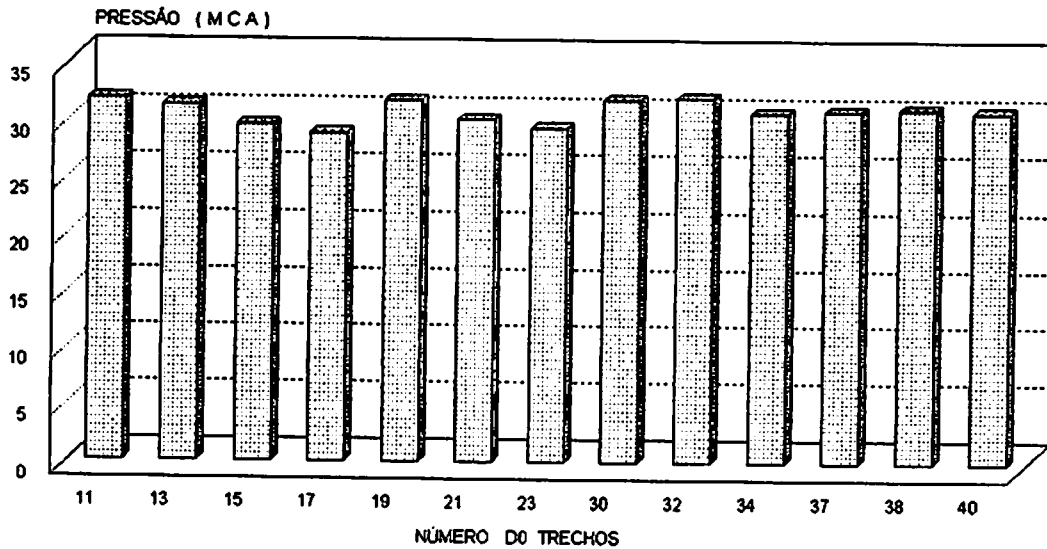


FIGURA 3. Pressão operacional dos aspersores do modelo 1.

**TABELA 15. Dados de entrada referentes ao exemplo de Projeto nº 2.**

-Projeto de Irrigação por Aspersão Sistema Fixo com Tubos Enterrados.

-PROPRIETÁRIO: Dr. Antônio Mourthé Filho

-PROPRIEDADE: Fazenda Cabo Verde - Florestal, MG

-DADOS DO SOLO:

-Não especificado no projeto

-DADOS DO CLIMA\*:

-Altitude: 704 m

-Temperatura média anual: 21,2° C

-Precipitação média anual: 1365 (mm)

-Precipitação Média Mensais (mm):

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	251	193	182	75	33	33	0	6	4	97	181	310

-Estimativa da Evapotranspiração Potencial (mm):

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	117	102	104	85	71	61	64	76	89	107	109	113
P/dia	3,90	3,60	3,50	2,80	2,40	2,03	2,13	2,53	2,96	3,56	3,63	3,76

\* FONTE: ENGº. AGRº. Abílio José Antunes  
 Coordenadoria de Apoio Técnico  
 EMATER - MG (Dados de Média de 30 anos)

## Continuação

**-Balanço Hídrico - Estimativa de Superavits (mm):**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	154	91	78	-	-	-	-	-	-	-	72	197

**-Balanço Hídrico - Estimativa de Deficts (mm):**

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Valor	-	-	-	10	38	51	5	68	5	0	-	-

**-DADOS DO PROJETO:**

**-Área Irrigada: 2,84 ha**

**-Culturas Exploradas: Capineira e Pomar**

**.Características do Aspensor:**

.Fabricante/Modelo----- : ASBRASIL / ZE-30  
 .Bocal ----- : 5 mm  
 .Vazão ----- : 1,54 m<sup>3</sup>/h  
 .Pressão de Serviço----- : 30 mca  
 .Intensidade de Precipitação----- : 4,07 mm/h  
 .Espaçamento Entre Aspensores ----- : 18 x 21 m

**-Lâmina de Irrigação:**

.Lâmina Bruta Necessária----- : 48,84 mm  
 .Lâmina Útil Aplicada----- : 36,63 mm  
 .Lâmina Líquida Disponível por dia ----- : 3,85 mm  
 .Eficiência de Aplicação ----- : 75%  
 Turno de Rega ----- : 9,5 dias  
 .Período de Irrigação----- : 9,5 dias

**.Linha de Recalque:**

.Trecho ----- : S  
 .Vazão ----- : 6,16 m<sup>3</sup>/h  
 .Comprimento----- : 18 m  
 .Diâmetro Interno ----- : 70,4 mm  
 .Diâmetro Externo----- : 75,5 mm  
 .Pressão no início ----- : 54,04 m  
 .Perda de carga em metro/metro (J) ----- : 0,35 m  
 .Perda de Carga no Trecho (h)----- : 0,06 m

**-Linha de Distribuição:**

.Trecho -----	: L
.Vazão -----	: 6,16 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento -----	: 162 m
.Diâmetro Interno -----	: 70,4 mm
.Diâmetro Externo -----	: 75,5 mm
.Pressão no início -----	: 34,6 m
.Perda de Carga em metro/metro (J) -----	: 0,35 m
Perda de Carga no trecho (h) -----	: 0,57 m

**-Linha Lateral:**

.Trecho -----	: L
.Vazão -----	: 0,77 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento -----	: 115 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro Externo -----	: 25,0 mm
.Perda de Carga em metro/metro (J) -----	: 1,98 m
.Perda de Carga no Trecho (h) -----	: 2,28 m

**-Ponto do Aspensor:**

.Vazão -----	: 1,54 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento -----	: 2 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro Externo -----	: 25 mm
.Pressão -----	: 30 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J) -----	: 8,53 m
.Perda de Carga no trecho (h) -----	: 0,17 m

**-Manejo do Sistema:**

.Período de Irrigação -----	: 9,5 dias
.Número Total de Posições -----	: 75 p
.Tempo de Irrigação Por posição -----	: 12 horas
.Número de Posição Irrigada Por Dia -----	: 2
.Área Irrigada por Aspensor -----	: 0,72 ha
.Número de Aspersores em operação -----	: 4



**-Conjunto Moto Bomba:**

.Marca/Modelo-----	: Mark Peerless/HM
.Vazão Total do Sistema -----	: 6,16 m <sup>3</sup> /h
.Altura Manométrica Total-----	: 43,6 m
.Potência da Bomba -----	: 2 HP
.Potência do Motor -----	: 2 HP
.Diâmetro de Sucção -----	: 75 mm
.Rendimento -----	: 49%
.Rotor -----	: 108A

**-Custo do Sistema:**

.Consumo Anual de Eletricidade -----	: 5328 Kwh
.Custo Fixo Anual -----	: Não informou
.Custo Variável Anual-----	: Não informou
.Custo Total do Projeto [ US\$] -----	: 10132,58
.Custo do Projeto por hectares [US\$ ] ----	: 2.341,68
.Custo da aspersão convencional/ha[US\$]-	: 2691,58

**-Listagem de Aspersores, Tubulações e Acessórios:**

4 Aspersores conforme especificações anteriores

**-Tubulações - Linha de Distribuição e Recalque**

Fabricante/Modelo .....Tigre, Tupy/ponta e bolsa soldável  
30 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros, diâmetro de 75 mm

**-Tubulações - Linha Lateral**

Fabricante/Modelo.....Tigre, Tupy/ponta e bolsa soldável  
260 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros, diâmetro de 25 mm  
27 tubos de pvc marrom PN-75 de 6 metros, diâmetro de 25 mm

**-Acessórios:**

- 30 luvas de pvc azul soldável de 75 mm
- 10 tê de pvc azul soldável de 75 x 25 mm
- 2 redução de pvc azul soldável de 75 x 40 mm
- 1 redução de pvc marron soldável de 40 x 32 mm
- 1 redução de pvc marrom soldável de 40 x 25 mm
- 75 tê de pvc de 25 mm
- 25 joelhos de pvc de 25 mm
- 1 válvula de pê de 2"
- 1 conjunto de saídas com 7 peças
- 1 válvula de retenção de 1 1/2"
- 78 registros de pressão de pvc soldável de 25 mm
- 77 adaptador de pvc rosca macho bolsa soldável de 25 mm
- 1 caixa d'água de 250 litros
- 12 tubos de cola para pvc
- 1 conjunto moto bomba conforme especificações anteriores
- 100 metros de arame liso nº 14
- 76 mourões de cerca de 2 metros
- 6 folhas de lixa d'água
- 2 curvas de pvc de 45° de 75 mm
- 6 metros de mangote de 50 mm
- 1 adaptador para mangote

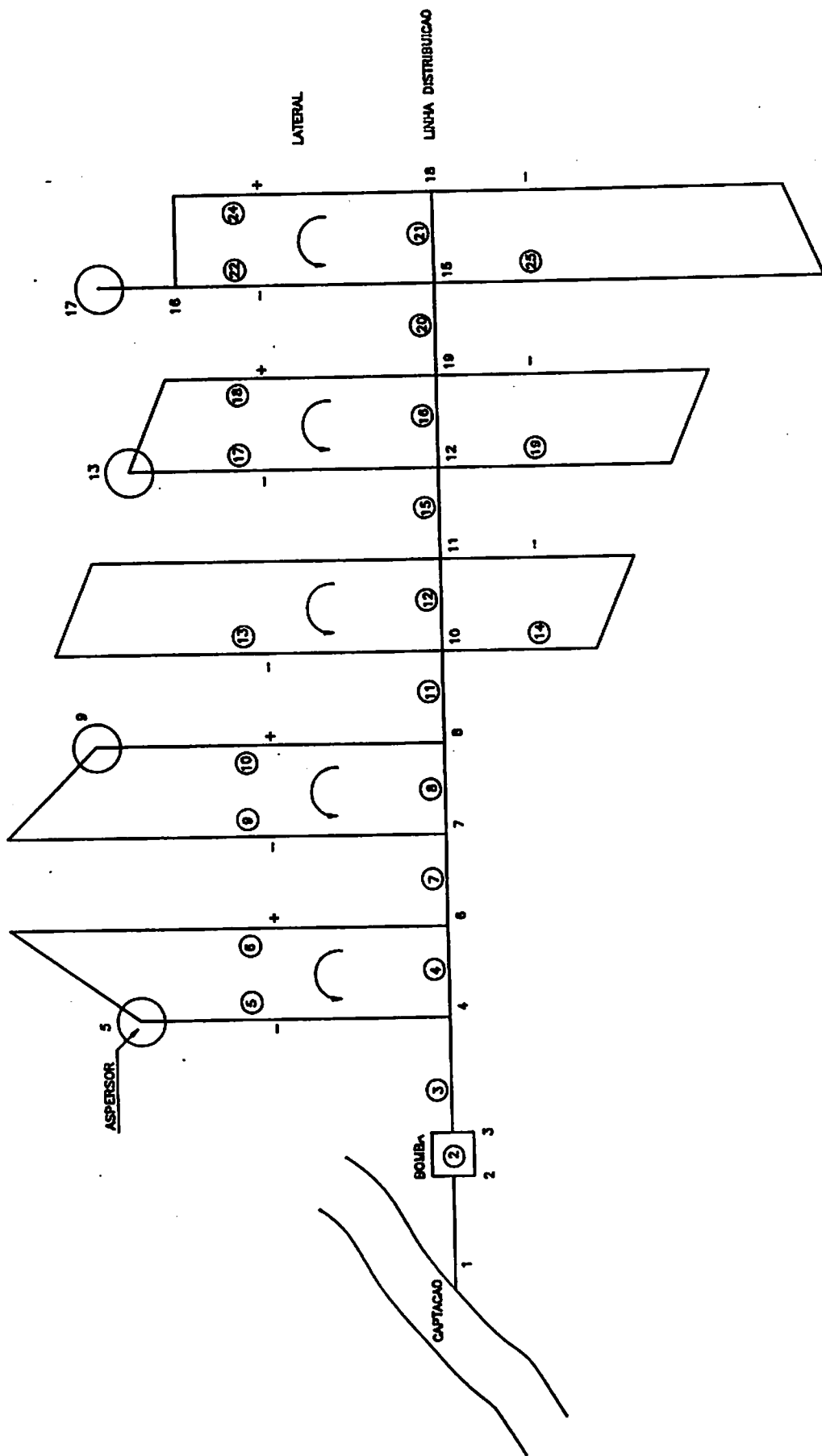


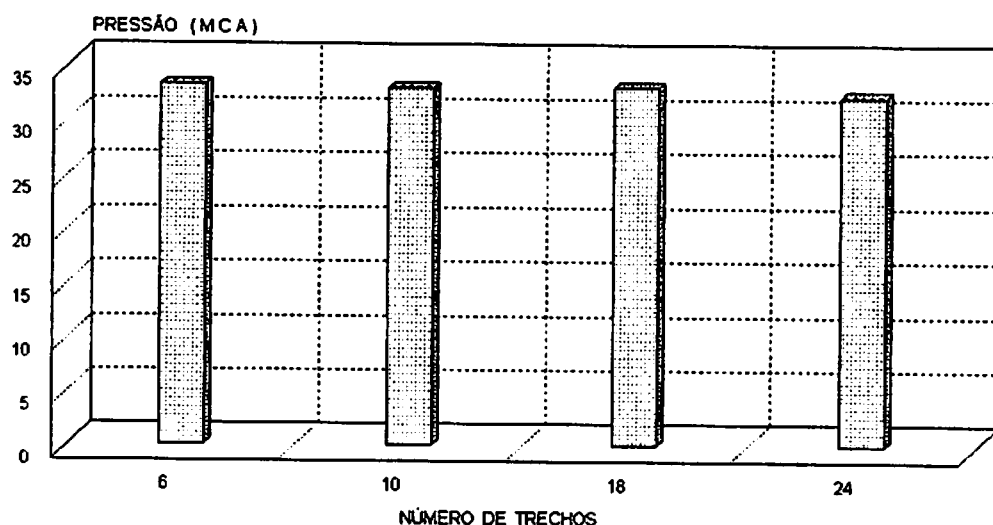
FIGURA 4. Esquema da rede do projeto do exemplo n° 2.

Também para este caso, entrando com os mesmos dados técnicos do projeto no exemplo nº 2, para os mesmos diâmetros e vazões relacionados, a tabela 16 dá o resumo da saída de dados do modelo proposto.

TABELA 16. Resultados da simulação do exemplo nº 2, para  $\epsilon = 0,02$  mm e  $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Trecho	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Perda de carga no trecho (m)	Número Reynolds	Regime de Fluxo	Velocidade (m/s)	Pressão no Trecho (mca)	Observações
1	6,22	6	70,5	0,026	30316,2	Liso	0,443		
2	6,22							37,82	Bomba
3	6,22	21	70,5	0,199	30316,2	Liso	0,443		
4	5,30	21	70,5	0,157	25805,9	Liso	0,377		
5	0,77	72	22,4	2,723	11864,9	Liso	0,546		
6	0,76	102	22,4	2,516	11685,4	Liso	0,537	33,22	aspersor
7	4,69	21	70,5	0,065	22829,2	Liso	0,335		
8	3,90	21	70,5	0,053	18989,9	Liso	0,277		
9	0,64	111	22,4	1,102	9767,8	Liso	0,449		
10	0,90	81	22,4	2,740	13796,3	Liso	0,634	32,95	aspersor
11	3,15	21	70,5	0,037	15342,1	Liso	0,224		
12	2,30	21	70,5	0,020	11204,3	Liso	0,164		
13	0,28	192	22,4	0,384	4359,6	Liso	0,201		
14	0,40	102	22,4	0,422	6291,1	Liso	0,289		
15	3,15	21	70,5	0,035	15342,3	Liso	0,224		
16	2,13	21	70,5	0,018	10380,2	Liso	0,152		
17	0,68	72	22,4	2,539	10485,2	Liso	0,482		
18	0,86	84	22,4	2,556	13078,9	Liso	0,601	33,03	aspersor
19	0,18	138	22,4	0,018	2814,5	Crítico	0,129		
20	1,63	21	70,5	0,011	7855,3	Liso	0,115		
21	0,59	21	70,5	0,002	2893,1	Crítico	0,043		
22	0,61	54	22,4	1,982	10540,4	Liso	0,485		
23	1,54	18	22,4	1,984	23564,2	Liso	1,084		
24	0,85	66	22,4	1,359	13023,7	Liso	0,599	32,22	aspersor
25	0,18	192	22,4	0,348	2759,3	Crítico	0,127		

Observa-se que também nesta simulação, para este exemplo, o regime de escoamento predominante na rede foi o turbulento liso, ocorrendo em apenas dois trechos da rede (19 e 20), o regime de escoamento crítico onde o número de Reynolds ficou entre 2000 e 4000, indicando a necessidade de se alterar o diâmetro nestes trechos, de forma a fugir desta região crítica. A velocidade de escoamento da água, foi abaixo de 0,6 m/s em 83,4% da rede, contrariando a recomendação de Bernardo (1982) e Keller e Bliesner (1990) que salientam que abaixo de 0,6m/s os diâmetros são excessivos. Para a pior condição do projeto. O modelo prevê o ponto de funcionamento da moto bomba na altura manométrica de 41,13 mca, onde o rendimento apresentado foi de 46,9%. A perda de carga na linha de distribuição foi de 0,176 metros e na linha lateral de 2,73 metros o que representa uma variação em torno de 10% da pressão de serviço do aspersor. Representando uma homogeneidade de distribuição de água em toda área irrigada, conforme mostra a Figura 5 abaixo.



**FIGURA 5.** Pressão operacional dos aspersores do modelo 2.

**TABELA 17. Dados de entrada referentes ao exemplo de Projeto nº3.**

---

**-Projeto de Irrigação Por Aspersão Sistema Fixo com Tubos Enterrados**

**PROPRIETÁRIO: Dulara Agro-industrial LTDA**

**Cidade: Belo Horizonte**

**Telefone: (031)- 24139 00**

**PROPRIEDADE: Fazenda Eldorado**

**Área: 610 ha**

**Cidade: Corinto - MG**

**-Dados do Solo:**

**-Fertilidade: Média**

**-Uso Atual: Cultura do Milho**

**-Capacidade de Infiltração Básica: 8 mm/h**

**-DADOS DO CLIMA:**

**-O mesmo do exemplo nº 1**

**-DADOS TÉCNICOS DO PROJETO:**

**-Área Irrigada: 10,37 ha**

**-Cultura : Milho**

**-Características do Aspersor:**

**.Fabricante/Modelo----- : ASBRASIL/ZE-30**

**.Bocal ----- : 5 mm**

**.Vazão ----- : 1,50 m<sup>3</sup>/h**

**.Pressão de Serviço----- : 30 mca**

**.Intensidade de Aplicação----- : 4,62 mm/h**

**.Espaçamento entre Aspersores----- : 18 x 18 m**

**-Lâmina de Irrigação:**

.Lâmina Bruta Necessária-----	: 46,20 mm
.Lâmina Útil Aplicada-----	: 34,65 mm
.Lâmina Líquida Disponível por Dia-----	: 4,0 mm
.Eficiência de Aplicação Considerada-----	: 75%
.Turno de Rega -----	: 8 dias
.Período de Irrigação-----	: 8 dias

**-Linha de Recalque:**

.Trecho -----	: Si e S
.Vazão -----	: 30 e 22,5 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 72 e 144 m
.Diâmetro Interno -----	: 70,5 e 70,5 mm
.Diâmetro Externo-----	: 75 e 75 mm
.Pressão no Início -----	: 60 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J) -----	: 6,94 e 3,99 m
.Perda de Carga no trecho (h)-----	: 5,0 e 5,76 m

**-Linha de Distribuição:**

.Trecho -----	: La	e La <sub>1</sub>
.Vazão -----	: 12	e 6,0 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 282	e 174 m
.Diâmetro Interno -----	: 70,5	e 46,7 mm
.Diâmetro Externo-----	: 75	e 50 mm
.Pressão no Início -----	: 28,04	mca
.Perda de carga em metro/metro (J) -----	: 1,228	m
.Perda de carga no trecho (h) -----	: 3,46	m

**-Linha Lateral:**

.Trecho -----	: E
.Vazão -----	: 0,75 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 108 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro Externo-----	: 25 mm
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 1,876 m
.Perda de Carga no Trecho (h)-----	: 2,03 m

**-Ponto do Aspersor:**

.Vazão-----	: 1,54 m <sup>3</sup> /h
.Comprimento-----	: 36 m
.Diâmetro Interno -----	: 22,4 mm
.Diâmetro Externo -----	: 25 mm
.Pressão -----	: 30 mca
.Perda de Carga em metro/metro (J)-----	: 6,764 m
.Perda de Carga no Trecho (h)-----	: 2,43 m

**-Manejo do Sistema:**

.Período de irrigação-----	: 8 dias
.Número total de posições -----	: 320
.Tempo de irrigação por posição -----	: 10 horas
.Número de posições irrigadas / dia-----	: 2
.Área irrigada por aspersor -----	: 0,52 ha
.Número de aspersores em operação-----	: 20

**-Conjunto Motobomba:**

.Marca/Modelo-----	: Jacuzzi/10DL 1.1/2
.Vazão total do sistema -----	: 30 m <sup>3</sup> /h
.Altura manométrica total-----	: 60 mca
.Potência da bomba-----	: 10 HP
.Potência do motor -----	: 12,5 HP
.Diâmetro da sucção-----	: 75 mm
.Rendimento -----	: 65,7%
.Rotor -----	: Não especificado

**-Custo do Sistema:**

.Consumo anual de Energia Elétrica -----	: 27570 Kwh
.Custo Fixo anual-----	: Não informou
.Custo variável anual-----	: Não informou
.Custo total do projeto [ US\$ ]-----	: 13.198,022
.Custo do projeto / hectares [ US\$ ]-----	: 1.319,80
.Custo da Aspersão conv./ha[US\$]-----	: 1147,65



**-Listagem de Aspersores, Tubulação e Acessórios:**

**21 Aspersores conforme especificações anteriores**

**-Tubulação - Linha de Distribuição e Recalque**

Fabricante/Modelo.....Tupy, Tigre/ponta e bolsa soldável  
 130 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 75 mm  
 30 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 50 mm

**.Tubulação- :Linha Lateral**

Fabricante/Modelo.....Tupy, Tigre/ponta bolsa soldável  
 870 tubos de pvc azul PN-80 de 6 metros com diâmetro de 25 mm  
 103 tubos de pvc marrom PN-80 de 6 metros com diâmetro de 25 mm

**-Acessórios**

308 tê de pvc marrom soldável de 25 mm  
 50 cotovelos de pvc marrom soldável de 25 mm  
 309 registros de pvc soldável de 25 mm  
 309 adaptadores de pvc com bolsa e rosca soldável de 25 mm  
 01 tê de pvc marrom soldável de 75 mm  
 31 tê de redução de pvc marrom soldável de 75 x 50 mm  
 33 buchas de redução de pvc soldável de 50 x 25 mm  
 11 tê de redução de pvc soldável de 50 x 25 mm  
 02 joelhos de 90° de pvc soldável de 75 mm  
 01 bomba Jacuzzi modelo 10 DL 1.1/2 - 3500 rpm e 60Hz  
 02 curvas de 45° de pvc soldável de 75 mm  
 01 motor elétrico monofásico de 12,5 c.v. e base  
 01 mangote de sucção completo de 6 m x 75 mm  
 01 registro metálico de gaveta de 75 mm  
 01 válvula de retenção de 75 mm  
 10 tubos de cola grande de 850g para pvc  
 30 folhas de lixa para pvc  
 309 mourões de cerca  
 300 metros de arame nº 14

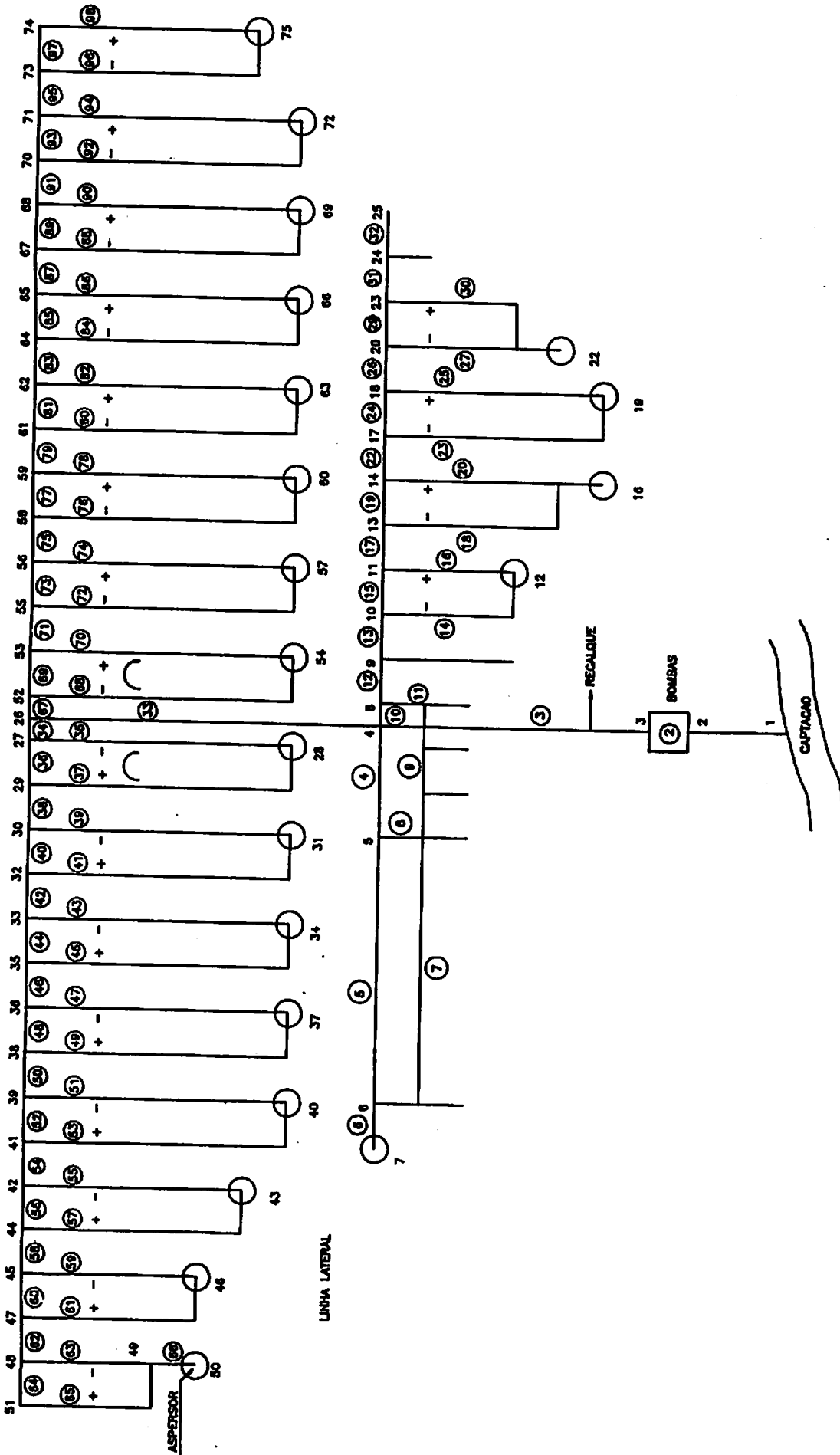


FIGURA 6. Esquema da rede do projeto do exemplo n° 3.

Também para este terceiro caso, entrando com os mesmos dados do projeto no exemplo número 3, a tabela 18 abaixo, dá o resumo da saída dos dados quando simulados no modelo proposto.

TABELA 18. Resultados da simulação do exemplo nº 3, para  $\epsilon = 0,02 \text{ mm}$  e  $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Trecho	Vazão (m/h)	comprimento (m)	Diâmetro (m)	Perda de Carga no trecho (m)	Número Reynolds	Regime de Fluxo	Velocidade (m/s)	Pressão no trecho (mca)	Observações
1	31,525	6	70,5	1,0005	153546	Liso	2,243		
2	31,525							63,27	Bomba
3	31,525	72	70,5	8,5094	153546	Liso	2,433		
4	1,142	45	22,4	1,4334	17493,8	Liso	0,804		
5	0,781	108	22,4	2,4171	11975,2	Liso	0,551		
6	1,501	18	22,4	1,2974	23012,3	Liso	1,058	33,62	aspersor
7	0,72	126	22,4	2,4181	11037,0	Liso	0,508		
8	0,36	18	22,4	0,1057	5518,5	Liso	0,254		
9	0,36	54	22,4	0,0236	2647,0	Crítico	0,122		
10	6,365	9	46,7	0,3668	46799,0	Liso	1,032		
11	0,360	18	22,4	0,1126	5518,5	Liso	0,122		
12	6,005	18	46,7	0,5139	44152,1	Liso	0,974		
13	6,005	18	46,7	0,5139	44152,1	Liso	0,974		
14	0,72	72	22,4	1,5387	11037,1	Liso	0,508		
15	5,285	18	46,7	0,4023	38858,1	Liso	0,857		
16	0,781	54	22,4	1,136	11975,2	Liso	0,551	35,83	aspersor
17	4,504	18	46,7	0,3045	33114,1	Liso	0,73		
18	0,72	90	22,4	1,811	11037,1	Liso	0,508		
19	3,784	18	46,7	0,2207	27820,0	Liso	0,614		
20	0,781	72	22,4	1,5903	11975,2	Liso	0,551		
21	1,501	18	22,4	1,3088	23012,3	Liso	1,058	33,54	aspersor
22	3,002	18	46,7	0,1463	22076	Liso	0,487		
23	0,72	108	22,4	2,1081	11037,1	Liso	0,508		
24	2,282	18	46,7	0,0891	16782	Liso	0,37		
25	0,781	90	22,4	2,019	11975,2	Liso	0,551	34,19	aspersor
26	1,501	18	46,7	0,0424	11038	Liso	0,244		
27	0,781	54	22,4	1,2962	11975,2	Liso	0,551		
28	1,501	18	22,4	1,9025	23012,3	Liso	1,058	32,97	aspersor
29	0,72	18	46,7	0,0115	5294	Liso	0,117		
30	0,72	72	22,4	1,287	11037,1	Liso	0,508		
31	0	18	46,7						
32	0	18	46,7						
33	24,019	144	70,5	5,5339	116987	Liso	1,709		
34	12,01	9	70,5	0,1854	58493,7	Liso	0,855	29,9	aspersor
35	0,781	126	22,4	3,1409	11975,2	Liso	0,551		
36	11,228	18	70,5	0,2467	54688,8	Liso	0,798		
37	0,72	144	22,4	2,8942	11037,1	Liso	0,508		

...continuação da TABELA 18.

38	10,508	18	70,5	0,2198	51181,9	Liso	0,748		
39	0,781	126	22,4	3,1099	11975,2	liso	0,551	29,46	aspensor
40	9,727	18	70,5	0,1894	47377,1	Liso	0,692		
41	0,72	144	22,4	2,9205	11037,1	liso	0,508		
42	9,007	18	70,5	0,1655	43870,3	Liso	0,641		
43	0,781	126	22,4	3,0829	11975,2	Liso	0,551	29,14	aspensor
44	8,226	18	70,5	0,1392	40065,4	Liso	0,586		
45	0,72	144	22,4	2,9437	11037,1	Liso	0,508		
46	7,506	18	70,5	0,1185	36558,5	Liso	0,534		
47	0,782	126	22,4	3,0598	11975,2	Liso	0,551	28,9	aspensor
48	6,725	18	70,5	0,0962	32753,6	Liso	0,479		
49	0,72	144	22,4	2,9636	11037,1	Liso	0,508		
50	6,005	18	70,5	0,0789	29246,8	Liso	0,427		
51	0,781	126	22,4	3,0408	11975,2	Liso	0,551	28,75	aspensor
52	5,224	18	70,5	0,0606	25441,9	Liso	0,371		
53	0,72	144	22,4	2,9802	11037,1	Liso	0,508		
54	4,504	18	70,5	0,0468	21935,1	Liso	0,321		
55	0,781	108	22,4	2,6191	11975,2	Liso	0,551		
56	3,722	18	70,5	0,0327	18130,2	Liso	0,265		
57	0,72	126	22,4	2,5894	11037,1	Liso	0,508		
58	3,002	18	70,5	0,0226	14623,2	Liso	0,214		
59	0,781	90	22,4	2,214	11975,2	Liso	0,551	29,1	aspensor
60	2,221	18	70,5	0,0129	10818,5	Liso	0,158		
61	0,72	108	22,4	2,2011	11037,1	Liso	0,508		
62	1,501	18	70,5	0,0066	7311,7	Liso	0,107		
63	0,781	72	22,4	1,8146	11975,2	Liso	0,551		
64	0,72	18	70,5	0,0017	3506,8	Crítico	0,051		
65	0,72	90	22,4	1,8129	11037,1	Liso	0,508		
66	1,501	18	22,4	1,4173	23012,3	Liso	1,058	28,37	aspensor
67	12,01	9	70,5	0,1846	58493,7	Liso	0,856		
68	0,72	144	22,4	2,963	11037,1	Liso	0,508		
69	11,29	18	70,5	0,2488	54986,8	Liso	0,804		
70	0,781	126	22,4	2,7142	11975,2	Liso	0,551	30,08	aspensor
71	10,508	18	70,5	0,1687	51181,9	Liso	0,748		
72	0,72	144	22,4	2,9295	11037,1	Liso	0,508		
73	9,788	18	70,5	0,1913	43675,1	Liso	0,697		
74	0,781	126	22,4	2,7382	11975,2	Liso	0,551	29,64	aspensor
75	9,007	18	70,5	0,1646	43870,3	Liso	0,642		
76	0,72	144	22,4	2,9002	11037,1	Liso	0,508		
77	8,287	18	70,5	0,108	40363,4	Liso	0,59		
78	0,781	126	22,4	2,7594	11975,2	Liso	0,551	29,32	aspensor
79	7,506	18	70,5	0,1177	36558,5	Liso	0,534		
80	0,72	144	22,4	2,8752	11037,1	Liso	0,508		
81	6,789	18	70,5	0,0976	33051,7	Liso	0,483		
82	0,781	126	22,4	2,7776	11975,2	Liso	0,551	29,08	aspensor
83	6,005	18	70,5	0,0782	29246,8	Liso	0,427		
84	0,72	144	22,4	2,8545	11037,1	Liso	0,508		
85	5,285	18	70,5	0,0618	25740	Liso	0,376		
86	0,781	126	22,4	2,7927	11975,2	Liso	0,551	28,93	aspensor

...continuação da TABELA 18.

87	4,504	18	70,5	0,0462	21935,1	Liso	0,321		
88	0,72	144	22,4	2,8383	11037,1	Liso	0,508		
89	3,784	18	70,5	0,0337	18428,3	Liso	0,269		
90	0,781	126	22,4	2,8046	11975,2	Liso	0,551	28,84	aspersor
91	3,002	18	70,5	0,03	14623,4	Liso	0,214		
92	0,72	144	22,4	2,8239	11037,1	Liso	0,508		
93	2,282	18	70,5	0,0135	1116,8	Liso	0,162		
94	0,781	126	22,4	2,8131	11975,2	Liso	0,551	28,79	aspersor
95	1,501	18	70,5	0,0064	7311,7	Liso	0,107		
96	0,72	108	22,4	2,0573	11037,1	Liso	0,508		
97	0,781	18	70,5	0,002	3804,9	Crítico	0,056		
98	0,781	90	22,4	2,0553	11975,2	Liso	0,551		

Similar aos outros exemplos simulados, também para este caso podemos observar, em quase todos os trechos da rede, a ocorrência do regime de escoamento turbulento liso em baixas velocidades.

Em apenas três trechos da rede o regime foi crítico, com o número de Reynolds ficando entre 2000 e 4000, mostrando a necessidade de se alterar o diâmetro nestes trechos de maneira a sair desta região crítica onde o regime de escoamento não é definido.

A maior velocidade de escoamento da água, foi de 2,24 m/s e a menor velocidade foi de 0,051 m/s, sendo que em 71,4% da rede a velocidade foi abaixo de 0,6 m/s. Contrariando o limite de 0,6 a 2,4 m/s de velocidade admissível nas tubulações, que é recomendado por Bernardo (1982) e Keller e Bliesner (1990) tendo-se em vista o dimensionamento econômico das tubulações. O modelo prevê a ocorrência de baixa velocidade no final da linha de distribuição e na linha lateral onde a vazão é reduzida. A perda de carga na linha de distribuição foi de 1,62 metros e a perda de carga na linha lateral foi

de 3,23 metros, o que resultou numa variação na pressão de operação entre o primeiro aspersor e o último aspersor na linha lateral de 9,9%. E segundo Bernardo (1982), poderia ter uma variação máxima de 20% da pressão de operação do aspersor. Significando que em determinados trechos da rede, poderemos trabalhar com diâmetro abaixo de 22,4 mm.

Para estas pressões obtidas nos aspersores, o ponto de funcionamento do moto bomba atingiu a altura manométrica de 63,27 metros para uma vazão de 31,5 m<sup>3</sup>/h com a bomba apresentando um rendimento de 74%. A figura 7 abaixo mostra a variação de pressão operacional dos aspersores ao longo da rede. Traduzindo também numa distribuição homogênea de água em toda área irrigada.

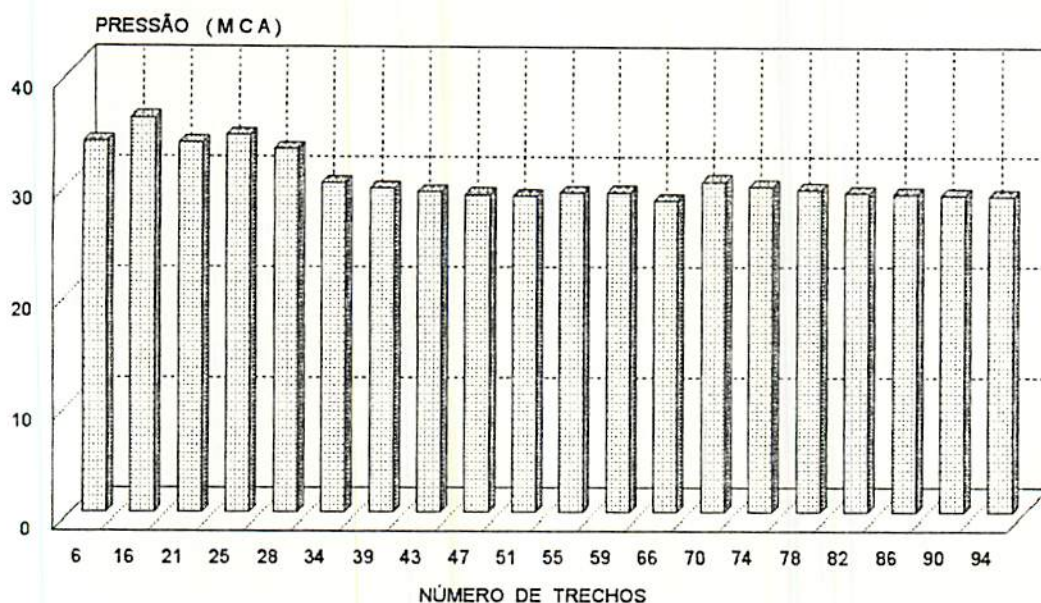


FIGURA 7. Pressão operacional dos aspersores do modelo 3.

## **5 CONCLUSÕES**

Após análise dos resultados, pode-se concluir que o modelo matemático apresentado mostrou ser uma ferramenta eficiente para balanceamento de redes hidráulicas de irrigação por aspersão, permitindo uma análise mais criteriosa através da maior exatidão dos cálculos hidráulicos.

O uso do modelo na análise e no projeto torna-se particularmente importante quando se analisam sistemas de múltiplos elementos pois os diâmetros dos tubos ou suas rugosidades podem ser tratadas como incógnitas além das pressões nos aspersores e vazões.

Como o cálculo é feito para todos trechos da rede, possibilita conhecer a pressão do trabalho dos aspersores em todas as partes da rede, o que é importante para homogeneidade de aplicação da lâmina requerida.

O modelo pode ser empregado por técnicos para novos projetos, permitindo simulações rápidas o que pode resultar no emprego de diâmetros menores, de custo relativamente menor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, N. T. **Análise de Uniformidade da distribuição de água no sistema de irrigação por aspersão em linha.** Viçosa, MG: UFV, 1981. 80p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem).
- ASSY, T. M. **O Emprego da fórmula universal de perda de carga e as limitações das fórmulas empíricas.** São Paulo: CETESB, 1977. 64p.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de; **Manual de hidráulica.** 6 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 333 p.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica.** 7.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1985. v2. 724p.
- ANTUNES, A. J.; MOURTHÉ, H. **Projeto de irrigação por aspersão por tubos enterrados.** Belo Horizonte: EMATER, 1991. 36p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Elaboração de projetos de sistemas de adução de água para abastecimento público: procedimento, NB-591.** Rio de Janeiro, 1977. 118p.
- BASTOS, F. A. A. **Problemas de mecânicas dos fluidos.** Rio de Janeiro, RJ: Ed. Guanabara Koogan. 1983. 483p.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação.** 2.ed. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1982. 463p.
- BEZDEK, J. C.; SOLOMON, K. **Appoximating Friction Factors For Trickle Tubing.** *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, New York, v.104, n.1R4, p.351-359, 1978.
- BERNUTH, R. D. Von; WILSON, T. **Friction Factors For Small Diameter Plastic Pipes.** *Journal of Hydraulics Engineering*, New York, v.115, n.2, p.183-192, Feb. 1989.



- CHRISTIANSEN, J. E. *Irrigation by Sprinkling*. Berkeley: California Agricultural Experiment Station, 1942. 124p. (bulletin, 670).
- CHRISTIANSEN, J. E; DAVIS, J. R. Sprinkler irrigation Systems. In: HAGAN, R. M.; NAISE, N. R.; EDMINSTER, T. W. *Irrigation Agricultural lands*. 1976, p. 885-904.
- COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws, *Journal of the Institution of civil Engineer*, v.11, p.133-156, (ca. 1939).
- CUENCA, R. H. *Irrigation System Design; an engineering approach*. Englewood cliffs: Prentice Hall, 1989. 552p.
- DAKER, A. *A água na Agricultura - Irrigação e Drenagem*. 3.ed Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1970. 453p.
- DOOREMBOS, I; PRUITT, W. O. *Guidelines for Predicting Crop Water requirements*. Roma: FAO, 1977. 144p. (Irrigation and Drainger Paper 24)
- EPP, R; FOWLER, A. G. Efficient Conde for Steady-State Flows in Networks. *Journal of Hydraulics Division*, New York, v.96, n.HY1, p.46-56, 1970.
- FINKEL, H. J. *CRC handbook of irrigation tecnology*. Boca Raton, Florida: CRC, 1982. v.1, 336p.
- GARCEZ, L. M. *Elementos de mecânica dos fluidos e hidráulica geral*. São Paulo: Ed. Edgard Blucler. 1960.
- HOWELL, T. A; BARINAS, F. A. Pressure losses across trickler irrigation fittings and emitters. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v.23, n.4, p.928-933, 1980.
- HUMPHERYS, A. S; LAURITZEN, C. W. Shape factors for hydraulic design of lay-flat irrigation tubing. *Transactions of ASAE*, St. Paul v.5, n.2, p.175-179, 1962.
- KAMAND, F. Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. *Journal of irrigation an drainage, engineering*, New York, v.114, n.2, p.311-323, May 1988.
- KELLER, J; BLIESNER, R. D. *Sprinkler and trickle irrigation*. New York: Van Nostrand, Reinhold, 1990. 652 p.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. *Transations of ASAE*. St. Joseph, v.17, n.4, p.678-684, Jan. 1974.

- KING, H. W.; WISLER, C. O.; WOODBURN, J. O. **Hidráulica**. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico, 1957. 352 p.
- KING, H. W.; WISLER, C. O.; WOODBURN, J. O. **Hidráulica**. Rio de Janeiro, 1945.
- LEME, E. J. A. Uso da equação de Kostiakov para seleção de adequação da intensidade de precipitação de aspersores. *Revista Item*, Brasília, DF, v.31, n.12, p.37-40, 1987.
- LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blucher, Universidade de São Paulo, 1972.
- MANTOVANI, E. C. **Sistema de irrigação e seus componentes**. Viçosa: ABEAS, 1989. 129 p. Módulo 5.
- MERRIAN, J. L.; KELLER, J.; ALFARO, J. **Irrigation system evolution and improvement logan**, Utah, State University, 1973. 368p.
- NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. 2.ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1968. 577p.
- NIKURADSE, J. **Stromungsgesetze in rauhen rohren**. VDI Forschungshet t.361 irrigation laterals. *Irrigation age*, Chicago, p.17-18, 1933.
- OLITTA, A. F. L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1984. 267 p.
- OLIVEIRA, C. A. S.; BERNARDO, S.; VIEIRA, M.; FERREIRA, P. A. Dimensionamento de linhas laterais para irrigação por gotejamento. *Revista Ceres*, Viçosa, v.26, n.146, p.341-351, 1979.
- OLIVEIRA, R. A. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo**. Viçosa, MG: UFV. Imprensa Universitária. 1991. 103 p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola/ Irrigação e Drenagem).
- PAIR, C. H.; HINZ, W. H.; FROST, K. R.; SNEED, R. E.; SCHILTZ, T. J. **Irrigation**, 5.ed. Silver spring, mary land, the irrigation. Association, 1983. n.p.
- PAZ, V. P. S. **Perdas de água e uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. Viçosa, MG: UFV. Imprensa Universitária, 1990. 59p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola/ Irrigação e Drenagem).
- PRANDTL, L. **Essentials of fluid mechanics**. New York: Hafner Publishing, 1952.

- RIBEIRO, A. F. L. Avaliação o do sistema de irrigação por aspersão através do modelo linear. Fortaleza: UFCE, 1982. 89p. (Tese - Mestrado em Irrigação e Drenagem).
- SCALOPPI, E.J. Hidráulica de Tubulações com Múltiplas Derivações. CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7, Brasília, 1986. Anais...Brasília, 1986. v.3, p.1085-1100.
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. Mecânica dos fluidos. 7.ed. São Paulo: MacGran-Hill do Brasil, 1982. 585p.
- SILVESTRE, P. Hidráulica geral. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982. 316p.
- SOARES, A. A. Irrigação localizada e por aspersão. Viçosa, MG, 1991. Módulo 7.1. 97 p.
- SWAMEE. P. K.; JAIN. A. K. Explicit equations for pipe flow problems. Journal of the Hydraulics Division, New York, v.102, n.5, p.657-667, May 1976.
- TIGRE. Tubos e conexões Tigre, Irriga - LP. Boletim de Produtos Joinville, 1990, 31p.
- VARGAS, J. A. Análise do desempenho do sistema de irrigação por aspersão, a nível de parcela, no perímetro irrigado senador Nilo Coelho, Petrolina PE. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1990. 87p. (Tese - Mestrado Engenharia agrícola/Irrigação e Drenagem).
- VON KARMAN, Th. Turbulence and skin friction. Journal Aeronautical Sciences, New York, v.1, n.1, 1934.