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

**Escoamento em regime turbulento aplicado à Irrigação localizada com
microtubos**

Wanderley de Jesus Souza

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

Piracicaba
2008

Wanderley de Jesus Souza
Engenheiro Agrícola

**Escoamento em regime turbulento aplicado à Irrigação localizada com
microtubos**

Orientador:

Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

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

**Piracicaba
2008**

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

Souza, Wanderley de Jesus

Escoamento em regime turbulento aplicado à irrigação localizada com microtubos /
Wanderley de Jesus Souza. - - Piracicaba, 2008.
117 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Irrigação localizada 2. Microtubos 3. Modelos matemáticos 4. Perda de carga I. Título

CDD 631.7

S731e

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

DEDICATÓRIA

A meus queridos pais, quem tanto amo, pelo carinho, apoio e educação a mim concedidos.

À Cristina e Igor, por tudo de bom que sempre foram ao longo desta trajetória.

Às pessoas que em mim depositaram confiança para realização desta obra.

A todos de minha família, que sempre estiveram ao meu lado durante esta jornada.

A todos meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para esta obra.

A todos que tentam cada vez mais edificar um mundo melhor.

Às futuras gerações humanas.

À água, pela expressão que tem para todos os seres do mundo, como fonte de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que se faz onisciente e onipresente em todos os momentos

Ao professor Tarlei Arriel Botrel, pela orientação seguida de sugestões, dedicação, ensinamentos, e, acima de tudo, ser o paizão de todos os momentos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de Pós – Graduação em Irrigação e Drenagem.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio à pesquisa em questão, com a concessão de uma bolsa de estudos.

Aos professores Dr. Décio Cruciani, Dr. Iran José da Silva, Dr. José Antônio Frizzone, Dr. Marcus Vinícius Folegatti, Dr. Rubens Coelho, Dr. Sérgio Nascimento Duarte, Dr. Tarlei Arriel Botrel, pelos ensinamentos e sugestões, que serviram como valiosas ferramentas de auxílio para desenvolvimento desta pesquisa.

À Blasco & Almeida, pela oportunidade de desenvolvimento de parte da pesquisa dentro da empresa e pelo auxílio financeiro.

À Plasnova Tubos, pela concessão de materiais para pesquisa.

À minha querida amiga Cristiane Bani Corrêa, pela valiosa amizade e apoio.

A todos os amigos da Pós - Graduação, pelos valiosos momentos em comum.

À Ceres, Robson, Antônio, Alex, Tiago, Marinaldo, pela amizade e sugestões.

Aos funcionários da ESALQ/USP, pela dedicação e presteza.

A todos que ficaram no anonimato e que contribuíram direta ou indiretamente.

BIOGRAFIA

Wanderley de Jesus Souza, nascido em 26 de Junho de 1983 na cidade de Sabinópolis – MG. Filho de José Leocádio de Souza e Maria Dores de Jesus Souza. Ainda no ensino médio, escreveu os hinos da Escola Estadual Raimundo Deco, e da Escola Municipal Jucelina Sá, ambas situadas na cidade de Materlândia – MG. Aos 15 anos ingressou na Escola Agrotécnica Federal de São João Evangelista – MG, onde obteve o título de Técnico Agrícola em Dezembro de 2001. Em Maio de 2002, aos 18 anos, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Iniciou a carreira científica com projetos de pesquisa na área de manejo e conservação do solo e da água, desenvolvidos durante a graduação. Realizou estágio na EMBRAPA AGROBIOLOGIA na área de Geoprocessamento. Participou de congressos na área de Ciências Agrárias, com apresentação de trabalhos científicos. Foi professor de Química no colégio Alcance de pré- vestibular na cidade de Nova Iguaçu-RJ. Em Março de 2007, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia na área de Irrigação e Drenagem, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP.

As obras realizadas promulgam a idealização de um homem, sendo que as mesmas jamais poderiam ser absolutamente perfeitas quando provindas de um único artífice.

O Autor

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	23
2 DESENVOLVIMENTO	27
2.1 Revisão bibliográfica	27
2.1.1 Irrigação localizada e por gotejamento.....	27
2.1.2 Histórico e potencial no uso da irrigação localizada.....	27
2.1.3 Vantagens	28
2.1.4 Desvantagens	29
2.1.5 Aplicações do método de irrigação localizada.....	30
2.1.6 Características dos componentes do sistema	31
2.1.7 Dissipação de energia em tubos	32
2.1.8 Escoamento em tubulação	34
2.1.9 Hidráulica em linhas laterais.....	37
2.1.10 Microtubos.....	39
2.1.11 Hidráulica de emissores	41
2.1.12 Modelo matemático, modelagem e uso de software na irrigação localizada.....	43
2.1.13 Testes hidráulicos e uniformidade de aplicação da água	46
2.1.14 Avaliação de modelo matemático.....	47
2.1.15 Problemas ocorridos na irrigação por gotejamento	48
2.2 Materiais e métodos	49
2.2.1 Etapas e Localização da pesquisa	49
2.2.2 Microtubos.....	49
2.2.2.1 Diâmetro.....	49
2.2.2.2 Determinação do coeficiente K de dissipação de energia localizada	52
2.2.3 Determinação dos modelos matemáticos para cálculo do comprimento dos microtubos.....	58

2.2.4 Dimensionamento e montagem do sistema de irrigação em campo para avaliação dos modelos propostos.....	63
2.2.5 Fertirrigação com microtubos	68
2.2.6 Análises estatísticas e avaliação dos resultados	71
2.2.6.1 Avaliação dos modelos para dimensionamento de microtubos	71
2.2.6.2 Influência da temperatura da água no desempenho hidráulico	73
2.2.6.3 Avaliação do sistema de irrigação utilizando os modelos propostos	75
2.2.6.4 Avaliação hidráulica do sistema de fertirrigação.....	76
2.2.6.5 Avaliação das plantas estudadas.....	77
2.3 Resultados e discussões	78
2.3.1 Diâmetros dos microtubos	78
2.3.2 Coeficiente K de dissipação de energia localizada na entrada do microtubo	80
2.3.3 Modelos matemáticos desenvolvidos	83
2.3.4 Avaliação dos modelos matemáticos.....	84
2.3.5 Influência da temperatura da água no desempenho hidráulico	88
2.3.6 Avaliação dos sistemas de irrigação projetados com auxílio dos modelos matemáticos	94
2.3.7 Avaliação hidráulica do sistema de Fertirrigação.....	101
2.3.8 Análises das mudas de laranjas cultivadas	104
3 CONCLUSÕES	109
4 SUGESTÕES DE PESQUISA	111
REFERÊNCIAS	113

RESUMO

Escoamento em regime turbulento aplicado à irrigação localizada com microtubos

Realizou – se a presente pesquisa, visando investigar e apresentar um método alternativo de irrigação localizada, com o qual se obtivesse baixo custo e nível tecnológico comparável aos métodos existentes no mercado. Para tanto, desenvolveu-se os modelos matemáticos UNIVERSAL e WSBOTREL, para dimensionamento de microtubos sob regime de escoamento turbulento, onde se inclui as perdas de carga no microtubo, perda de carga localizada e por energia de velocidade na saída do microtubo, sendo que os mesmos foram utilizados no desenvolvimento de um software em planilha de Excel, para projetar linhas laterais com microtubos de comprimentos iguais e variáveis. Os modelos foram avaliados com o dimensionamento de uma linha lateral de irrigação, e tiveram ótimos desempenhos, tendo em vista que os dados coletados proporcionaram vazão média próxima da vazão de projeto, com coeficiente de determinação acima de 98%, excelente uniformidade de distribuição, baixo erro médio absoluto e coeficiente de variação de vazão. Avaliou-se o comportamento da água sob diferentes pressões e temperaturas, e verificou-se que a variação da vazão foi quase nula para uma diferença de temperatura de 3,00 Kelvins. O modelo WSBOTREL foi empregado para projetar um sistema de irrigação, com a proposta de utilizar fertirrigação em mudas de laranja cultivadas em estufa. O sistema ficou sob avaliação durante 160 dias, sendo que no final do ciclo, não foi observado entupimento dos emissores, e, as plantas tiveram alturas e diâmetros do caule iguais às plantas irrigadas de maneira tradicional com mangueiras, conforme procedimento adotado pela empresa, com vantagem de economizar mão de obra e solução utilizada na fertirrigação. Dessa forma, pode-se dizer que o sistema de irrigação com microtubos em regime de escoamento turbulento se mostrou tecnicamente viável para utilização.

Palavras – chave: Irrigação localizada; Microtubo; Perda de carga; Modelo matemático

ABSTRACT

Turbulent flow theory applied to localized irrigation (microtubs)

The present work aims to investigate an alternative method of localized irrigation, with low cost and technological level comparable to nowadays equipments on the market. To do so, it has developed the mathematical models UNIVERSAL and WSBOTREL, for calculating microtubs diameter and length that would work under turbulent flow, where it is considered: head loss in the microtub and localized head loss at extremities. It was development software on a spreadsheet Excel, to design laterals lines with microtubs of similar and variable length. The models were evaluated for calculating the lateral line of irrigation systems, presenting great performance: collected data showed average discharge close to projected discharge, with coefficient of determination of 98%, excellent uniformity of distribution, low mean absolute error and variation coefficient of discharge. It was evaluated the behavior of emitters under different pressures and water temperatures. It was found that the discharge of variation was almost zero for a temperature difference of 3 degree Kelvin. The WSBOTREL model was used to design an commercial irrigation system, with the objective of making use of fertirrigation in nursery citrus plants (greenhouse). The system was under evaluation during 160 days. At the end of the growing cycle, it wasn't observed clogging of emitters, and plants presented similar high and diameter of stem compare to the traditional irrigation method (hoses) according to the procedure adopted by the company, with advantage to reduce hand work and solution used in fertirrigation. The irrigation system with microtub under turbulent zone of flow was technically feasible to use.

Keywords: Localized irrigation; Microtub; Head loss; Mathematic model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo da modelagem apresentado por BIEMBENGUT (1997), na relação entre a Matemática e realidade	45
Figura 2 – Esquema ilustrativo adaptado de BIEMBENGUT (1997), mostrando a dinâmica do processo de modelagem	45
Figura 3 – Bancada de testes para determinação do coeficiente K de dissipação de energia localizada (a), com detalhes da instalação dos microtubos na bancada (b).....	53
Figura 4– Representação esquemática do caminho percorrido pela água desde.....	54
Figura 5 - Ilustração do escoamento da água no sistema com microtubos, do ponto 4 (microtubo 1) até a saída no ponto 3 (microtubo 2).....	59
Figura 6 - Linha lateral com microtubos montada no campo, com detalhe	65
Figura 7- Vista de perfil da linha lateral com microtubos montada no campo	65
Figura 8 – Dimensionamento da linha lateral utilizando o modelo UNIVERSAL	66
Figura 9 – Dimensionamento da linha lateral utilizando o modelo WSBOTREL	67
Figura 10 - Sistema de fertirrigação com microtubos em mudas de laranja, instalado ..	69
Figura 11 – Gráfico apresentando os Valores de K em relação ao número de	80
Figura 12 – Gráfico observado para os Valores de vazão em relação ao número.....	82
Figura 13 - Vazão estimada e observada, utilizando o modelo UNIVERSAL.....	85
Figura 14 - Vazão estimada e observada, utilizando o modelo WSBOTREL.....	85
Figura 15 (a, b) – Variações de vazão estimada e medida nos microtubos Verde e Amarelo, em função de diferentes temperaturas e pressão de operação	89
Figura 16 (a, b) – Variações de vazão estimada e medida nos microtubos Laranja e Azul, em função de diferentes temperaturas e pressão de operação	90
Figura 17 – Resultados estatísticos de uniformidade de distribuição de vazão	92
Figura 18 (a, b) – Resultados estatísticos de coeficiente de variação de vazão (a), e vazão média (b) em diferentes temperaturas de operação	93
Figura 19 (a, b) – Dados de vazão estimada (vazão de projeto) e medidas na linha lateral, utilizando os modelos WSBOTREL e UNIVERSAL, para os microtubos Verde e Amarelo	95

Figura 20 (a, b) – Dados de vazão estimada (vazão de projeto) e medidas na linha lateral, utilizando os modelos WSBOTREL e UNIVERSAL, para os microtubos Laranja e Azul.....	96
Figura 21 (a, b, c) – Resultados estatísticos em função das vazões de projeto e observadas na saída dos microtubos verde(V), amarelo (A), laranja (L) e azul (A), ao longo da linha lateral, utilizando o modelo UNIVERSAL e WSBOTREL.....	98
Figura 22 (a, b, c) – Resultados estatísticos em função das vazões de projeto e observadas na saída dos microtubos verde(V), amarelo (A), laranja (L) e azul (A), ao longo da linha lateral, utilizando o modelo UNIVERSAL e WSBOTREL.....	99
Figura 23 – Vazões coletadas nas quatro linhas laterais instaladas na bancada de mudas de laranja, após 60 dias de instalação	101
Figura 24– Vazões coletadas nas quatro linhas laterais instaladas na bancada de mudas de laranja, após 160 dias de instalação	101
Figura 25 - Comparação entre as vazões coletadas nos dois períodos de teste, após instalação do sistema de fertirrigação, ao longo de todas as linhas laterais.....	102
Figura 26 - Altura atingida pelas mudas de laranja na bancada experimental e testemunha	106
Figura 27 – Diâmetro do caule das mudas de laranja na bancada experimental e testemunha	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores da rugosidade absoluta equivalente de diferentes materiais.....	36
Tabela 2 - Classificação da uniformidade de vazão dos emissores	43
Tabela 3 - Pressões e comprimentos em que foram realizados os testes hidráulicos para determinação do diâmetro interno dos microtubos	51
Tabela 4- Concentração dos minerais utilizados na fertirrigação da laranja	70
Tabela 5 - Pressão na entrada e vazão de projeto na saída do microtubo	73
Tabela 6 - Valores de pressão e temperatura em que foram realizados os testes de vazão nas duas etapas	74
Tabela 7 - Diâmetros dos microtubos utilizando testes hidráulicos em laboratório e projetor de perfil	78
Tabela 8 - Comparação dos diâmetros obtidos pela metodologia utilizando avaliações hidráulicas e projetor de perfil	79
Tabela 9 - Coeficientes K de dissipação de energia para diferentes valores de Reynolds	81
Tabela 10 - Valores de vazão para diferentes números de Reynolds	82
Tabela 11 - Resultado estatístico do erro médio absoluto (EMA) da vazão (Lh^{-1}), dos coeficientes de correlação de Willmott e Pearson e do índice médio de erros (s) em porcentagem, utilizando as vazões estimadas e observadas no funcionamento em campo	86
Tabela 12 - Resultados estatísticos das variações de vazão em função de diferentes temperaturas e pressão	91
Tabela 13 – Resultado estatístico das vazões coletadas nos microtubo nos dois períodos de análise	103
Tabela 14 - Diâmetro (D) do caule e altura (h) atingida pela planta utilizando microtubo e mangueira como métodos de irrigação	104
Tabela 15 - Resultados de média, desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV), mínimo, máximo, moda, mediana, diferença máxima e média, obtidos para os dados de diâmetro do caule e altura das plantas manejadas com microtubo e mangueira	105

LISTA DE ABREVIATURAS & SÍMBOLOS

PVC	-	Poli Cloreto de Vinila
CVF	-	Coeficiente de Variação de Fabricação
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
USDA	-	Soil Conservation Service
EMA	-	Erro Médio Absoluto
KPa	-	Kilopascal
LEPA	-	Low Energy Precision Application
m.c.a	-	Metro de coluna d'água
CV	-	Cavalo
Re	-	Reynolds (adimensional)
Q	-	Vazão (m^3s^{-1})
D	-	Diâmetro da tubulação (m)
ν	-	Viscosidade cinemática do fluido (m^2s^{-1})
π	-	Constante numérica
f	-	Fator de atrito (adimensional)
g	-	Aceleração da gravidade (ms^{-2})
L	-	Comprimento (m)
H_f	-	Energia dissipada nos tubos (KPa)
ε	-	Rugosidade absoluta da parede do tubo (m)
K_r	-	Rugosidade relativa do tubo (adimensional)
σ	-	desvio padrão de uma amostra
Q_m	-	Vazão média de uma amostra de emissores (Lh^{-1})
Q_{min}	-	Média de 25% das menores vazões dos emissores (Lh^{-1})
Q_{max}	-	Vazão máxima de uma amostra de emissores (Lh^{-1})
r	-	Coeficiente de correlação de Pearson
E_i	-	Enésima variável estimada
O_i	-	Enésima variável observada
d	-	Índice de correlação de Willmott
$\bar{o}$	-	Média das variáveis observadas

D_i	-	Diâmetro interno (m)
H	-	Energia de pressão disponível
V	-	Velocidade de escoamento do fluido (ms^{-1})
Z	-	Cota em determinado ponto do projeto (m)
γ	-	Peso específico da água (Kgm^{-3})
P	-	Carga de pressão (m.c.a)
E_v	-	Energia de velocidade
K	-	Constante de dissipação de energia localizada (adimensional)
D_z	-	Diferença de nível entre dois pontos (m)
s	-	Índice médio de erro (%)
CV	-	Coeficiente de variação de vazão (%)
Q		
UD	-	Uniformidade de distribuição das vazões (%)
U_{est}	-	Uniformidade estatística das vazões(%)
L_{1-2}	-	Comprimento do tubo entre os pontos um e dois (m)
L_{2-3}	-	Comprimento do tubo entre os pontos dois e três (m)
GE	-	Grau de entupimento dos emissores (%)
C	-	Comprimento do caule das plantas (mm)
Q_1	-	Vazão dos emissores no primeiro período de testes (Lh^{-1})
Q_2	-	Vazão dos emissores no primeiro período de testes (Lh^{-1})
CV	-	Coeficiente de variação (%)
M	-	Média estatística das vazões (Lh^{-1})
Q_v	-	Vazão obtida no microtubo verde (Lh^{-1})
Q_A	-	Vazão obtida no microtubo amarelo (Lh^{-1})
Q_L	-	Vazão obtida no microtubo laranja (Lh^{-1})
Q_{Az}	-	Vazão obtida no microtubo azul (Lh^{-1})
K_v	-	Coeficiente de dissipação de energia para microtubo verde (adim.)
K_A	-	Coeficiente de dissipação de energia para microtubo amarelo (adim.)
K_L	-	Coeficiente de dissipação de energia para microtubo laranja (adim.)
K_{Az}	-	Coeficiente de dissipação de energia para microtubo azul (adim.)

1 INTRODUÇÃO

A técnica de irrigar (regar) consiste na aplicação de um fluido, utilizando uma metodologia apropriada, de maneira tal que permita a penetração do mesmo em determinada superfície. Em se tratando de solo e plantas, tal técnica pode ser definida como sendo a aplicação de líquidos no solo a uma taxa predeterminada, com objetivos de fornecer à cultura, certa quantidade deste líquido (na maioria das vezes água) e conseqüentemente nutrientes, necessários para seu desenvolvimento quantitativo e qualitativo.

A irrigação cobre atualmente cerca de 18% da área cultivada em todo o mundo responsabilizando pela produção de 44% dos alimentos consumidos pelo homem (FAO 2004). No Brasil, a irrigação é responsável por cerca de 5,5% da área cultivada correspondente a 3,63 milhões de hectares, o que representa em torno de 35% da produção agrícola nacional (ANA, 2004). A importância da irrigação em sistemas agrícolas é claramente perceptível por pessoas ligadas a área agrária, principalmente em função do crescimento demográfico mundial. Atualmente, a cada ano são incorporados à população do planeta Terra, cerca de 75 milhões de seres humanos. Segundo estimativas, em 2050, o planeta deverá abrigar mais ou menos 2,5 bilhões de pessoas excedendo o que possui atualmente, portanto, é de se esperar um aumento na implantação e aperfeiçoamento dos sistemas de irrigação em todo o mundo, principalmente em países em desenvolvimento, tendo em vista a necessidade de suprir alimentos para toda a população e problemas afins. Uma vez sendo crescente a população, temos três problemas interligados que necessariamente deverão ser abordados da melhor maneira possível: a dependência da irrigação na produção agrícola, justificada principalmente pelo fato de cultivos em sequeiro serem insuficientes para atender às necessidades de suprimento de alimentos à população; o aumento do consumo de água que é uma questão ambiental hoje abordada de maneira bastante delicada, afetando na concessão de outorga do uso da água; e os elevados custos na aquisição de equipamentos, principalmente de irrigação localizada. Este último ocorre de maneira considerável em países em desenvolvimento, onde empresas multinacionais e/ou nacionais atuam vendendo kits de irrigação pré-dimensionados utilizando tecnologia importada, o que encarece o custo de aquisição pelo produtor.

No Brasil a implantação de sistemas de irrigação vem evoluindo ano após ano. Dados apresentados por CHRISTOFIDIS (2007) mostram que em 1980 a área irrigada era de aproximadamente 1,60 milhões de hectares, em 2004 esse valor subiu para 3,63 milhões, sendo que para 2020 a previsão é de 5,65 milhões de hectares irrigados. Diante das situações mencionadas, percebe-se a importância de se desenvolver técnicas de irrigação apropriadas, que sejam mais eficientes na utilização dos recursos hídricos, e contribua para obtenção de alta produtividade das culturas.

Dentre os métodos utilizados, a irrigação localizada é o que mais cresceu nos últimos anos, em função da maneira racional do uso da água (AIROLD, 2003). Entretanto, os microtubos podem ser uma alternativa viável para tal método, podendo ser utilizados tanto por pequenos como grandes produtores a baixo custo. Isso é ainda mais relevante nos países em desenvolvimento, onde a relação custo/benefício na implantação de sistemas de irrigação é elevada em função da importação de tecnologias, conforme já referido.

Apesar de o microtubo ter sido precursor na irrigação como gotejador de longo percurso, o Brasil ainda carece de estudos a seu respeito. Entretanto, devido à falta de informação e aprimoramento técnico, sua utilização foi repudiada por muito tempo, tendo sido observados alguns entraves operacionais, como por exemplo, entupimentos, que podem ser causados por vários motivos tanto físicos quanto químicos e/ou biológicos. Além disso, existem alguns fatores relevantes que devem ser considerados na sua utilização, para que se obtenha precisão na estimativa da vazão necessária. Estes fatores são: fração da energia cinética (coeficiente K) devido à passagem do líquido de uma zona de maior área transversal para dentro do microtubo, que resultará na dissipação pontual de energia, tecnicamente conhecido como perda de carga localizada (H_f Localizado), dissipação de energia devido à velocidade de saída do líquido (E_v) e à passagem dentro do microtubo (H_f tubo), uma vez que os outros parâmetros utilizados na equação que descreve a dissipação de energia ao longo do percurso do fluido são conhecidos (SOUZA 2005). Entretanto, a determinação destes fatores pode ser feita em laboratório, com auxílio de equações básicas já consagradas na hidráulica, podendo ser utilizada a equação universal.

Para que a vazão do microtubo seja estimada com precisão, é necessário que se utilize um modelo matemático que correlacione vazão, pressão na entrada do microtubo, comprimento e diâmetro. Este último é extremamente importante que seja determinado com alta precisão, pois uma pequena variação poderá acarretar diferença bastante significativa na vazão de saída do emissor. Esta variação será ainda maior quando se trabalha em regime turbulento, ou seja, Reynolds (Re) acima de 4000, onde a vazão no microtubo é elevada.

A operação em regime turbulento permite o emprego dos microtubos para irrigação localizada com ou sem aplicação de fertilizantes, e possibilita o funcionamento em sistemas de microaspersão. Dessa forma, uma vez que o entupimento tenha sido considerado como uma questão de entrave em regime laminar, em regime de escoamento turbulento passa a não ser mais problema de limitação do uso dos microtubos.

Além de testes em laboratório, é necessário um acompanhamento em campo do comportamento hidráulico do sistema de irrigação para maiores conhecimentos a respeito do funcionamento dos microtubos. Para tanto, um correto levantamento de dados de entrada para dimensionamento de projetos é essencial na acurácia dos resultados finais.

Diante do exposto, pretendeu-se com esta pesquisa, fornecer embasamento científico-técnico para o desenvolvimento de um método alternativo de irrigação com microtubos operando em regime turbulento, tendo em vista a redução de custos, contribuindo para melhoria das técnicas de manejo e conservação do meio ambiente, com alta tecnologia em irrigação localizada, onde se teve os seguintes objetivos:

- ✓ Desenvolver e apresentar um modelo matemático para dimensionamento de microtubos operando sob regime turbulento, utilizando os dados de dissipação de energia localizada, dissipação de energia no microtubo e energia de velocidade em função da vazão na saída do microtubo;
- ✓ Realizar testes hidráulicos e analisar a influência da variação da temperatura no desempenho do sistema e na vazão dos microtubos;

- ✓ Desenvolver um software para dimensionamento de microtubos utilizando o modelo matemático proposto;
- ✓ Realizar o dimensionamento e implantação de um sistema de fertirrigação utilizando microtubos para irrigação localizada pressurizada e apresentar a viabilidade técnica operacional.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Irrigação localizada e por gotejamento

Um dos grandes problemas da irrigação são as perdas excessivas na condução, distribuição e aplicação. Portanto, é aconselhável que se dê preferência por sistemas pressurizados de irrigação que utilizem a água de uma forma mais eficiente possível, como a irrigação localizada (gotejamento, microaspersão) e pivô central com sistema LEPA (Low Energy Precision Application), CARVALHO (2004).

A irrigação localizada é um método de aplicação de água no solo diretamente sobre a zona radicular da cultura, com pequenas intensidades e alta frequência, o que permite manter a umidade do solo sempre próximo à capacidade de campo. Por vários anos esta técnica vem sendo praticada tanto em pequenas como em grandes escalas, sendo que no Brasil a irrigação localizada por gotejamento foi introduzida efetivamente a partir de 1975 (OLIVEIRA, 1978). Com a utilização do método de irrigação por gotejamento, permite-se a irrigação de uma porção da superfície do solo, possibilitando a formação de bulbos ou faixas molhadas, por meio de gotejadores instalados em um tubo, em geral de polietileno liso, e espaçados entre si, em função da cultura implantada. Os sistemas geralmente são fixos, existindo tantas linhas laterais quantas forem necessárias para suprir toda a área; porém, apenas determinado número de laterais funciona simultaneamente, com objetivo de atenuar a capacidade do cabeçal de controle (BERNARDO, 1995), da malha hidráulica e do bombeamento.

2.1.2 Histórico e potencial no uso da irrigação localizada

A irrigação localizada desenvolveu-se principalmente nas décadas de 60 e 70 do século XX, embora já fosse praticado este conceito utilizando alguns sistemas que operavam aplicando baixas vazões localizadas no sistema radicular das culturas, desde o início do mesmo século. Este foi o método com maior crescimento na área irrigada no Brasil entre os períodos de 1996 a 2001, passando de 4,24% para 7,89% (CHRISTOFIDIS, 2002b). Este crescimento tende a avançar ainda mais, tendo em vista

os problemas ligados a questões de preocupação com o meio ambiente além da cobrança pelo uso da água decorrente da Lei das Águas (Lei 9.443 de janeiro de 1997), e da maior facilidade de crédito para aquisição de equipamentos e de licenciamento ambiental pelos proprietários que assim o desejam.

Em relação a empreendimentos novos, o órgão responsável pelo licenciamento expedir há licença prévia, licença de instalação e licença de operação, sendo classificados em categorias de acordo com a dimensão e o método de irrigação utilizado, priorizando os projetos que incorporem equipamentos e métodos mais eficientes, BONGANHA (2001).

2.1.3 Vantagens

As principais vantagens do sistema de irrigação localizada segundo BERNARDO (1995), VERMEIREN E JOBLING (1997) e DAKER (1983), são:

- Maior eficiência no uso da água: permite melhor controle da lâmina aplicada, diminui as perdas por evaporação, por percolação ou por escoamento superficial, não irriga entre as linhas de plantio.

- Maior produtividade: para culturas que respondem à maior umidade no solo.

- Maior eficiência na adubação: permite a fertirrigação e, em razão de concentrar o sistema radicular da cultura junto ao bulbo molhado, facilita a aplicação do adubo por cobertura.

- Maior eficiência no controle fitossanitário: não molha a parte aérea das plantas, nem irriga as plantas daninhas.

- Não interfere nas práticas culturais: como não molha toda a faixa entre as fileiras, é possível a execução das práticas culturais antes, durante e após as irrigações.

- Adapta-se a diferentes tipos de solo e topografia: como a intensidade de aplicação de água é pequena, este método adapta-se melhor a diferentes tipos de solo e topografia.

- Pode ser usado com água salina ou em solos salinos: como a frequência de irrigação é alta, a umidade no bulbo é sempre alta, mantendo a concentração de sais diluída dentro do bulbo e maior na sua periferia.

- Economia de mão-de-obra: por se tratar de sistemas fixos, há uma economia de mão-de-obra quando comparada com sistemas convencionais de irrigação por aspersão e superfície.

- Redução dos gastos de energia: a pressão necessária para a irrigação localizada é em geral igual a 50,0 – 70,0% daquela necessária para a irrigação por aspersão clássica, permitindo instalação de menores potências. Portanto, é necessário que haja muito cuidado na elaboração dos projetos para que as vantagens teóricas do sistema se tornem realidade, pois com objetivo de reduzir o custo de aquisição, muitos projetos operam com pressões comparadas às dos sistemas por aspersão convencional, principalmente quando utilizam emissores autocompensantes, distorcendo o princípio do método.

- Automação: pode-se, por meio de sensores de umidade de solo, medidores de volume e de tempo, iniciar ou finalizar um turno de irrigação automaticamente.

2.1.4 Desvantagens

As principais desvantagens do método, segundo BERNARDO (1995), VERMEIREN E JOBLING (1997) e DAKER (1983), são:

- Entupimento: como os orifícios de saída dos emissores são pequenos (0,5 a 1,5mm), em razão da baixa vazão, o sistema exige boa filtragem para assegurar uma qualidade mínima de água. Porém, o depósito de argila e silte em suspensão na água, a precipitação de sais e íons e o desenvolvimento de microrganismos dentro da tubulação caso não sejam tomadas medidas técnicas preventivas, podem provocar entupimento.

- Distribuição do sistema radicular: tende a concentrar-se na zona úmida do solo, reduzindo sua área de abrangência;

- Salinização do solo: as aplicações de água e adubo são realizadas em apenas uma porção da área de exploração da cultura, em regiões de baixa precipitação pluviométrica esse risco se acentua;

- Controle atmosférico: a irrigação localizada não permite “proteger” as culturas do frio e das geadas;

- Custo de aquisição: os sistemas de irrigação localizada possuem custo de aquisição mais elevado em comparação aos outros métodos de irrigação para as mesmas condições de projeto, principalmente por se tratar de materiais importados.

- Manejo: um sistema de irrigação localizada não deve permanecer por um tempo prolongado (mais de um mês) sem funcionamento; isto promove um conjunto de problemas que podem inviabilizar o funcionamento do sistema. Ao desligar a irrigação, seja durante o período das chuvas ou durante os períodos de estresse hídrico, no caso da cafeicultura e da citricultura, por exemplo, os microorganismos dentro do sistema encontram condições ideais para seu desenvolvimento e formam grandes placas de colônias ou filamentos, que ao reiniciar o período de irrigação se desprendem da tubulação e entopem os emissores, emperram as válvulas e obstruem a malha de microtubo.

2.1.5 Aplicações do método de irrigação localizada

Os sistemas de irrigação localizada se apresentam de forma eficiente no fornecimento de água às culturas, conforme nos traz a literatura. Com o mesmo, é possível aplicação de produtos químicos e fertilizantes com reduzida mão-de-obra, fornecimento de água somente na área efetivamente ativa da cultura, e ainda, elevada possibilidade de automação do sistema. Por outro lado, suas principais limitações são os riscos de obstrução parcial ou total dos emissores, principalmente quando se trata de gotejamento, e o elevado custo inicial, (SAAD, 1993). Inicialmente a aplicação deste método se deu para culturas altamente produtivas e em pomares implantados em regiões de escassez hídrica (MAIA 1994). Entretanto, atualmente a utilização deste sistema pode ser encontrada para várias culturas mesmo em regiões onde a água não é escassa (HOLZAPFEL et al., 1990).

A expansão da irrigação localizada se deve às vantagens que são oferecidas em relação a outros sistemas como é o caso da eficiência no uso da água, acréscimo de produtividade, redução de mão-de-obra e custos com energia, etc.

Os sistemas de irrigação localizada estão cada vez mais, voltados para o mercado exigente que requer menores custos de implantação e facilidade de operação,

essa exigência torna-se necessária também no que diz respeito à otimização do uso da água, devido às condições em que se depara o planeta, com problemas de escassez hídrica, fato este constatado atualmente por vários cientistas.

2.1.6 Características dos componentes do sistema

Os componentes do sistema segundo DAKER (1983), BERNARDO (1995) e VERMEIREN E JOBLING (1997) são: conjunto Moto-Bomba, cabeçal de controle, rede de distribuição e emissores.

O conjunto moto-bomba, responsável pela pressurização do sistema, geralmente é do tipo centrífuga de eixo horizontal movida à energia elétrica ou motor a diesel.

O cabeçal de controle é constituído de sistema de filtragem (filtros de areia, tela, disco, mantas não tecidas, separadores de sólidos), com limpeza automática (diferencial de pressão ou tempo) ou manual; medidores de vazão são de fundamental importância, pois permitem identificar problemas de entupimento; válvulas de controle de pressão e vazão permitem automação do sistema; sistema de injeção de fertilizantes; sistema de automação; sistema de segurança: composto por válvulas ventosas e válvulas de alívio de pressão e antecipadoras de golpe de Aríete.

A rede de distribuição do sistema se compõe da seguinte maneira: tubulação principal e suas ramificações (secundárias e/ ou terciárias), responsáveis por conduzir a água da moto-bomba às tubulações de derivação, podendo ser de PVC (Poli Cloreto de Vinila), polietileno de alta ou média densidade, aço galvanizado ou zincado e fibrocimento entre outros; tubulações de derivação, responsáveis pela distribuição da água para as tubulações laterais, geralmente são de PVC ou polietileno de alta e média densidade; tubulações laterais que são responsáveis por distribuir a água para os emissores, na maioria dos casos são de polietileno de baixa densidade, com exceção de algumas instalações que utilizam PVC de pequeno diâmetro (estufas e viveiros de mudas).

Os emissores constituem a parte essencial da instalação. Eles derivam a água a pequenas vazões e pressão constante podendo ser gotejadores, microaspersores, orifícios de pequena vazão e microtubos.

2.1.7 Dissipação de energia em tubos

Sempre que um líquido escoar no interior de um tubo fechado de um ponto para outro, haverá uma transformação energética, aqui denominada “dissipação” de pressão ou de energia. Na verdade, a palavra dissipação, é somente para melhorar o entendimento hidráulico, pois, o que ocorre é a transformação da energia em formas diferentes, o termo dissipação ou perda, utilizado em Hidráulica de fluidos é aplicado em função de que ao final do processo de escoamento dentro da tubulação, a energia inicialmente imposta foi transformada em outra forma de energia. Sobretudo, sabendo-se que a energia não pode ser criada nem destruída, a transformação de determinado tipo de energia, necessariamente deverá ser compensada com redução ou acréscimo de outro tipo, mantendo balanceado o sistema. Entretanto, esta transformação de energia mais comumente chamada de perda ou dissipação, se define como sendo a quantidade de energia dissipada por unidade de peso e ocorre devido à mudança de direção do fluxo na tubulação; ao atrito com as paredes do tubo, e é influenciado pela viscosidade do líquido em escoamento (SILVESTRE 1979). Quanto maior for a rugosidade da parede da tubulação, isto é, a altura das asperezas, maior será a turbulência do escoamento, logo, maior será a “dissipação” de energia. Há cerca de dois séculos, estudos e pesquisas vêm sendo realizados, procurando estabelecer leis que possam reger a dissipação de energia em condutos fechados. Várias fórmulas empíricas foram estabelecidas no passado e algumas empregadas até com alguma confiança em diversas aplicações de engenharia, como as fórmulas de Hazen-Williams, de Manning e de Flamant. Mas, trabalhos de diversos investigadores têm mostrado que, em sua totalidade, são mais ou menos incorretas. A incorreção dessas fórmulas é tanto maior quanto mais amplo é o domínio de aplicação pretendido por seus autores, por conseguinte, atualmente a expressão mais precisa e usada universalmente para análise de escoamento em tubos, que foi proposta em 1845, é a conhecida equação de Darcy-Weisbach, (TULLUS, 1989).

A dissipação total de energia é considerada como a soma das energias dissipadas ao longo de todo o processo de escoamento, entretanto, ela se divide em distribuídas e localizadas. A dissipação distribuída se deve aos efeitos do atrito no

escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante. Entretanto, a localizada se deve aos vários acessórios que uma tubulação deve conter como: válvulas, registros, luvas, conexões, etc. No escoamento turbulento completamente desenvolvido, a queda de pressão (ΔP), devida ao atrito, num tubo horizontal de área constante, depende do diâmetro do tubo (D), do seu comprimento (L), da sua rugosidade (ϵ), da velocidade média do escoamento (V), da densidade (ρ), e da viscosidade cinemática (μ), do fluido. No escoamento turbulento não se pode avaliar a queda de pressão analiticamente, devemos recorrer a dados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los.

KHATRI, et al., 1979 comentam que as “perdas” menores ou perdas devido à velocidade de escoamento e localizadas podem ser significativas quando o comprimento é grande e o diâmetro do tubo é relativamente grande, portanto, em projetos isso muitas vezes é negligenciado, com isso, ocorre muitos erros.

Quando estudamos microtubos, estamos trabalhando com micro diâmetros, portanto, além de considerar a dissipação de energia nos tubos de linhas principais de alimentação do sistema de irrigação, temos também que analisar a energia dissipada dentro do microtubo ao longo de seu comprimento e na inserção do mesmo, sendo que neste último caso, seu valor é expresso geralmente em função de um coeficiente K , vazão na saída do microtubo e da aceleração da gravidade. Esta dissipação na inserção (localizada) ocorre no momento da passagem do fluido de um tubo com maior área de seção, para dentro do microtubo. A explicação física e hidráulica para a dissipação localizada na inserção é de que como a parede do microtubo é bastante espessa comparada ao diâmetro, podendo ser até mesmo maior que o próprio diâmetro em alguns tipos de microtubos, e o fluido, geralmente água, passa de um diâmetro maior para outro menor, o atrito com a parede do microtubo, que ocorre no momento de passagem é grande, ocasionando dissipação (transformação) da energia de pressão, em energia de velocidade naquele ponto, forçando o fluido a entrar no emissor, em função da energia de pressão imposta.

2.1.8 Escoamento em tubulação

O fluxo de um fluido pressurizado pode ser caracterizado em função da faixa de regime de escoamento em que se encontra, podendo ser laminar ($Re < 2000$), zona crítica de transição ($2000 < Re < 4000$) ou turbulento ($Re > 4000$) VERMEIREN E JOBLING (1997). O critério base para distinguir os regimes foi determinado por Reynolds (Re), que lhe adicionou seu nome, e é expresso pela eq. (1).

$$Re = 4 \frac{Q}{\pi D \nu} \quad (1)$$

Em que:

- D = diâmetro interno da tubulação (m);
- Q = vazão, ($m^3 s^{-1}$);
- ν = viscosidade cinemática ($m^2 s^{-1}$).

A viscosidade cinemática é uma característica do fluido que exerce influência na energia necessária para efetuar o transporte de um líquido pressurizado a um determinado fluxo, e depende da temperatura deste líquido. Existem diferentes equações que estimam a quantidade de energia dissipada dentro das tubulações, todas, dentro de suas limitações podem fornecer bons resultados, oferecendo até mesmo praticidade nos cálculos, porém, sua aplicação se limita às condições para a qual as mesmas foram desenvolvidas. A equação de Darcy-Weisbach é a fórmula universal de cálculo de dissipação de energia dentro de tubulações, podendo ser aplicada para quaisquer situações na condução de fluido, pois, os parâmetros que variam na equação estão inseridos genericamente na mesma e não são para uma condição específica. Ela expressa o valor da energia necessária para conduzir determinado fluido a uma vazão predeterminada, conforme apresentado pela eq. (2):

$$Hf = \frac{8fQ^2L}{\pi^2gD^5} \quad (2)$$

Em que:

- Hf = energia dissipada ou “gasta” (mca);
 f = coeficiente de atrito em função do regime de escoamento (adimensional);
 D = diâmetro interno da tubulação (m);
 L = comprimento da tubulação (m);
 Q = vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);
 g = aceleração da gravidade (ms^{-2}).

O fator de atrito f depende do número de Reynolds, que por sua vez depende do regime de escoamento do fluido dentro da tubulação, e da rugosidade relativa da tubulação, representada pela eq. (3):

$$Kr = \frac{\varepsilon}{D} \quad (3)$$

Em que:

- Kr = rugosidade relativa da tubulação;
 ε = rugosidade absoluta ou altura das asperezas nas paredes do conduto (m).

A Tabela 1 apresenta os valores da rugosidade absoluta equivalente para os principais materiais utilizados em projetos de condução de água.

Tabela 1- Valores da rugosidade absoluta equivalente de diferentes materiais

Material	Rugosidade absoluta equivalente
	ϵ (mm)
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado moderadamente oxidado	0,40
Aço galvanizado sem costura	0,06 a 0,15
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido velho	3,00 a 5,00
Concreto com acabamento normal	1,00 a 3,00
PVC, plásticos em geral, tubos	0,0015 a 0,010

Fonte. Adaptado de Porto, 2001.

Segundo PORTO (2001), a rugosidade da tubulação, normalmente é apresentada em tabelas para diversos materiais. Seus valores variam dependendo do tipo e estado de conservação do material, entretanto, uma alteração da superfície da parede do tubo pode ocasionar diferentes valores de f , exigindo bom senso do projetista.

Quando o regime é laminar, f é função apenas do número de Reynolds e independe da rugosidade (ϵ), nesse caso o seu valor é dado pela eq.(4) de Hagen-Poiseuille (CRUCIANI, 1996):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Entretanto, quando o regime é turbulento, f passa a depender do Número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa (ϵ), até chegar ao extremo de depender exclusivamente da rugosidade relativa, quando o regime é fortemente turbulento (CRUCIANI, 1996).

Para a situação de tubos rugosos e regime turbulento, o fator f pode se determinado por meio das fórmulas desenvolvidas por Colebrook-White (5) e pela equação analítica correspondente ao Diagrama de Moody (6) conforme a seguir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D}\right) + \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (5)$$

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20000 \frac{\varepsilon}{D} + 1x \frac{10^{-6}}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (6)$$

Para a situação de condutos rugosos e turbulência completa, o fator f pode ser determinado pela equação (7), de Nikuradse.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2\log\left(\frac{2\varepsilon}{D}\right) \quad (7)$$

Trabalhando-se com condutos lisos e regime turbulento, quando a rugosidade da parede (ε) é menor que a espessura da camada limite o coeficiente de atrito f é expresso pela equação de Blasius (8):

$$f = 0,316Re^{-0,25} \quad (8)$$

A introdução do fator de atrito (f) de Blasius, na equação de Darcy-Waisbach, permitiu fornecer estimativas precisas das perdas por atrito produzidas por regime turbulento dentro de tubulações uniformes com paredes pouco ásperas e quando Reynolds se encontra na faixa entre 3.000 e 100.000, JUANA (2002). O autor ainda afirma que nesta condição de regime de escoamento, é realizada a maioria das irrigações localizadas, e acrescenta dizendo que em grande número de particularidades, há tendência de instabilidade no regime dentro dos tubos.

2.1.9 Hidráulica em linhas laterais

Em sistemas de irrigação localizada, é importante se determinar a energia dissipada na linha lateral, para tanto, o diâmetro, comprimento, declividade na linha lateral, vazão dos emissores devem ser considerados (SILVA 1984). A relação entre pressão e vazão, a dissipação de energia na linha lateral e no gotejador e o percurso da

água no gotejador, constituem as características hidráulicas que influenciam diretamente no desempenho do sistema de irrigação (VIEIRA 1996). Nos microtubos, importante fator a ser considerado é a dissipação de energia localizada, sendo que a mesma pode apresentar valores totalmente diferenciados, quando se trabalha em diferentes regimes de escoamento, com variação de Reynolds. OLIVEIRA (1978), trabalhando com microtubos, separou a energia dissipada continuamente das localizadas e verificou que o valor da energia localizada dissipada ou gasta, reduziu quando se aumentou o número de Reynolds.

Estudando as características hidráulicas de tubos de polietileno de diâmetro nominal igual a 3/8", perfurados manualmente, SILVA (1984) observou que a energia dissipada na linha de testes sem orifícios foi igual à na linha de testes com orifícios vedados, concluindo não ocorrer dissipação de energia devido à inserção do microtubo.

SOARES (1981) trabalhando com microtubos Cipla de 1,0 mm de diâmetro encontrou dissipação de energia localizada devido à inserção dos microtubo, praticamente desprezível.

O principal problema apresentado no funcionamento do sistema de irrigação localizada em condições diferenciadas de operação do projeto original é o acréscimo da pressão na malha hidráulica do sistema, que poderá reduzir a vida útil da tubulação de PVC no campo, promovendo a ruptura de tubulações CARVALHO (2004). O autor complementa dizendo que a utilização de válvulas hidráulicas de controle, principalmente na saída do cabeçal de filtragem, que propiciam uma determinada pressão a jusante desse ponto, tem sido a opção técnica mais utilizada em campo; embora seja uma alternativa do ponto de vista hidráulico para garantir a integridade da malha hidráulica, do ponto de vista energético não deve ser incentivado, pois propicia desperdício de energia elétrica / diesel, sendo que o controle da rotação e / ou o desligamento parcial do(s) conjunto(s) moto-bomba são as opções técnicas mais eficientes.

A resistência a pressão das mangueiras utilizadas em irrigação não são infinitas. Em função da característica elástica apresentada pelo material do tubo, com o aumento de pressão, pode ocorrer aumento do diâmetro. Esse aumento ocorrerá até certa

pressão operação, a partir da qual a parede do tubo se compromete devido ao limite plástico de resistência à pressão atuante no material, podendo chegar à ruptura.

Trabalhando com o tubo gotejador “Queen Gil”, TESTEZLAF E CAMPIONE (1993), determinaram as pressões necessárias para sua ruptura. Utilizando diferentes comprimentos de tubo gotejador, encontraram uma pressão de ruptura de 39 mca.

VEIRA (1996) identificando as características hidráulicas do tubo gotejador Rain - Tape TPC, verificou influencia da pressão sobre o diâmetro interno da tubulação, ou seja, aumento do diâmetro com o aumento de pressão.

2.1.10 Microtubos

Os gotejadores, segundo SCHMIDT (1995), se classificam de acordo com o princípio de funcionamento como:

- Gotejadores com câmara de vórtice (câmara simples e múltipla);
- Gotejadores com orifício de saída (orifício simples, saída dupla, membrana com orifícios);
- Gotejadores de longo percurso que é o caso dos labirintos, microtubos, etc.

Os microtubos são emissores de plástico de 0,50 a 2,00 mm de diâmetro, de longo percurso, inseridos na tubulação de linha lateral geralmente de polietileno. Seu custo é reduzido em relação a outros emissores, devido ao tipo de material, diâmetro, espessura e processo de inserção do emissor, além de fácil transporte e instalação (VIERIA, 1996). Este é mais um sistema alternativo de irrigação localizada e vem surgindo no mercado visando reduzir custos e manter as características de qualidade e condições adequadas de funcionamento dos sistemas de irrigação. Com o mesmo é possível obter a liberação de uma pequena quantidade de água para irrigação, em função da energia que dissipa ao longo de seu comprimento, sendo que seu diâmetro e comprimento podem ser selecionados para diferentes vazões. Entretanto, este equipamento é sensível a entupimentos e variação de temperatura e pressão da água SOARES (1981), isso pode ser verificado em regime de escoamento laminar (Souza 2005).

As características hidráulicas dos emissores em irrigação localizada constituem-se na relação vazão versus pressão na entrada, na uniformidade de fabricação, na

uniformidade de distribuição d'água ao longo do seu raio (NASCIMENTO, 1999). No entanto, tais características bem como a quantidade de água aplicada ao longo da linha lateral, são informações de primordial importância para o dimensionamento de um sistema de irrigação localizada e para um manejo racional de água, uma vez que os emissores são um de seus componentes mais importantes, elas podem ser obtidas por meio de testes hidráulicos efetuados em laboratório e avaliações realizadas em campo. Portanto, estas informações devem estar disponíveis aos projetistas e usuários deste método de irrigação.

A variação de fabricação do emissor é um importante fator que influencia nos valores do coeficiente de descarga, na uniformidade de distribuição de água e, conseqüentemente, a eficiência do sistema (SOLOMON, 1979). KELLER E KARMELI (1974), SOLOMON E KELLER (1978) e BRALTS et al. (1981), introduziram o conceito do coeficiente de variação de fabricação (CVF) como uma medida estatística para avaliar a variação de fabricação dos emissores. Esse coeficiente tem sido também, utilizado para avaliar a variação de fluxo do emissor ao longo de uma linha lateral de irrigação localizada (BRALTS et al., 1981). Segundo esses autores é praticamente impossível a fabricação de um grupo de emissores com o mesmo coeficiente de descarga. Entretanto, PIZARRO CABELLO (1987) afirma que as características dos microtubos devem ser determinadas experimentalmente, pois, em nível de projeto, a vazão deverá ter precisão, no entanto, o diâmetro fornecido em catálogo pode em alguns casos não ser exatamente o que diz o fabricante devido a variações que podem ocorrer no processo de fabricação.

Considerando o processo de instalação e baixo custo no processo confecção/instalação, as linhas laterais com emissores do tipo microtubo de tamanhos variados, estando bem dimensionados, podem ser utilizados em sistema localizado, podendo-se obter razoáveis níveis de uniformidade de distribuição de água (SILVA et al., 1988)

Para tanto, com os avanços tecnológicos, é possível a utilização de métodos computacionais no qual se introduza modelos matemáticos que representem as energias dissipadas no processo de condução de um fluido em microtubos, baseando-se nos princípios da hidráulica, em função de experimentos em laboratório e campo,

envolvendo pressão e vazão. Segundo VERMEIREN E JOBLING (1980), a relação entre vazão, comprimento, energia piezométrica e diâmetro interno do microtubo, podem ser representadas em uma só equação.

2.1.11 Hidráulica de emissores

A variação de vazão entre o primeiro e último emissor na linha lateral geralmente é limitada, visando otimizar o sistema de irrigação. Isso é definido principalmente para que se tenha maior uniformidade de aplicação, estando o valor desta variação na faixa de 10 a 20%, assim, utilizando-se emissores com vazão constante, torna-se possível dimensionar sistemas com linhas laterais mais longas, o que contribui para abatimento no custo do sistema de irrigação (VIEIRA 1996). Esta variação de vazão pode ser reduzida quando se utiliza sistemas de irrigação por gotejo com pressões mais elevadas, onde ocorre grande dissipação de energia no gotejador ou emissor, oferecendo condições para melhores uniformidades de vazão dos emissores (MAYERS E BUCKS 1972).

BOTREL (1984) comenta que grandes diferenças de vazão a uma mesma pressão podem ser provocadas por pequenas variações nos orifícios de saída. Estas diferenças podem ultrapassar a 10%, o que em alguns casos as torna mais importantes que as variações de vazão devido às diferenças de pressão ao longo da linha lateral, VERMEIREN E JOBLING (1980).

Tendo-se como objetivo um correto dimensionamento, é necessário se estudar as características hidráulicas dos emissores, para tanto, no caso dos microtubos, importante atenção deve ser dada à variabilidade existente, decorrente do processo de fabricação. Considerando que os diâmetros das secções transversais de fluxo são reduzidos, a fabricação deveria ser exata e uniforme, pois, pequenas variações podem causar grandes diferenças na vazão, portanto, a variação no processo de fabricação dos emissores não pode ser ignorada (Souza, 2005)

SOLOMON (1979) determinou a variação da fabricação de vários emissores quanto ao orifício, classificou e interpretou – os fisicamente para o coeficiente de variação de fabricação. De acordo com o autor, o total das observações de vazão está compreendido no intervalo de $q_m (1 \pm 3CVF)$; aproximadamente 95% das observações

estão compreendidas no intervalo $q_m (1 \pm 2CVF)$ e 68% das observações estão compreendidas no intervalo $q_m (1 \pm CVF)$. O mesmo autor propôs, então, um coeficiente de variação de fabricação, dado pela eq. (9)

$$CVF = \frac{\sigma}{Q_m} \quad (9)$$

Em que:

- CVF = coeficiente da variação de fabricação (%);
- σ = desvio padrão da vazão;
- Q_m = vazão média de uma amostra adequada de emissores testados a uma pressão normal de operação.

Segundo o autor, o CVF é um importante fator que influencia a uniformidade de emissão da água, e, conseqüentemente, a eficiência do sistema de irrigação. Além disso, ele representa uma medida numérica de segurança nos projetos em relação aos gotejadores, cujos valores oscilam entre 2,00 e 10,00%, podendo algumas vezes ser mais elevados.

Existem diferentes classificações para emissores quanto a uniformidade de vazão: (SOLOMON, 1979; SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA, 1979; Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1986), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da uniformidade de vazão dos emissores

CVF (%)	Classificação da uniformidade
SOLOMON (1979)	
0 a 3	Excelente
4 a 7	Média
8 a 10	Marginal
11 a 14	Pobre
Acima de 15	Ruim
SOIL CONSERVATION SERVICE-USDA (1979)	
0 a 3	Excelente
4 a 7	Média
7 a 11	Marginal
11 a 15	Pobre
Acima de 15	Inaceitável
ABNT (1986)	
0 a 10	Boa
10 a 20	Média
20 a 30	Marginal
Acima de 30	Inaceitável

2.1.12 Modelo matemático, modelagem e uso de software na irrigação localizada

Em teoria, um modelo é uma estrutura composta por um conjunto universo de variáveis, por constantes, relações e funções definidas no conjunto universo. O termo modelo foi introduzido na Matemática no século xxi, com a descoberta das geometrias não euclidianas de Riemann e Lobachewski. Entretanto, antes disso, era possível encontrar modelos matemáticos nos trabalhos que envolviam conceitos como função, números naturais, conjuntos, entre outros.

Praticamente nenhuma grande obra hidráulica, porto ou usina hidrelétrica, é projetada sem estudos detalhados em vários modelos matemáticos de diversas categorias como hidrologia, hidráulica, mecânica dos solos. Também são muitíssimos utilizados a construção de vários modelos físicos específicos (turbinas, casa de força,

vertedouro, eclusas, escada de peixe, etc). Estes modelos podem ser bidimensionais ou tridimensionais (modelo de conjunto).

Existem diversas classificações para os modelos, uma delas os divide em matemáticos e de simulação. Os modelos matemáticos se referem às apresentações matemáticas de um fenômeno, podendo ser de três tipos: empíricos, baseados em dados observados; estocásticos, em que o processo se descreve pelas leis da probabilidade; mecanísticos, que consideram as leis físicas, químicas e biológicas no processo, sendo estes os mais versáteis dentre os tipos de modelo matemático. Já os modelos de simulação são mais complexos podendo englobar um ou mais modelos matemáticos (DETOMINI, 2004).

Atualmente, o termo Modelo Matemático é amplamente utilizado no circuito acadêmico, sendo definido por diversos autores. Pode-se dizer que modelo o matemático é tido como uma estrutura Matemática que descreve aproximadamente as características de um fenômeno em questão. De acordo com BIEMBENGUT (1999), o modelo matemático é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que traduz, de alguma forma, um fenômeno em questão ou um problema de situação real. A autora enfatiza para o conhecimento matemático que se tenha do problema, importante para seu desenvolvimento. No seu entender, esses modelos podem ser formulados em termos familiares, tais como, expressões numéricas ou fórmulas, diagramas, gráficos ou representações geométricas, tabelas, equações algébricas e outros. Também afirma que um modelo é proveniente de aproximações realizadas para que se possa entender melhor um fenômeno. Seja como for, um modelo matemático retrata ainda em uma visão simplificada, aspectos da situação pesquisada.

Para BIEMBENGUT (1997), modelagem Matemática é o processo envolvido na obtenção de um modelo. Podendo, sob alguns aspectos, ser considerado um processo artístico, pois para elaborar um modelo, além do conhecimento apurado de Matemática, o modelador deve ter uma dose significativa de intuição e criatividade para interpretar o contexto, discernir que conteúdo matemático melhor se adapta e ter senso lúdico para jogar com as variáveis envolvidas. A autora propõe que a modelagem é um meio para integrar dois conjuntos disjuntos: matemática e realidade. Entretanto, para representar

essa proposta e a dinâmica no processo de modelagem, apresenta-se as Figuras 1 e 2, respectivamente, propostas pela autora.

Figura 1 – Esquema ilustrativo da modelagem apresentado por BIEMBENGUT (1997), na relação entre a Matemática e realidade

Figura 2 – Esquema ilustrativo adaptado de BIEMBENGUT (1997), mostrando a dinâmica do processo de modelagem

Sendo que a ordem dos procedimentos está indicada pelos respectivos números:

- 1- Escolha do tema central a ser desenvolvido pelo projetista;
- 2- Pesquisa para coletar dados quantitativos e informações que possam auxiliar a apresentação de hipóteses;
- 3- Projetos com problemas que deverão ser solucionados;

- 4- Abstração no sentido de selecionar as variáveis essenciais envolvidas nos problemas e formular hipóteses;
- 5- Sistematização dos conceitos que serão usados na resolução dos modelos Matemáticos. Deve ser efetuada, também enquanto se trabalha na resolução e formalização dos Modelos.
- 6- Interpretação da solução de maneira analítica e com possíveis representações gráficas;
- 7- Validação dos modelos, devendo ser de maneira mais coerente possível com a realidade pesquisada. Caso o Modelo não seja adequado, o sistema deve ser retomado com novas pesquisas, tornando assim o processo dinâmico;
- 8- Quando o Modelo é satisfatório deve-se procurar utilizá-lo fazendo previsões, análises, ou qualquer outra forma de ação sobre a realidade

Os modelos matemáticos são aplicados para desenvolvimento de softwares na área de irrigação. Dentre os diversos autores que trabalharam com modelo matemático na área de irrigação, temos: MAIA (1994) desenvolveu um software para auxiliar no dimensionamento e manejo da irrigação, BASTO (1997) utilizou um modelo matemático para análise de fluxo transiente em rede de canais, SOUZA (2005) utilizou um modelo matemático para elaboração de um software para dimensionamento de linhas laterais com microtubos, encontrando rapidez e precisão na sua utilização devido a sua forma de concepção.

2.1.13 Testes hidráulicos e uniformidade de aplicação da água

O uso de ensaios hidráulicos com equipamentos utilizados em sistemas de irrigação localizada é muito importante, o mesmo consiste na determinação das características hidráulicas e nas análises de seu desempenho (DANTAS NETO et al., 1997). Apesar de a literatura fornecer equações que são utilizadas para determinação de características hidráulicas, como as obtidas por KHATRI et al., (1978), elas não discriminam a dissipação de energia localizada, no tubo e energia de velocidade, sendo isso muito importante para geração de softwares que auxiliam no dimensionamento em projetos de irrigação.

A uniformidade de aplicação da água ao longo da linha lateral está intimamente relacionada com a vazão nos emissores, que é consequência das energias dissipadas por atrito e pelas inserções, bem como da dissipação de energia na entrada dos emissores, do ganho ou perda de energia devido à topografia da superfície do solo, da qualidade da matéria prima e dos processos de fabricação dos emissores KELLER E KARMELI (1974), problemas de entupimento dos emissores, e, efeitos da temperatura da água sobre o regime de escoamento e geometria do emissor (HOWELL E HILLER, 1974 e GOMES, 1999); todavia, estudos realizados em laboratórios concluíram que temperaturas entre 25 °C e 32 °C não alteram a vazão do gotejador de forma significativa (OLIVEIRA, 1978; OLIVEIRA et al., 2000). Entretanto, outros níveis de temperatura podem interferir na vazão e conseqüentemente na uniformidade de aplicação de água pelo emissor ao longo de uma linha lateral.

2.1.14 Avaliação de modelo matemático

A etapa de avaliação consiste em comparar os dados fornecidos pelos modelos ou programas utilizados, com os resultados experimentais observados, para verificar se os resultados finais foram satisfatórios, ou seja, tenha ou não alcançado os objetivos propostos.

Os dados experimentais, em sua grande maioria, apresentam erros aleatórios em função das variabilidades existentes entre si. A avaliação do erro aleatório pode ser feita de forma indireta, avaliando-se o grau de precisão do experimento. O índice de correlação de Pearson apresentado pela eq.(10) é um bom indicador de precisão, uma vez que em sua expressão estão relacionados os dados estimados e observados (ARMINDO, 2007).

$$r = \frac{(N \sum_{i=1}^N Ei Oi) - (\sum_{i=1}^N Ei)(\sum_{i=1}^N Oi)}{\sqrt{[(N \sum_{i=1}^N (Ei)^2) - (\sum_{i=1}^N Ei)^2][(N \sum_{i=1}^N (Oi)^2) - (\sum_{i=1}^N Oi)^2]}} \quad (10)$$

Em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson;

N = Número de repetições;

Ei = enésima variável estimada;
 Oi = enésima variável observada.

O erro sistemático é também um bom indicador numérico da proximidade dos dados observados, aos estimados. Entretanto, quanto mais próximo ou preciso forem os dados, menores serão os erros, com tendência a terem valor zero se a exatidão ocorrer para todos os dados coletados. O coeficiente de correlação de Willmott (1981) descrito pela eq. (11) é utilizado como estimador da exatidão dos dados obtidos, ao se utilizar um modelo matemático.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|Ei - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

Em que:

d = Índice de concordância de Willmott;
 $\bar{O}$ = média das variáveis observadas.

O modelo matemático pode ainda ser avaliado utilizando o valor do erro médio absoluto (EMA) apresentado pela eq. (12) cometido em função dos dados estimados e observados. Para obter o erro médio absoluto, calcula-se a média das diferenças absolutas entre todos os valores estimados e medidos, conforme a eq. (12):

$$EMA = \sum_{i=1}^N \frac{|Ei - Oi|}{N} \quad (12)$$

2.1.15 Problemas ocorridos na irrigação por gotejamento

Os fatores que afetam a uniformidade de aplicação de água seguem a seguinte ordem: obstruções, coeficiente de variação de fabricação, expoente de descarga do emissor, sensibilidade do emissor à temperatura e variações de pressão, entre outros

(SOLOMON, 1985). O entupimento dos emissores na malha hidráulica é um grande desafio para a operação e a manutenção de um sistema de irrigação por gotejamento, levando muitos irrigantes ao insucesso com essa tecnologia (GHAEMI E CHIENG, 1999). As principais fontes causadoras de entupimento em sistemas localizados, identificados por GILBERT E FORD (1986), são de natureza química relacionadas à precipitação de elementos como cálcio e ferro, de natureza física como partículas do solo e pequenos animais (formigas, aranhas, ovos de lesmas, etc.) e de natureza biológica relacionado a algas e mucilagem bacteriana, principalmente.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Etapas e Localização da pesquisa

A condução desta pesquisa se dividiu em três etapas: a primeira composta por testes hidráulicos com os microtubos estudados, realizados no laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, situada no município de Piracicaba -SP a 22° 42’ de latitude Sul; 47° 30’ de longitude Oeste e aproximadamente 546 metros de altitude; a segunda, composta pelo desenvolvimento de dois modelos matemáticos a partir dos dados obtidos na primeira etapa, e de testes de campo em uma área anexa ao laboratório; a terceira, desenvolvida com a implantação de um sistema de fertirrigação com microtubos em mudas de laranja, cultivadas em ambiente protegido, na fazenda Candelária no município de Araras –SP, de propriedade do Sr. Edmundo Blasco e outros.

2.2.2 Microtubos

2.2.2.1 Diâmetro

Utilizou-se os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul, fabricados pela empresa Plasnova Tubos, com diâmetros internos comerciais de 0.600, 0.700, 0.800 e 1.000 mm, respectivamente, e diâmetros externos de 2, 500 mm. A determinação

precisa do diâmetro interno do microtubo foi realizada por duas metodologias: utilizando um projetor de perfil com precisão de 1,00 μm , pertencente ao departamento de Engenharia Rural da ESALQ e por meio de medições hidráulicas.

Para medir o diâmetro pelo projetor de perfil, tomou-se uma amostra de cada microtubo e, com auxílio de um bisturi, cortou-se transversalmente 60 amostras simples contendo comprimentos de aproximadamente 2,00 mm. As partes cortadas foram colocadas no projetor de perfil, e medido o diâmetro interno para cada amostra simples.

Pelo método hidráulico, o diâmetro foi determinado utilizando-se diferentes pressões de operação e comprimentos de microtubos. Os comprimentos foram escolhidos na fase preliminar dos testes, considerando-se os tamanhos que reduziriam os efeitos da dissipação de energia na entrada do microtubo, de maneira tal que não interferisse ou que não fosse significativa na determinação do diâmetro. Os microtubos foram inseridos em um tubo de polietileno com diâmetro de 20 mm em nível. Para cada comprimento, o emissor funcionou com duas pressões de serviço diferentes, reguladas por um registro e medidas com um manômetro de bourdon. Em cada condição de pressão e comprimento, a vazão foi mensurada três vezes sendo que para cada valor coletado, mediu-se a temperatura da água. Os valores de pressão e comprimentos com os quais se realizou os testes e a determinação do diâmetro interno estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Pressões e comprimentos em que foram realizados os testes hidráulicos para determinação do diâmetro interno dos microtubos

Pressão (KPa)	Comprimentos dos microtubos (m)			
	Verde	Amarelo	Laranja	Azul
17,61	4,50	5,00	6,00	10,00
110,67	4,00	5,00	7,00	10,00
120,18	4,00	5,00	7,00	10,00
155,80	4,00	5,00	7,00	10,00
202,87	5,00	6,00	8,00	11,00
249,40	5,00	6,00	8,00	11,00
297,43	6,00	7,00	9,00	12,00
345,65	6,00	7,00	9,00	12,00

Assim, o diâmetro interno (D_i) resultou de uma equação que expressa a dissipação de energia ao longo do microtubo (equação universal de dissipação de energia) e a energia dissipada na saída do microtubo

$$D_i = \left(\frac{0,08262647Q^2 + 4,153269\nu LQ}{H} \right)^{0,25} \quad (13)$$

Em que:

- D_i = diâmetro do microtubo (m);
 H = carga de pressão disponível na entrada no ponto 1 (m.c.a);
 Q = vazão a saída do microtubo (m^3s^{-1});
 ν = viscosidade cinemática (m^2s^{-1});

2.2.2.2 Determinação do coeficiente K de dissipação de energia localizada

No laboratório de hidráulica, montou-se uma bancada de testes conforme Figura 3 (a, b), na qual se utilizou um manômetro digital aferido pelo manômetro de peso morto pertencente ao laboratório do departamento de Engenharia Rural, para medir a pressão no ponto 1 (passagem da água da linha lateral para dentro do microtubo) conforme mostrado na Figura 4 a seguir.

a

b

Figura 3 – Bancada de testes para determinação do coeficiente K de dissipação de energia localizada (a), com detalhes da instalação dos microtubos na bancada (b)

Para coleta dos dados necessários na determinação do coeficiente k , os microtubos foram mantidos em mesmo nível, sendo que os mesmos foram inseridos em um conector de 2, 400 mm de diâmetro interno, que também foi inserido em uma linha lateral (Figura 3 b) de polietileno cujo diâmetro interno foi de 20 mm, através de furos realizados com um furador de 2,00 mm de diâmetro externo.

Os microtubos estudados foram seccionados em comprimentos de 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 m, e inseridos em um conector, sendo que entre os dois conectores que ligam a linha lateral ao microtubo, foi colocado um cabo (tubo de polietileno de 3,80 mm de diâmetro interno e 0,20 m de comprimento) apresentado na Figura 4. O objetivo deste cabo é fazer no campo uma possível ligação entre a linha lateral e o ponto onde se deseja irrigar, reduzindo, conseqüentemente, o comprimento do microtubo.

A Figura 4 ilustra o percurso da água desde a passagem da linha lateral para dentro do conector e cabo, até a saída do microtubo.

Figura 4 – Representação esquemática do caminho percorrido pela água desde a entrada no conector até a saída do microtubo

Observando a Figura 4, pode-se compreender melhor a eq. (32) demonstrada a seguir, sendo que a mesma expressa o coeficiente K de dissipação de energia localizada. A demonstração é feita a partir da eq. (14), da seguinte maneira: Equação de Bernoulli aplicada entre os pontos 1 e 3 da Figura 4.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 + HfCabo + HfTubo + HfLocalizada \quad (14)$$

Em que:

P_1	=	carga de pressão na entrada do cabo, no ponto 1;
γ	=	peso específico da água ;
P_3	=	carga de pressão na saída do microtubo;
V_3	=	velocidade da água na saída do microtubo;
g	=	aceleração da gravidade(ms^{-2});
Z	=	carga de energia de posição nos pontos 1 e 3 (m.c.a);
$HfCabo$	=	dissipação de energia no cabo;
$HfTubo$	=	dissipação de energia no microtubo;
$HfLocalizada$	=	dissipação de energia localizada.

Considerando:

Z_1 igual a Z_3 , pois ambos estão no mesmo nível;

$\frac{V_1^2}{2g} = 0$, pois, não se tem componente velocidade no interior do tubo de alimentação na direção do microtubo, no início da conexão;

$\frac{P_3}{\gamma} = 0$, pois, no final do microtubo a saída da água é aberta à atmosférica.

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_3^2}{2g} + HfCabo + HfTubo + HfLocalizada \quad (15)$$

As equações utilizadas foram a de Darci-Weistbach para o cálculo da dissipação de energia no cabo e no microtubo ($HfCabo$ e $HfTubo$), e as equações de dissipação

de energia em função da velocidade na saída do microtubo (E_V) e passagem da água do cabo para o microtubo (H_f Localizada), dadas por:

$$HfCabo = f \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} \quad (16)$$

$$HfTubo = f \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} \quad (17)$$

$$E_V = \frac{V_3^2}{2g} \quad (18)$$

$$HfLocalizada = K \frac{V_3^2}{2g} \quad (19)$$

$$f = \frac{0,316}{NR^{0,25}} \quad (20)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (21)$$

$$HfCabo = \frac{0,316v^{0,25}L_{1-2}}{V_2^{0,25}D_1^{0,25}D_1} \frac{V_2^2}{2g} \quad (22)$$

$$HfCabo = \frac{0,316v^{0,25}L_{1-2}}{2g} \frac{V_2^{1,75}}{D_1^{1,25}} \quad (23)$$

$$HfTubo = \frac{0,316v^{0,25}L_{2-3}}{2g} \frac{V_3^{1,75}}{D_2^{1,25}} \quad (24)$$

$$H = HfCabo + HfTubo + E_V + HfLocalizada \quad (25)$$

$$H = f \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} + \frac{V_3^2}{2g} + K \frac{V_3^2}{2g} \quad (26)$$

$$H = \frac{0,316}{Re_2^{0,25}} \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} + \frac{0,316}{Re_3^{0,25}} \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} + \frac{V_3^2}{2g} + K \frac{V_3^2}{2g} \quad (27)$$

Substituindo (21) em (23), (24) (18) e (19), tem-se, respectivamente, as equações (28), (29, (31) e (33)

$$HfCabo = \left[\frac{0,316v^{0,25}}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} \frac{Q^{1,75}L_{1-2}}{D_1^{4,75}} \right] \quad (28)$$

$$HfTubo = \left[\frac{0,316\nu^{0,25}}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} \frac{Q^{1,75} L_{2-3}}{D_2^{4,75}} \right] \quad (29)$$

$$E_V = \frac{V_3^2}{2g} = \left(\frac{4Q}{\pi D_2^2} \right)^2 \frac{1}{2g} \quad (30)$$

$$E_V = \frac{16}{2\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D_2^4} \right) \quad (31)$$

$$HfLocalizada = K \frac{V_3^2}{2g} = K \left(\frac{4Q}{\pi D_2^2} \right)^2 \frac{1}{2g} \quad (32)$$

$$HfLocalizada = K \frac{16}{2\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D_2^4} \right) \quad (33)$$

$$HfLocalizada = H - (HfCabo + HfTubo + E_V) \quad (34)$$

Expressando - se K em função da junção das equações 28, 29, 31 e 33, tem-se:

$$K = \left\{ H - \left[\frac{0,316}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} \frac{\nu^{0,25}}{1} \left(\frac{Q^{1,75} L_{1-2}}{D_1^{4,75}} \right) \right] + \left[\frac{0,316}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} \frac{\nu^{0,25}}{1} \left(\frac{Q^{1,75} L_{2-3}}{D_2^{4,75}} \right) \right] + \left[\frac{16}{2\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D_2^4} \right) \right] \right\} * \left[\frac{2\pi^2 g}{16} \left(\frac{D_2^4}{Q^2} \right) \right] \quad (35)$$

Em que:

- K = constante de dissipação de energia na entrada do microtubo (adimensional);
- H = carga de pressão na entrada no ponto 1 (m.c.a);
- g = aceleração da gravidade (ms^{-2});
- Q = vazão a saída do microtubo (m^3s^{-1});
- ν = viscosidade cinemática (m^2s^{-1});
- D_1 = diâmetro do cabo (m);
- D_2 = diâmetro do microtubo(m);
- L_{1-2} = comprimento do cabo (m);
- L_{2-3} = comprimento do microtubo (m).

Para cada comprimento de microtubo inserido na linha lateral, utilizou - se dezesseis diferentes pressões, com as quais o volume de água foi coletado em um tempo não inferior a 3 minutos e pesado. Cada coleta se repetiu três vezes, dessa forma, o total de dados coletados para cada microtubo em todos os comprimentos foi de 240. Para cada vazão coletada, monitorou-se a temperatura da água para consideração da viscosidade cinemática na equação de determinação do valor de k .

Os dados foram digitalizados em planilha Excel, determinado a vazão e número de Reynolds para cada situação de pressão. Utilizando a equação (35), determinou - se o valor de k para cada condição de pressão, comprimento do microtubo e vazão. Em seguida, por intermédio de uma equação ajustada com auxílio do Excel, se obteve os valores de K em função do número de Reynolds para cada microtubo em estudo.

2.2.3 Determinação dos modelos matemáticos para cálculo do comprimento dos microtubos

Operando em regime turbulento, determinou - se dois modelos Matemáticos – hidráulicos para estimativa dos comprimentos dos microtubos, utilizando os coeficientes K de dissipação de energia localizada, obtidos nos testes de laboratório. Um modelo denominado UNIVERSAL, eq.(48), proposto a partir das equações de Darci-Weistbach para o cálculo das energias dissipadas no cabo e no microtubo, e das equações de dissipação de energia em função da velocidade na saída do microtubo (E_v) e passagem da água do cabo para o microtubo (H_f Localizada). Outro, denominado WSBOTREL, eq.(57), utilizando as mesmas equações, porém, adaptadas aos dados obtidos em laboratório. A Figura 5 auxilia no entendimento das equações que resultam os modelos matemáticos para determinação do comprimento do microtubo.

Figura 5 - Ilustração do escoamento da água no sistema com microtubos, do ponto 4 (microtubo 1) até a saída no ponto 3 (microtubo 2)

Modelo 1 (UNIVERSAL)

Equação de Bernoulli aplicada entre os pontos 1 e 3 da Figura 5, obtendo-se:

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_3^2}{2g} + (Z_3 - Z_1) + Hf_{Microtubo} + Hf_{cabo} + Hf_{Localizada} \quad (36)$$

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 4 e 1, tem-se:

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_4}{\gamma} + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + (Z_4 - Z_1) - Hf_L \quad (37)$$

Considerando o dimensionamento de uma linha lateral inteira, com microtubos espaçados entre si entre os ponto 4 e 1, e um solo em desnível com determinado (dZ), em que o dimensionamento do sistema de irrigação será realizado do último para o primeiro microtubo, e, utilizando a equação de Darci-Weistbach para o cálculo de dissipação de energia no cabo e no microtubo (Hf cabo e Hf Tubo), e as equações de dissipação de energia em função da velocidade na saída do microtubo (Ev) e passagem da água do cabo para o microtubo (Hf Localizada), o comprimento do microtubo é obtido pela equação (48) conforme demonstrado a seguir.

Substituindo (37) em (36), e considerando as cargas de pressão P_4/γ e P_1/γ , como sendo os valores de pressão (P4 e P1), medidas nos pontos 4 e 1, respectivamente, tem - se:

$$Hf_{Microtubo} = \left[P_4 + \frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) - \left[\frac{V_3^2}{2g} - Hf_{cabo} - Hf_{Localizada} \right] \right] \quad (38)$$

Em que:

$$Hf_{Cabo} = f \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} \quad (39)$$

$$Hf_{Microtubo} = f \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} \quad (40)$$

$$E_v = \frac{V_3^2}{2g} \quad (41)$$

$$Hf_{Localizada} = K \frac{V_3^2}{2g} \quad (42)$$

$$Hf_{Microtubo} = \left[P_4 - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{V_3^2}{2g} + Hf_{cabo} + Hf_{Localizada} \right) \right] \quad (43)$$

$$f \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} = \left[P_4 - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(f \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_3^2}{2g} + K \frac{V_3^2}{2g} \right) \right] \quad (44)$$

$$f = \frac{0,316}{NR^{0,25}} \quad (45)$$

$$NR = \frac{VD}{\nu} \quad (46)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (47)$$

Substituindo-se as equações (45), (46) e (47) em (44) e, isolando-se o comprimento do microtubo (entre os pontos 2 e 3), tem-se a equação (48)

$$L_{2-3} = \left\{ \left[P_4 - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \right] - \left[\frac{0,316}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} \frac{\nu^{0,25}}{1} \left(\frac{Q^{1,75} L_{1-2}}{D_1^{1,75}} \right) \right] - \left[\frac{16}{2\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D_2^4} \right) \right] - \left[\frac{16}{2\pi^2 g} \left(K \frac{Q^2}{D_2^4} \right) \right] \right\} \left[\frac{2g}{0,316 \nu^{0,25}} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1,75} \frac{D_2^{4,75}}{Q^{1,75}} \right] \quad (48)$$

Em que:

- P_4 = carga de pressão na entrada do cabo, no ponto 1 (m.c.a);
- Hf_L = dissipação de energia na linha lateral entre os pontos 4 e 1(m.c.a) ;
- dZ = diferença de nível (m) entre os pontos 4 e 1($Z_4 - Z_1$) ;
- Z_3 = cota no ponto 3 (m);
- Z_1 = cota no ponto 1 (m);
- Q = vazão no microtubo ($m^3 s^{-1}$);
- ν = viscosidade cinemática ($m^2 s^{-1}$);
- D_1 = diâmetro do cabo (m);
- D_2 = diâmetro do microtubo(m);
- L_{1-2} = comprimento do cabo (m);
- L_{2-3} = comprimento do microtubo (m);

- K = constante de dissipação de energia na entrada do microtubo (adimensional);
 V_1 = velocidade do fluido no ponto 1 (ms^{-1});
 V_4 = velocidade do fluido no ponto 4 (ms^{-1});

Modelo 2 (WSBOTREL)

Equação de Bernoulli aplicada entre os pontos de 1-3 e 4-1, já demonstrado, tendo-se:

$$Hf_{\text{Microtubo}} = \left[\left(P_4 + \frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) \right) - \left(\frac{V_3^2}{2g} + Hf_{\text{cabo}} + Hf_{\text{Localizada}} \right) \right] \quad (49)$$

$$H = \left(P_4 + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) \right) \quad (50)$$

$$Hf_{\text{Microtubo}} = H - \left(Hf_{\text{Cabo}} + \frac{V_3^2}{2g} + K \frac{V_3^2}{2g} \right) \quad (51)$$

$$H = Hf_{\text{cabo}} + \frac{V_3^2}{2g} + Hf_{\text{Localizada}} + Hf_{\text{Microtubo}} \quad (52)$$

$$H = \left(\frac{0,316}{R_2^{0,25}} \frac{L_{2-3}}{D_2} \frac{V_3^2}{2g} \right) + \left[(K + 1) \frac{V_3^2}{2g} \right] + \left(\frac{0,316}{R_1^{0,25}} \frac{L_{1-2}}{D_1} \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (53)$$

$$H(2gD_1D_2R_1^{0,25}R_2^{0,25}) = \left[\begin{array}{l} (0,316D_1L_{2-3}V_3^2R_1^{0,25}) + \\ ((K + 1)V_3^2D_1D_2R_1^{0,25}R_2^{0,25}) + \\ (0,316D_2L_{1-2}V_2^2R_2^{0,25}) \end{array} \right] \quad (54)$$

$$L_{2-3} = \frac{\left[\begin{array}{l} H(2gD_1D_2R_1^{0,25}R_2^{0,25}) - \\ ((K + 1)V_3^2D_1D_2R_1^{0,25}R_2^{0,25}) - \\ (0,316D_2L_{1-2}V_2^2R_2^{0,25}) \end{array} \right]}{(0,316D_1V_3^2R_1^{0,25})} \quad (55)$$

$$L_{2-3} = \left[\frac{H(2gD_2R_2^{0,25})}{(0,316V_3^2)} - \frac{(K + 1)D_2R_2^{0,25}}{0,316} - L_{1-2} \frac{D_2R_2^{0,25}V_2^2}{D_1R_1^{0,25}V_3^2} \right] \quad (56)$$

Substituindo as equações (47) e (50) em 56 tem-se a equação (57)

$$L_{2-3} = \left\{ \left[\left(P_4 + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) \right) \left(\frac{Re_2^{0,25} D_2^5}{0,026110086 Q^2} \right) \right] - \left[\frac{(K+1) D_2 R_2^{0,25}}{0,316} \right] - \left[L_{1-2} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \left(\frac{Re_2}{Re_1} \right)^{0,25} \right] \right\} \quad (57)$$

Em que:

- P_4 = carga de pressão na entrada do cabo, no ponto 1 (m.c.a);
- Hf_L = dissipação de energia na linha lateral entre os pontos 4 e 1(m.c.a) ;
- dZ = diferença de nível (m) entre os pontos 4 e 1($Z_4 - Z_1$);
- Z_3 = cota no ponto 3 (m);
- Z_1 = cota no ponto 1 (m);
- Q = vazão no microtubo (m^3s^{-1});
- D_1 = diâmetro do cabo (m);
- D_2 = diâmetro do microtubo(m);
- L_{1-2} = comprimento do cabo (m);
- L_{2-3} = comprimento do microtubo (m);
- K = constante de dissipação de energia na entrada do microtubo (adimensional);
- Re_1 = número de Reynolds no cabo (adimensional);
- Re_2 = número de Reynolds no microtubo (adimensional);

2.2.4 Dimensionamento e montagem do sistema de irrigação em campo para avaliação dos modelos propostos

Ambos os modelos foram inseridos em planilha de Excel para dimensionamento dos comprimentos dos microtubos. Em seguida, projetou-se uma linha lateral de irrigação, cujo comprimento foi de 50,00 metros, com microtubos operando em regime turbulento, para tanto, realizou-se um levantamento topográfico da área, cuja declividade foi de 2,46%. Os microtubos foram dimensionados pelos dois modelos

apresentados (UNIVERSAL e WSBOTREL), conforme ilustrado pelas Figuras 8 e 9, a seguir, utilizando o coeficiente K de dissipação de energia na entrada do microtubo, e de acordo com a pressão disponível em cada ponto no solo onde foram instalados. Os microtubos dimensionados foram conectados em uma linha lateral de polietileno, conforme Figura 6, com espaçamento de 0,50 m.

Nesta etapa teve-se como objetivo, verificar se a vazão nos microtubos em campo teria valores iguais ou próximos aos de projeto utilizando os dois modelos matemáticos propostos. Para tanto, utilizou-se uma Moto-bomba para bombear a água em uma linha lateral com 20,00 mm de diâmetro, com vazão regulada por registros de agulha no início e final da linha. Instalou-se duas tomadas de pressão de engate rápido no início e final da linha de irrigação e utilizou-se um manômetro para medir a pressão na entrada para o último microtubo. O objetivo do medidor no final da linha lateral foi de monitorar a pressão para que fosse a mesma de projeto, no entanto, tal procedimento poderia ser realizado no início.

Ao longo de toda a linha lateral, coletou-se o volume de água vazado por cada microtubo, em um intervalo de tempo não pré-fixado, não sendo inferior a 3,00 minutos. O volume foi pesado em balança de precisão de duas casas decimais com escala em gramas. Tal procedimento se repetiu para os quatro tipos de microtubos em estudo, com medição da temperatura da água para cada amostra. Os dados coletados no campo foram digitalizados, para então serem determinados os valores da vazão em cada microtubo. Uma visualização do experimento no campo é mostrada na Figura 6.

Figura 6 - Linha lateral com microtubos montada no campo, com detalhe da coleta de vazão

A figura 7 representa os microtubos instalados ao longo de da linha lateral, bem como uma vista de perfil da mesma. A diferença de nível entre o primeiro e o último microtubo instalado foi de 1,16 m e o comprimento da linha na abscissa foi de 47,45 m.

Figura 7- Vista de perfil da linha lateral com microtubos montada em campo

Determinação do comprimento dos microtubos utilizando-se da equação Universal									
Dados de entrada									
Q (microtubo) Lh ⁻¹ =	9,500	dz (m) =	0,2	Tágua(°C) =	20				
D (microtubo)=(mm)	0,893	Comprimento.cabo (m) =	0,2	Gravidade(ms ⁻¹) =	9,81				
Espaçamento=(m)	0,500	Diâmetro cabo(mm) =	3,8	P. Manômetro.(Kgfc m ⁻²) =	1,00				
D linha lateral=(mm)	20,000	K(adimensional) =	3,45						
Dados de saída									
Vel. Cabo (ms ⁻¹)	0,23268267	Vel microt(ms ⁻¹)	4,213	K v ² /2g (mca)=	3,122				
NR cabo(adm)	876,046892	Reynolds.microtubo	3.727,859	v ² /2g microt (mca)=	0,905				
f cabo (adm)	0,07305545	f microtubo	0,0404	Viscosid. Cinem.(m ² s ⁻¹)=	1,0093E-06				
Hf cabo (mca)	0,01061031	Pressão fin. Lateral(PSI)	14,223	Peso específico(Kgm ⁻³)=	998,230				
				Pressão fin. Lateral(mca)=	10,348				
Dados de Projeto									
N do Microtubo	Comp.(m) Lateral	Q(Lh-1) Trecho	Cota pontual (m)	V(ms ⁻¹) Lateral	NR Lateral	f da Lateral	Trecho Hf (mca)	H (mca) entrada do microtubo	L Total (m) L mic (cm)
4	3	28,5	100,137	0,025199474	499,35	0,128167756	0,000103706	10,135	14,88
5	4	38	100,158	0,033599298	665,79	0,096125817	0,000138274	10,114	14,83
6	5	47,5	100,178	0,041999123	832,24	0,076900654	0,000172843	10,093	14,78
7	6	57	100,183	0,050398947	998,69	0,064083878	0,000207411	10,089	14,77
8	7	66,5	100,188	0,058798772	1.165,14	0,054929038	0,00024198	10,084	14,76
9	8	76	100,192	0,067198597	1.331,59	0,048062908	0,000276549	10,080	14,75
10	9	85,5	100,196	0,075598421	1.498,04	0,042722585	0,000311117	10,076	14,74
11	10	95	100,194	0,083998246	1.664,49	0,038450327	0,000345686	10,079	14,75
12	11	104,5	100,191	0,09239807	1.830,93	0,034954843	0,000380254	10,082	14,75
13	12	114	100,205	0,100797895	1.997,38	0,032041939	0,000414823	10,068	14,72
14	13	123,5	100,219	0,109197719	2.163,83	0,046332023	0,000703962	10,055	14,69
15	14	133	100,237	0,117597544	2.330,28	0,045481532	0,000801443	10,038	14,64
16	15	142,5	100,255	0,125997369	2.496,73	0,044703784	0,000904291	10,020	14,60
17	16	152	100,274	0,134397193	2.663,18	0,043988292	0,001012415	10,002	14,56
18	17	161,5	100,293	0,142797018	2.829,62	0,043326626	0,00112573	9,984	14,51
19	18	171	100,307	0,151196842	2.996,07	0,042711908	0,001244158	9,972	14,48
20	19	180,5	100,320	0,159606667	3.162,52	0,042138464	0,001287626	9,960	14,45

Curva característica

WSBOTREL

Eq universal

DADOS PARA CORREÇÃO VAZÃO K

DADOS UNIVERSAL

Estat Wil Pear

DADOS EO WSBOTREL

WINCCOWS VIS

Figura 8 – Dimensionamento da linha lateral utilizando o modelo UNIVERSAL

Figura 9 – Dimensionamento da linha lateral utilizando o modelo WSBOTREL

2.2.5 Fertirrigação com microtubos

A segunda etapa de testes em campo foi desenvolvida na fazenda Candelária no município de Araras - SP, utilizando-se o microtubo amarelo (diâmetro interno comercial de 0,700 mm) como emissor. O dimensionamento do projeto foi realizado utilizando o modelo de dimensionamento WSBOTREL, sendo implantado em um sistema de fertirrigação em mudas de laranja cultivadas em estufa. Para tanto, utilizou-se parte de uma bancada contendo sete fileiras e 280 mudas de laranja. Instalou-se quatro linhas laterais sobre a bancada, cada uma comportando 70 microtubos. O bombeamento da água para as linhas laterais e microtubos foi realizado utilizando-se uma Moto-Bomba com potência de 5520 watts (7,50 CV), instalada para recalque da água em todo o viveiro. Portanto, antes da linha lateral, instalou-se registro, tomada de pressão e válvula reguladora de pressão, para controle de uma possível sobre pressão no sistema. A instalação dentro da estufa pode ser visualizada na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de fertirrigação com microtubos em mudas de laranja, instalado dentro da estufa

Uma vez sendo em regime de escoamento turbulento, a água sai do microtubo com alta velocidade, portanto, nos experimentos realizados nesta pesquisa, utilizou - se como anteparo do jato de água, mangueiras cortadas em tamanhos de 2,00 cm, fixadas nas pontas dos microtubos conforme mostrado na Figura 10

Após a implantação, o sistema de fertirrigação passou a operar com intervalos entre irrigação de três e quatro dias, com tempos de irrigação de 180 e 240 segundos respectivamente, e vazão de $8,60 \text{ Lh}^{-1}$. Os produtos utilizados na quimigação foram: ácido fosfórico e ácido bórico; nitrato de amônio, nitrato de cálcio e nitrato de potássio; sulfato de potássio, sulfato de magnésio, sulfato de zinco, sulfato de cobre e sulfato de ferro; molibdato de amônio. As concentrações desses produtos na água de irrigação estão apresentadas na Tabela 4 em dois coquetéis, um para cada época, em função das necessidades nutricionais das mudas de laranja.

Tabela 4 - Concentração dos minerais utilizados na fertirrigação da laranja

Coquetel A para 1000 litros de água	Coquetel B para 1000 litros de água
Ácido fosfórico = 3,00 litros	Nitrato de cálcio = 15,00 Kg
Nitrato de potássio = 15,00 Kg	Nitrato de potássio = 10,00 Kg
Sulfato de magnésio = 18,00 Kg	Sulfato ferroso (25,00 %) = 3,00 Kg
	Ferro quelatizado (6,00 %)
	Sulfato de zinco = 1,50 Kg
	Sulfato de manganês = 1,00 Kg
	Sulfato de cobre = 1,20 Kg
	Ácido bórico = 0,05 Kg
	Molibdato de sódio = 0,001 Kg

A solução final na saída do microtubo foi produzida em função da diluição dos coquetéis em 24 vezes, produzindo uma Condutividade elétrica de 2,00 a $2,50 \text{ dSm}^{-1}$.

O sistema de fertirrigação ficou em operação em um período de 160 dias, sendo que, as vazões dos microtubos foram avaliadas em duas etapas: 60 dias após o início e no final do experimento.

2.2.6 Análises estatísticas e avaliação dos resultados

2.2.6.1 Avaliação dos modelos para dimensionamento de microtubos

Com auxílio dos modelos propostos, dimensionou-se para diferentes pressões de operação, o comprimento dos microtubos para determinada vazão de projeto em uma linha lateral, em seguida, coletou-se o volume de água aplicado por cada microtubo inserido na linha lateral, sendo que os dados observados nos microtubos e as vazões de projeto (dados estimados) foram utilizados para análise e avaliação dos modelos de acordo com as metodologias mostradas a seguir:

- Utilizando o índice de correlação de Pearson, representado pela eq. (58), para medir a precisão dos resultados apresentados pelos modelos, em função dos dados de vazão estimados e observados.

$$r = \frac{(N \sum_{i=1}^N Ei Oi) - (\sum_{i=1}^N Ei)(\sum_{i=1}^N Oi)}{\sqrt{[(N \sum_{i=1}^N (Ei)^2) - (\sum_{i=1}^N Ei)^2][(N \sum_{i=1}^N (Oi)^2) - (\sum_{i=1}^N Oi)^2]}} \quad (58)$$

Em que:

- r = coeficiente de correlação de Pearson;
- N = Número de repetições;
- Ei = enésima variável estimada;
- Oi = enésima variável observada.

- Utilizando o índice de concordância de Willmott representado pela equação (59), pode-se determinar a exatidão dos dados de vazão coletados. Este método contribuiu na análise do erro sistemático, caracterizado pelo quanto o dado estimado esteve distante do observado, sendo que quanto mais próximos, maior a exatidão.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|Ei - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \quad (59)$$

Em que:

d = Índice de concordância de Willmott;

$\bar{O}$ = média das variáveis observadas.

- Outra maneira utilizada para análise dos modelos, foi baseada no erro médio absoluto, para obtenção do mesmo, calculou-se a média das diferenças absolutas entre todos os valores estimados e observados, conforme apresentado pela eq. (60)

$$EMA = \sum_{i=1}^N \frac{(|Ei - Oi|)}{N} \quad (60)$$

Em que:

EMA = Erro médio absoluto (Lh^{-1}).

Uma metodologia proposta neste trabalho para avaliação dos modelos utilizados é por meio do índice de erro de vazão, representado pela Equação (61)

$$s = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (|Ei - Oi|)}{\sum_{i=1}^N Ei} \right) 100 \quad (61)$$

Em que:

s = índice médio de erro (%).

A Tabela 5 apresenta os valores de pressão na entrada do microtubo e vazão estimada para cada pressão de operação. Os valores nela contidos serviram como dados de entrada nos modelos matemáticos UNIVERSAL e WSBOTREL, para o cálculo dos comprimentos dos microtubos ao longo da linha lateral. Em seguida, na bancada

de testes instalada no laboratório, mediu-se as vazões (vazão observada), respectivas às pressões predeterminadas, em um total de três repetições.

Tabela 5 - Pressão na entrada e vazão de projeto na saída do microtubo

Microtubo							
Verde		Amarelo		Laranja		Azul	
Pressão (KPa)	Vazão (Lh ⁻¹)	Pressão (KPa)	Vazão (Lh ⁻¹)	Pressão (KPa)	Vazão (Lh ⁻¹)	Pressão (KPa)	Vazão (Lh ⁻¹)
20,59	2,00	20,59	2,50	20,59	3,88	20,59	6,65
38,62	3,02	38,62	3,72	38,62	5,66	38,62	9,70
48,11	3,48	48,11	4,26	48,11	6,45	48,11	11,00
67,09	4,31	67,09	5,23	67,09	7,84	67,09	13,45
85,12	5,02	85,12	6,05	85,12	9,04	85,12	15,58
105,05	5,72	105,05	6,88	105,05	10,23	105,05	17,70
124,03	6,34	124,03	7,60	124,03	11,28	124,03	19,57
143,01	6,93	143,01	8,29	143,01	12,26	143,01	21,35
161,99	7,48	161,99	8,94	161,99	13,20	161,99	23,02
182,86	8,06	182,86	9,62	182,86	14,17	182,86	24,79
199,95	8,52	199,95	10,15	199,95	14,95	199,95	26,17
218,93	9,01	218,93	10,72	218,93	15,76	218,93	27,64
90,61	5,38	64,52	5,23	41,25	9,05	8,79	12,94
108,06	5,99	86,56	6,23	48,59	9,52	13,07	13,26
134,70	6,84	101,72	6,85	58,24	10,08	18,13	14,02
153,99	7,43	122,85	7,67	67,43	10,58	23,18	14,63
179,72	8,14	132,96	8,04	77,07	11,08	26,85	14,94
198,09	8,62	141,68	8,35	85,34	11,54	32,37	15,68
216,46	9,10	150,87	8,68	94,99	12,06	36,96	16,09
235,76	9,56	160,98	9,02	104,63	12,45	42,93	16,58

2.2.6.2 Influência da temperatura da água no desempenho hidráulico

Para avaliar a influência da temperatura da água no desempenho hidráulico em regime turbulento, procedeu-se da seguinte maneira:

Montou-se uma linha lateral em laboratório, de 3,00 metros de comprimento, na qual os microtubos foram conectados. Para tanto, se estabeleceu 10 diferentes pressões que seriam aplicadas no início da linha lateral, para determinado comprimento de microtubo. Para cada pressão, coletou - se três vazões e monitorou - se a temperatura da água em cada coleta. Este procedimento foi realizado em dois períodos sendo que no segundo, a água apresentou temperaturas superiores ao primeiro. Após coletados, os dados foram digitalizados em planilha de Excel e os valores de acréscimo de vazão foram plotados em gráficos em função do acréscimo de temperatura e pressão aplicada, para cada tipo de microtubo. Com os dados de temperatura medida, pressão de operação, comprimento dos microtubos utilizados nos testes e coeficiente K de dissipação de energia localizada obtido em testes anteriores, estimou-se os valores de acréscimo de vazão.

Os dados de pressão e temperatura em que foram realizados os testes na primeira e segunda etapa, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de pressão e temperatura em que foram realizados os testes de vazão nas duas etapas

Primeira etapa		Segunda etapa	
Pressão KPa)	Temperatura (K)	Pressão KPa)	Temperatura (K)
110	298,00	110	299,35
171	298,50	171	300,40
192	298,80	192	300,70
312	299,00	312	301,00
140	299,00	140	301,20
243	299,10	243	301,60
221	299,10	221	301,70
343	299,30	343	301,90
222	299,30	222	302,05
414	299,65	414	303,00

Outra forma de análise realizada foi por meio da uniformidade de distribuição das vazões, coeficiente de variação de vazão e vazão média ao longo de uma linha lateral.

Para tanto, instalou-se uma linha com 60 emissores espaçados de 0,50 m e mediu-se a vazão apresentada em cada microtubo, bem como as diferentes temperaturas da água. Os comprimentos dos microtubos foram projetados utilizando o modelo matemático WSBOTREL proposto, sendo que a coleta das vazões em diferentes temperaturas foi realizada para posterior análise da influência de suas diferenças na vazão. Os resultados foram plotados em gráficos em função da temperatura da água.

2.2.6.3 Avaliação do sistema de irrigação utilizando os modelos propostos

A avaliação técnica do desempenho do sistema de irrigação baseou-se em metodologias já consagradas na literatura, com a utilização de coeficientes que representam a uniformidade de distribuição de vazão, uniformidade estatística e coeficiente de variação de vazão, conforme equações (62), (63) e (64), recomendadas por KRUSE (1978), KELLER et al. (2001) e SOLOMON (1979), respectivamente.

$$UD = 100 \frac{Q_{min}}{Q_{med}} \quad (62)$$

$$U_{est} = 100 \left(1 - \frac{\sigma}{Q_{med}} \right) \quad (63)$$

$$CVQ = \frac{\sigma}{Q_{med}} \quad (64)$$

Em que:

- UD = uniformidade de distribuição de vazão (%);
- Q_{min} = média de 25% das menores vazões;
- Q_{med} = média de todas as vazões;
- U_{est} = uniformidade estatística (%);
- CVQ = coeficiente de variação de vazão;
- σ = desvio padrão das vazões;

O coeficiente de variação de fabricação é um importante fator que influencia a uniformidade de emissão de água, sendo que quanto maior o número de amostras,

mais confiável são os resultados, sendo recomendadas pelo menos 50 unidades de cada diâmetro para obter o CVF do emissor, conforme ABNT (1986). Portanto, para este trabalho, utilizou-se 96 amostras coletadas em uma linha lateral para se determinar o coeficiente de variação de vazão (CVQ), que segue a mesma metodologia do CVF.

2.2.6.4 Avaliação hidráulica do sistema de fertirrigação

Para verificação do desempenho hidráulico do sistema, foram realizadas coletas de vazão nos microtubos conectados às linhas laterais, instaladas na bancada com mudas de laranja fertirrigadas, durante dois períodos: um após 60 dias de implantação do sistema, e outro com 160 dias. As amostras foram utilizadas para quantificação da uniformidade de distribuição (UD) e grau de entupimento (GE) dos emissores durante o período de estudo

Para determinação da uniformidade de distribuição, coletou-se o volume total aplicado em 32 coletores (quatro linhas laterais de 5,00 m, com oito emissores cada). Os emissores utilizados para coleta de vazão estiveram igualmente espaçados na linha lateral, partindo-se do primeiro emissor da linha, com um tempo de coleta de no mínimo 3,00 minutos. A quantificação da vazão foi realizada utilizando uma balança para pesar a água coletada em cada emissor. Os dados de UD foram comparados entre os dois períodos de coleta. O Grau de entupimento foi calculado de acordo com a eq. (65).

$$GE = 100 \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (65)$$

Em que:

- GE = grau de entupimento dos emissores (%);
- Q_1 = Vazão obtida nos microtubos no primeiro período de testes;
- Q_2 = Vazão obtida nos microtubos no segundo período de testes.

Atualmente na empresa, o sistema de irrigação utilizado é por meio de mangueiras (sistema testemunha), realizado pelos funcionários, sendo notado grande

desperdício de água no momento de irrigar. Em função disso, realizou - se medições para quantificar a solução aplicada por planta, utilizando o sistema atual de fertirrigação, e com microtubos. Para tanto, com auxílio de uma proveta, mediu-se a solução aplicada e a quantidade drenada total, por meio de ambos os métodos de fertirrigação, para posterior comparação entre os mesmos.

2.2.6.5 Avaliação das plantas estudadas

As mudas de laranja foram cultivadas utilizando sistema de enxertia, sendo avaliadas a partir do momento do enxerto, de duas maneiras: determinação do diâmetro basal do caule e altura atingida pelas plantas na fase de retirada da estufa.

A determinação do diâmetro basal foi realizada com auxílio de uma fita métrica, medindo - se o perímetro basal do caule conforme eq.(66), sendo o mesmo, aproximadamente circular.

$$D = \frac{C}{\pi} \quad (66)$$

Em que:

D = diâmetro (mm);

C = comprimento circular do caule (mm);

A altura foi determinada entre o cavalo e o ápice das plantas, com auxílio de uma fita métrica.

Ambos os procedimentos foram realizados em 24 plantas escolhidas ao acaso na bancada experimental e em uma bancada não experimental (testemunha), onde foram realizados os procedimentos normais de irrigação com mangueira, para efeito de comparação entre as plantas cultivadas sob os diferentes métodos de manejo. As plantas tiveram então seus diâmetros e alturas medidos, ordenados em seqüência crescente de altura para facilitar a análise, e plotados em gráficos para visualização.

2.3 Resultados e discussões

2.3.1 Diâmetros dos microtubos

Os valores de diâmetros apresentados pelas duas metodologias de determinação são mostrados na Tabela 7, com os dados de média (M), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) em porcentagem.

Tabela 7 – Diâmetros dos microtubos utilizando testes hidráulicos em laboratório e projetor de perfil

Testes hidráulicos								
Pressão KPa	Microtubo							
	Verde		Amarelo		Laranja		Azul	
	Q (Lh ⁻¹)	D(mm)	Q	D	Q	D	Q	D
17,610	0,084	0,702	0,105	0,761	0,164	0,892	0,236	1,110
110,677	0,664	0,703	0,700	0,765	0,977	0,889	1,638	1,110
120,186	0,705	0,701	0,800	0,762	1,055	0,894	1,773	1,111
155,808	0,922	0,705	1,023	0,762	1,426	0,888	2,306	1,110
202,879	0,932	0,697	1,090	0,759	1,554	0,891	2,621	1,100
249,402	1,198	0,703	1,360	0,762	1,882	0,901	3,335	1,111
297,435	1,160	0,705	1,390	0,755	2,053	0,893	3,665	1,111
345,654	1,368	0,701	1,642	0,765	2,330	0,892	4,244	1,110
Média		0,702		0,761		0,893		1,109
Projetor de perfil								
M		0,655		0,708		0,804		1,015
σ		0,023		0,024		0,021		0,022
CV(%)		3,471		3,399		2,625		2,120

Na Tabela 8 pode ser verificada uma comparação entre os diâmetros obtidos pelas duas metodologias de determinação.

Tabela 8 - Comparação dos diâmetros obtidos pela metodologia utilizando avaliações hidráulicas e projetor de perfil

Microtubo	Avaliação	Projetor de perfil (mm)
	Hidráulica (mm)	
Verde	0,702	0,655
Amarelo	0,761	0,708
Laranja	0,893	0,804
Azul	1,109	1,015

Observando a Tabela 8, verifica-se que os valores médios de diâmetro dos microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul, pelo método hidráulico foram sensivelmente maiores em relação ao método do projetor de perfil.

Em trabalhos realizados por Souza (2005), o autor comenta que o diâmetro medido por meio de avaliações hidráulicas é mais representativo em relação ao valor apresentado pelo projetor de perfil. Isso ocorre, principalmente, em função do comprimento do microtubo utilizado para determinação do diâmetro, sendo que para os testes desta pesquisa, o comprimento para avaliação hidráulica foi de até 6000 vezes maior que o comprimento utilizado no projetor de perfil, no caso do microtubo Azul. Outro fator importante a ser mencionado, é a dificuldade de leitura precisa pelo projetor de perfil, pois, uma vez sendo muito pequenos os diâmetros, por mais que se tenha cuidado no corte dos microtubos, aparecem sombras na extremidade interna do microtubo, nos pontos onde o aparelho faz a leitura para determinação do diâmetro interno, interferindo, portanto, no resultado do mesmo. Além disso, as propriedades físicas do interior do material, como altura das asperezas, influenciam na velocidade de escoamento, estando, portanto, indiretamente representada quando se trabalha com avaliação hidráulica. Entretanto, para determinação do coeficiente K de dissipação de energia na entrada do microtubo (energia localizada), utilizou-se os diâmetros obtidos por avaliação hidráulica, sendo os mesmos, ligeiramente superiores aos diâmetros obtidos pelo projetor de perfil.

2.3.2 Coeficiente K de dissipação de energia localizada na entrada do microtubo

Depois de terminados os testes de laboratório, os resultados de KV, KA, KL, e KAz para os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul, respectivamente, foram plotados graficamente em função do número de Reynolds conforme Figura 11.

Figura 11 – Gráfico apresentando os Valores de K em relação ao número de Reynolds, para os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul

Observando o gráfico da Figura 11, nota-se que a equação potencial gerada apresentou bom ajuste para a relação entre os valores de K e Reynolds, tendo, portanto, coeficientes de determinação iguais a: 0,7289; 0,8734; 0,8932 e 0,8747 para os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul, respectivamente.

Portanto, para o dimensionamento de microtubos, no qual o valor de k é inserido, utilizou-se valores de k gerados em função das equações apresentadas no gráfico da Figura 11, para tanto, a Tabela 9 apresenta alguns coeficientes k em função de Reynolds a partir de 4000, para todos os microtubos estudados.

Tabela 9 - Coeficientes K de dissipação de energia para diferentes valores de Reynolds

Verde	Amarelo	Laranja	Azul	Reynolds
-----K-----				
2,87	3,52	3,70	4,38	4000
2,52	3,20	3,45	3,98	4500
2,25	2,94	3,24	3,65	5000
2,02	2,72	3,07	3,38	5500
1,84	2,54	2,91	3,15	6000
1,68	2,38	2,78	2,95	6500
1,55	2,24	2,66	2,78	7000

Para valores de Reynolds abaixo de 4000, o regime seria laminar, para valores acima de 7000, a vazão seria muito elevada o que serviu de base para limitar os valores de k em função de Reynolds.

Utilizando o mesmo procedimento acima para determinação das equações que representam K em função de Reynolds, a Figura 12 mostra graficamente os dados de vazão (Lh^{-1}) apresentados pelos microtubos Verde (QV), Amarelo (QA) Laranja (QL) e Azul (QAz), em função do número de Reynolds. Este procedimento foi realizado, tendo em vista a seguinte afirmativa: sabendo-se que o número de Reynolds é um quesito para dimensionamento de microtubos e designação do regime de escoamento, gerar uma tabela a partir das equações, com valores de vazão em função do número de Reynolds como mostra a Tabela 10, facilitaria na escolha da vazão de operação do sistema de irrigação, sendo esta, uma informação de entrada nos modelos matemáticos para dimensionamento de microtubos, que serão apresentados na sequência.

Figura 12 – Gráfico observado para os Valores de vazão em relação ao número de Reynolds para os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul

Na Tabela 10 encontra – se os dados de vazão obtidos pelas equações dos microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul apresentadas no gráfico da Figura 12.

Tabela 10 - Valores de vazão para diferentes números de Reynolds

Verde	Amarelo	Laranja	Azul	Reynolds
-----Vazão (Lh ⁻¹)-----				
6,36	7,22	8,59	10,71	4000
7,11	8,07	9,59	11,91	4500
7,86	8,92	10,59	13,11	5000
8,61	9,77	11,59	14,31	5500
9,36	10,62	12,59	15,51	6000
10,11	11,47	13,59	16,71	6500
10,86	12,32	14,59	17,91	7000

Os valores de vazão em função do número de Reynolds foram bem apresentados pelas equações lineares da figura 12, estando os dados bem próximos da reta, com coeficientes de determinação próximos de um, para todos os microtubo.

2.3.3 Modelos matemáticos desenvolvidos

Dois modelos matemáticos foram desenvolvidos, de maneira tal que neles estivessem envolvidas as equações de dissipação de energia no microtubo; no cabo; na saída do microtubo em função da vazão; e devido à passagem da água do conector para dentro do microtubo

Os modelos gerados foram o UNIVERSAL e WSBOTREL. Ambos utilizando todas as equações de dissipação de energia mencionadas, entretanto, o modelo WSBOTREL, se diferencia no que diz respeito aos dados de entrada, pois, alguns destes foram obtidos por meio de testes de laboratório, para serem utilizados como constantes.

Durante os testes de laboratório, as temperaturas da água nas coletas da vazão oscilaram entre 299 e 306 K, no entanto, os valores de número de Reynolds foram obtidos nesta faixa de temperatura. Dessa forma, o modelo WSBOTREL, não tem temperatura como dado de entrada no cálculo da dissipação de energia no microtubo, e o número de Reynolds no microtubo é fornecido em função da vazão que se deseja, conforme Tabela 11. Em função da superioridade do diâmetro do cabo em relação ao do microtubo, o valor de Reynolds no cabo tem influencia quase zero no resultado final do comprimento do microtubo, portanto, para o cálculo do mesmo, pode se adotar qualquer temperatura entre 299 e 306 K, utilizando o modelo WSBOTREL. Os modelos para dimensionamento de microtubo UNIVERSAL e WSBOTREL tiveram suas demonstrações realizadas nas equações (36 - 48) e (49 - 57), respectivamente, e, estão apresentados conforme equações (67) e (68).

$$L_{2-3} = \left\{ \left[P_4 - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \right] - \left[\frac{0,316 \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1,75} v^{0,25} \left(\frac{Q^{1,75} L_{1-2}}{D_1^{1,75}} \right) \right] - \left[\frac{16}{2\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D_2^4} \right) \right] - \left[\frac{16}{2\pi^2 g} \left(K \frac{Q^2}{D_2^4} \right) \right] \right\} \left[\frac{2g}{0,316 v^{0,25} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1,75} D_2^{4,75}} \frac{D_2^{4,75}}{Q^{1,75}} \right] \quad (67)$$

$$L_{2-3} = \left\{ \left[\left[\left(P_4 + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) - Hf_L \pm dZ - (Z_3 - Z_1) \right) \left(\frac{Re_2^{0,25} D_2^5}{0,026110086 Q^2} \right) \right] - \left[\frac{(K+1) D_2 R_2^{0,25}}{0,316} \right] - \left[L_{1-2} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \left(\frac{Re_2}{Re_1} \right)^{0,25} \right] \right] \right\} \quad (68)$$

Em que:

- P_4 = carga de pressão na entrada do cabo, no ponto 1 (m.c.a);
 Hf_L = dissipação de energia na linha lateral entre os pontos 4 e 1(m.c.a) ;
 dZ = diferença de nível (m) entre os pontos 4 e 1($Z_4 - Z_1$) ;
 Z_3 = cota no ponto 3 (m);
 Z_1 = cota no ponto 1 (m);
 Q = vazão no microtubo (m^3s^{-1});
 ν = viscosidade cinemática (m^2s^{-1});
 D_1 = diâmetro do cabo (m);
 D_2 = diâmetro do microtubo(m);
 L_{1-2} = comprimento do cabo (m);
 L_{2-3} = comprimento do microtubo (m);
 K = constante de dissipação de energia na entrada do microtubo (adimensional);
 V_1 = velocidade do fluido no ponto 1 (ms^{-1});
 V_4 = velocidade do fluido no ponto 4 (ms^{-1});
 Re_1 = número de Reynolds no cabo (adimensional);
 Re_2 = número de Reynolds no microtubo (adimensional);

2.3.4 Avaliação dos modelos matemáticos

As Figuras 13 e 14 apresentam graficamente os valores de vazão de projeto (estimada), utilizada no dimensionamento pelos modelos UNIVERSAL e WSBOTREL, e observada nos testes de campo com os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul.

Figura 13 - Vazão estimada e observada, utilizando o modelo UNIVERSAL

Figura 14 - Vazão estimada e observada, utilizando o modelo WSBOTREL

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida descritiva da qualidade do ajustamento do modelo e representa a proporção (ou porcentagem) da variação da vazão medida, explicada em relação à vazão estimada, pelo modelo de regressão.

Observando os gráficos das Figuras 13 e 14, pode-se notar que os dados de vazão observados e coletados se aproximam da reta, sendo que os coeficientes R^2

ajustados foram próximos de um, apresentando valores de 0,9879 e 0,9883, respectivamente, obtidos em função das equações geradas para os modelos UNIVERSAL e WSBOTREL. Portanto, os valores próximos de um significam determinação alta, ou seja, os modelos se ajustaram de maneira quase perfeita. Assim, uma vez que a variação dos dados observados é explicada pela variação dos dados estimados, para esta avaliação, a dispersão apresentada foi quase nula entre os pares de valores. Apesar de termos valores altos de R^2 , não se garante exatidão nos dados, portanto, faz-se necessário a utilização de outras análises estatísticas.

Na intenção de avaliar a precisão e exatidão entre as vazões estimadas e observadas, bem como o erro cometido ao se utilizar o modelo UNIVERSAL e WSBOTREL, a Tabela 11 traz alguns indicadores de desempenho estatístico, sendo eles: coeficiente de correlação de Pearson (índice de precisão); índice de concordância de Willmott (exatidão), erro médio absoluto (EMA) da vazão (Lh^{-1}) e o índice médio de erro (s) em porcentagem, calculado em função dos pares de vazão (vazão de projeto e observada em campo), em relação aos microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul.

Tabela 11 - Resultado estatístico do erro médio absoluto (EMA) da vazão (Lh^{-1}), dos coeficientes de correlação de Willmott e Pearson e do índice médio de erros (s) em porcentagem, utilizando as vazões estimadas e observadas no funcionamento em campo

Método de análise	Microtubo			
	Verde	Amarelo	Laranja	Azul
Modelo UNIVERSAL				
Pearson	0,9934	0,9702	0,9971	0,9898
Willmot	0,9820	0,9791	0,9931	0,9849
EMA	0,4939	0,5943	0,3279	0,9222
s	7,5430	7,9420	3,1101	5,4600
Modelo WSBOTREL				
Pearson	0,9928	0,9679	0,9975	0,9853
Willmot	0,9827	0,9792	0,9938	0,9860
EMA	0,4749	0,5693	0,3129	0,8812
s	7,2320	7,5830	2,9603	5,2000

De acordo com os valores apresentados na Tabela 11, por meio de ambos os modelos se obteve ótimo desempenho. Os valores de vazão foram estimados precisamente e exatamente acima de 96% e 97%, quando se utilizou o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância de Willmott, respectivamente, para todos os microtubos.

O erro médio absoluto também teve valores parecidos entre os modelos, sendo que o modelo WSBOTREL apresentou resultados ligeiramente inferiores ao UNIVERSAL. O maior EMA ocorreu quando se utilizou o microtubo azul que apresenta maior diâmetro, entretanto, não se pode dizer que este erro aumenta em função de se ter maior diâmetro, pois existem outras variáveis interferentes, como o próprio erro na metodologia de coleta dos dados, a variação na medida do diâmetro do microtubo. Além disso, os valores do coeficiente K de dissipação de energia localizada, inseridos na equação que determina os comprimentos dos microtubos, foram estimados por uma equação conforme mostra a Tabela 9, isso permite também uma pequena variação em função desta variável, tendo em vista que os coeficientes de determinação das equações foram menores que um. Para esta avaliação, os valores de Reynolds chegaram a 10800, com vazões muito altas, o que aumenta ainda mais as chances em se obter valores maiores de EMA principalmente quando se utiliza diâmetros maiores. Portanto, para este tipo de trabalho, recomenda-se utilizar Reynolds abaixo de 7000.

Analisando o índice médio de erros, nota-se que os valores apresentados quando se utilizou o modelo WSBOTREL, foram sensivelmente menores para todos os microtubos, quase não sendo notada diferença. Por outro lado, a maior variação foi de 7,94% para o microtubo amarelo utilizando o modelo UNIVERSAL, o que significa excelência em termos de campo.

A pequena diferença de erros entre os modelos pode ser explicada pelo fato de que quando se trabalha com um modelo gerado a partir de testes de laboratório, aumenta-se a chance de utilizar de maneira mais correta, variáveis como rugosidade relativa do material, estando a mesma representada indiretamente no modelo WSBOTREL. Entretanto, para o modelo UNIVERSAL, esta variável não é expressa como dado de entrada na equação, uma vez que se trabalhou com tubos lisos.

Avaliando no geral os dados estatísticos apresentados na Tabela 11, pode-se dizer que o desempenho dos modelos matemáticos, foi muito bom, portanto, ambos os modelos podem ser utilizados para dimensionamento de microtubos.

2.3.5 Influência da temperatura da água no desempenho hidráulico

Nas Figuras 15 (a, b) e 16 (a, b) estão apresentados graficamente os valores de Variação de vazão observados em função da variação de temperatura e pressão de operação, e estimados para as mesmas condições de realização dos testes, utilizando os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul.

Figura 15 (a, b) – Variações de vazão estimada e medida nos microtubos Verde e Amarelo, em função de diferentes temperaturas e pressão de operação

Figura 16 (a, b) – Variações de vazão estimada e medida nos microtubos Laranja e Azul, em função de diferentes temperaturas e pressão de operação

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados estatísticos de média geral dos valores de variação de vazão medidos e simulados, em função das temperaturas e pressão de operação.

Tabela 12 - Resultados estatísticos das variações de vazão em função de diferentes temperaturas e pressão

Método de análise	Variação de vazão nos microtubos (%)			
	Verde	Amarelo	Laranja	Azul
Média geral Medido	0,86	0,85	0,70	0,57
Media geral simulado	0,52	0,51	0,45	0,38
Media geral (medido e simulado)	0,69	0,68	0,58	0,48
Variação média de temperatura	2,31 K			

Pelas Figuras 15 (a, b) e 16 (a, b) nota-se que em todos os microtubos a variação de vazão medida foi um pouco superior à estimada, comprovando mais uma vez a importância dos testes de laboratório, pois, apesar de se tratar de um material conhecido, o polietileno, algumas propriedades físicas como rugosidade relativa, ou mesmo propriedades construtivas como o diâmetro dos microtubos, interferem nos resultados finais de vazão. Observa-se ainda que para todos os microtubos, a variação de vazão seguiu o comportamento da oscilação de temperatura, em ambas as situações simuladas e medias. Entretanto, estes resultados de variação são baixos, não chegando a interferir de forma significativa na vazão do microtubo. Estes resultados corroboram com as afirmativas feitas por (OLIVEIRA et al., 2000).

Analisando a Tabela 12, é possível perceber que a variação média de vazão foi muito pequena, em todos os microtubos, apresentando maior valor para o microtubo de menor diâmetro, e menor valor para o de maior diâmetro. Em função de nesta pesquisa terem sido realizados testes com mesma pressão de operação nos microtubos, a justificativa indicada para tal comportamento da variação de vazão é de que a interferência da viscosidade cinemática na vazão seja um pouco maior nos diâmetros menores, em função do acréscimo de temperatura, no momento de passagem do líquido dentro dos microtubos. Entretanto, são necessários outros estudos com ensaios de vazão, para se concluir a respeito desta análise.

Avaliando os microtubos Verde e Amarelo, não se notou diferença na variação de vazão, entretanto, os mesmos possuem diâmetros bem próximos. A variação média geral de vazão foi insignificante, podendo ser adotado variação zero, entretanto, a temperatura variou pouco, por isso, para maiores temperaturas, é possível que a variação de vazão seja maior, necessitando-se de mais estudos a respeito.

Nas Figuras 17 e 18 (a, b) estão apresentados os resultados de uniformidade de distribuição de vazão (%), coeficiente de variação de vazão (%), e vazão média (Lh^{-1}) em diferentes temperaturas, observados nos microtubo instalados em uma linha lateral.

Figura 17 – Resultados estatísticos de uniformidade de distribuição de vazão

a

b

Figura 18 (a, b) – Resultados estatísticos de coeficiente de variação de vazão (a), e vazão média (b) em diferentes temperaturas de operação

Pelas Figuras 17 e 18 (a, b) pode-se observar que a uniformidade de distribuição, coeficiente de variação da vazão e vazão média foram alterados com o aumento ou redução da temperatura, sendo que o microtubo azul foi o que mais apresentou tais alterações. Em relação ao coeficiente de variação de vazão, o maior valor (5,74%), foi obtido utilizando o microtubo azul quando a temperatura esteve a 303 Kelvins. A vazão média sofreu pouca influência da variação de temperatura, ocorrendo o maior valor para o microtubo de maior diâmetro (azul), com 2,90 % acima, quando a temperatura se elevou em 3,00 Kelvins. Avaliando - se todos os microtubos em conjunto, nota - se que a uniformidade de distribuição mínima ficou acima de 94%, sendo classificada como média por SOLOMON (1979) e SOIL CONSERVATION SERVICE-USDA (1979), e boa por ABNT (1986), chegando a 98% em seu valor máximo, sendo considerado como excelente.

2.3.6 Avaliação dos sistemas de irrigação projetados com auxílio dos modelos matemáticos

Uma linha lateral de irrigação de comprimento de 50,00 metros foi projetada em função de uma vazão predeterminada e Reynolds a 4500, variando o comprimento dos microtubos, pelos dois modelos matemáticos apresentados. As Figuras 19 (a, b) e 20 (a, b) mostram graficamente as vazões pontuais ao longo da linha lateral em campo, obtidas com os microtubos Verde, Amarelo, Laranja e Azul. A vazão estimada é aquela que se desejou, ou seja, vazão de projeto, sendo que a mesma foi uma informação de entrada igual para os dois modelos de dimensionamento. A vazão medida é a que foi coletada ao longo da linha lateral, nos microtubos projetados pelos modelos WSBOTREL e UNIVERSAL.

Figura 19 (a, b) – Dados de vazão estimada (vazão de projeto) e medidas na linha lateral, utilizando os modelos WSBOTREL e UNIVERSAL, para os microtubos Verde e Amarelo

a

b

Figura 20 (a, b) – Dados de vazão estimada (vazão de projeto) e medidas na linha lateral, utilizando os modelos WSBOTREL e UNIVERSAL, para os microtubos Laranja e Azul

Observando os gráficos das Figuras 19 (a, b) e 20 (a, b), pode-se notar que os dados de vazão ao longo da linha lateral foram bem distribuídos, para todos os microtubo estudados, apresentando pequenas oscilações em torno da vazão de projeto. De maneira geral, para todos os microtubos dimensionados pelo modelo UNIVERSAL, com exceção do Verde apresentado na Figura 19 (a), os dados coletados de vazão estiveram acima da vazão de projeto. Utilizando o modelo WSBOTREL, as vazões ao longo da linha lateral estiveram mais próximas da vazão de projeto, o que justifica os maiores valores dos coeficientes de correlação de Willmott apresentados na Tabela 11, quando se utilizou este modelo.

O microtubo azul apresentou maiores variações e afastamento das vazões coletadas em relação à vazão estimada, utilizando ambos os modelos matemáticos de dimensionamento. Isso pode ser explicado também em função de este microtubo ter o maior diâmetro, uma vez que qualquer variação no mesmo interfere mais significativamente na vazão, quando se compara com microtubos de menores diâmetros.

Nas Figuras 21 (a, b, c) e 22 (a, b, c) estão apresentadas graficamente as análises estatísticas para os dados de vazões observadas ao longo da linha lateral em campo, bem como uma comparação da vazão média coletada em relação à de projeto, utilizando os dois modelos para dimensionamento dos microtubo verde (V), amarelo (A), Laranja (L) e azul (Az).

Na intenção de se realizar uma análise e comparação entre os modelos propostos, utilizou-se os seguintes dados: vazão estimada como sendo a vazão de projeto (Lh^{-1}); vazão média observada ao longo da linha lateral em todos os microtubos instalados (Lh^{-1}); uniformidade de distribuição das vazões (UD) em porcentagem; uniformidade estatística das vazões (Uest) em porcentagem; coeficiente de variação de vazão (CVQ) em porcentagem; erro médio absoluto (EMA) em litro por hora e o índice médio de erro (s) em porcentagem como sendo uma medida do percentual que representa o erro “cometido” a respeito da vazão coletada em relação à vazão de projeto.

a

b

c

Figura 21 (a, b, c) – Resultados estatísticos em função das vazões de projeto e observadas na saída dos microtubos verde(V), amarelo (A), laranja (L) e azul (A), ao longo da linha lateral, utilizando o modelo UNIVERSAL e WSBOTREL

a

b

c

Figura 22 (a, b, c) – Resultados estatísticos em função das vazões de projeto e observadas na saída dos microtubos verde(V), amarelo (A), laranja (L) e azul (A), ao logo da linha lateral, utilizando o modelo UNIVERSAL e WSBOTREL

Pela Figura 21 a, nota-se que as vazões médias ao longo da linha lateral estiveram próximas da vazão estimada. O modelo UNIVERSAL permitiu vazões médias iguais (microtubo Laranja) ou pouco superiores à vazão de projeto, enquanto que para o modelo WSBOTREL, as vazões foram sempre iguais (microtubo Laranja) ou pouco inferiores. Isso significa que os comprimentos projetados utilizando o modelo UNIVERSAL deveriam ser um pouco maiores, enquanto utilizando o modelo WSBOTREL, deveriam ser menores. Entretanto, as justificativas para esta pequena diferença de vazão são as seguintes: em ambos os modelos, o valor de K utilizado na equação de dissipação de energia localizada, pode ter interferido, pois, o mesmo foi estimado por uma equação ajustada, gerada a partir de dados de laboratório, além disso, qualquer pequena variação no diâmetro contribuiria para tal diferença; pelo modelo WSBOTREL, pode-se afirmar que os valores constantes como temperatura e Reynolds podem também ter interferido no resultado final do comprimento do microtubo. Entretanto, as diferenças de vazão notadas em função do modelo utilizado no dimensionamento, podem ser consideradas como irrelevantes em termos de projeto.

Pela Figura 21 (b, c), nota-se que as vazões foram bem distribuídas ao longo da linha lateral em todos os microtubos estudados. Os comprimentos dos microtubos foram estimados de maneira satisfatória pelos modelos UNIVERSAL e WSBOTREL, em função da vazão de projeto, conseqüentemente, obteve - se baixos coeficientes de variação da vazão conforme apresentado na Figura 22(a), considerados com a melhor classificação segundo SOLOMON (1979), SOIL CONSERVATION SERVICE-USDA (1979), ABNT (1986).

Os maiores valores de CVQ foram observados para o microtubo Azul, que, conseqüentemente apresentou menor uniformidade estatística, não sendo a mesma, inferior a 98%, utilizando os dois modelos matemáticos no dimensionamento dos microtubos. Pelas Figuras 22 (b, c) nota-se que tanto os valores de erros médios absolutos cometidos em função da vazão estimada, quanto os resultados de índice médio de erros foram baixos. O maior índice médio de erro não ultrapassou 2%, considerado ótimo, com exceção do microtubo Azul quando se utilizou o modelo UNIVERSAL, que apresentou um EMA de $0,66 \text{ Lh}^{-1}$ com índice médio de erro igual a

5,59 %, podendo ser considerado como um valor bom, uma vez que o CVQ foi baixo e igual a 1,51%.

2.3.7 Avaliação hidráulica do sistema de Fertirrigação

Nas Figuras 23 e 24 apresenta - se graficamente as vazões coletadas ao longo das quatro linhas laterais instaladas na bancada de mudas de laranja, nos períodos de 60 e 160 dias, respectivamente, após o início da fertirrigação.

Figura 23 – Vazões coletadas nas quatro linhas laterais instaladas na bancada de mudas de laranja, após 60 dias de instalação

Figura 24 – Vazões coletadas nas quatro linhas laterais instaladas na bancada de mudas de laranja, após 160 dias de instalação

Figura 25 - Comparação entre as vazões coletadas nos dois períodos de teste, após instalação do sistema de fertirrigação, ao longo de todas as linhas laterais

Observando os gráficos das Figuras 23 e 24, nota-se que a distribuição das vazões pontualmente foi similar entre as linhas laterais, com pequenas variações ao longo das mesmas, em ambos os períodos de testes. No entanto, estas pequenas variações podem ter ocorrido em consequência da variação no processo de fabricação do microtubo, cujo valor foi de 3,40% nos diâmetros medidos com projetor de perfil, conforme apresentado na Tabela 7.

Pelo gráfico da Figura 25, é possível notar que as vazões coletadas nos dois períodos de testes, quase se confundem, ou seja, tem valores bem próximos. Os dados coletados oscilaram em torno da linha de valor estimado, ora abaixo, ora acima, não mais que 0,32 Lh⁻¹.

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados da análise estatística das vazões apresentadas nos dois períodos de análise, sendo: vazão estimada (Q_{estm}), vazão mínima (Q_{min}), vazão máxima ($Q_{máx}$), vazão média ($Q_{méd}$), moda das vazões (Q_{moda}), uniformidade de distribuição (UD), erro médio absoluto (EMA), índice médio de erro da vazão (s) e grau de entupimento (GE) dos microtubo, no período de estudo.

Tabela 13 – Resultado estatístico das vazões coletadas nos microtubo nos dois períodos de análise

Período de 60 dias após início da fertirrigação										
Q estim	Q min	Q máx	Q méd	Q moda	EMA	UD	CVQ	s	GE	
-----Lh ⁻¹ -----					-----%-----					
8,60	8,40	8,92	8,70	8,80	0,17	97,51	2,11	1,99	0,50	
Período de 160 dias após início da fertirrigação										
8,60	8,37	8,72	8,67	8,64	0,16	97,36	1,94	1,82		

Pela Tabela 13, nota-se que a vazão coletada apresentou valor médio próximo da estimada, em ambos os períodos de testes, com diferenças muito pequenas. As uniformidades de distribuição das vazões foram acima de 97% em ambos os períodos, demonstrando baixa variação de vazão e índice médio de erro de vazão. Todos os dados estatísticos (EMA, CVQ, s) foram baixos em ambos os períodos de análises, mostrando que o dimensionamento foi ótimo, e que o sistema de fertirrigação nas condições desta pesquisa, operando em regime turbulento não apresentou entupimento, sendo isso confirmado pelo baixo GE. A uniformidade de distribuição obtida nos dois períodos de análise foi acima de 97%, considerada como excelente, estando este resultado próximo ao que se consegue com gotejadores autocompensantes, existentes no mercado, com vantagens de ser barato e não ter apresentado entupimentos.

Além destas análises, realizou - se uma avaliação do desperdício de solução, utilizando o método de irrigação convencional com mangueiras. Verificou-se que a quantidade de água aplicada no sistema de mangueiras semanalmente, adotado pela empresa é de 1,20 L por planta, tendo sido coletado uma média de 0,50 L de volume drenado. A vazão média aplicada com microtubos foi de 8,67 L⁻¹, sendo que o sistema funcionava durante 7,00 minutos em duas irrigações durante a semana, dessa forma, o volume médio aplicando foi de 1,01 L de solução e o volume drenado em média foi de 0,20 L. Comparando os dois métodos, pode-se dizer que nas condições de manejo adotadas, com microtubo, reduz - se o desperdício em 0,30 L de solução aplicado por planta semanalmente e aumenta-se o volume retido no substrato em 0,10 L por planta.

2.3.8 Análises das mudas de laranjas cultivadas

Na Tabela 14 estão apresentados os dados de diâmetro do caule e altura das plantas, manejadas com irrigação por mangueiras (testemunha) e com microtubo (experimental), bem como a variação no diâmetro (ΔD) e altura (Δh) das plantas.

Tabela 14 - Diâmetro (D) do caule e altura (h) atingida pela planta utilizando microtubo e mangueira como métodos de irrigação

Experimental		Testemunha		Variação	
D (mm)	h (mm)	D (mm)	h (mm)	$\Delta D(m)$	$\Delta h (mm)$
6,21	340,00	6,29	380	-0,08	-40,00
6,37	370,00	6,37	375	0,00	-5,00
6,37	380,00	6,68	410	-0,32	-30,00
6,37	440,00	6,68	440	-0,32	0,00
6,68	435,00	7,00	390	-0,32	45,00
7,00	375,00	7,00	410	0,00	-35,00
7,00	390,00	7,00	430	0,00	-40,00
7,00	435,00	7,00	460	0,00	-25,00
7,16	452,00	7,00	480	0,16	-28,00
7,32	475,00	7,00	490	0,32	-15,00
7,32	490,00	7,32	450	0,00	40,00
7,64	500,00	7,32	470	0,32	30,00
7,80	480,00	7,32	470	0,48	10,00
7,96	485,00	7,32	480	0,64	5,00
7,96	490,00	7,64	450	0,32	40,00
7,96	490,00	7,64	480	0,32	10,00
7,96	495,00	7,80	510	0,16	-15,00
7,96	500,00	7,96	490	0,00	10,00
7,96	500,00	7,96	495	0,00	5,00
7,96	500,00	7,96	500	0,00	0,00
7,96	510,00	7,96	500	0,00	10,00
8,12	500,00	7,96	510	0,16	-10,00
8,12	505,00	7,96	510	0,16	-5,00
8,28	510,00	8,28	510	0,00	0,00

Na Tabela 15 apresenta – se os resultados estatísticos de média, desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV), mínimo, máximo, moda, mediana, erro máximo e erro médio nas diferenças obtidas para os dados de diâmetro do caule e altura das plantas, cultivadas na bancada experimental (manejadas com microtubo) e na bancada testemunha (manejadas com mangueira), onde se utilizou o procedimento padrão de irrigação com mangueiras, adotado pela empresa

Tabela 15 - Resultados de média, desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV), mínimo, máximo, moda, mediana, diferença máxima e média, obtidos para os dados de diâmetro do caule e altura das plantas manejadas com microtubo e mangueira

Parâmetros de Análise	Diâmetros do caule		Alturas das plantas	
	Experimental	Testemunha	Experimental	Testemunha
Média (mm)	7,43 A	7,35 A	457,79 A	462,08 A
σ (mm)	0,66	0,56	53,01	43,01
CV (%)	8,94	7,59	11,58	9,31
Mínimo (mm)	6,21	6,29	340,00	375,00
Máximo (mm)	8,28	8,28	510,00	510,00
Moda (mm)	7,96	7,00	500,00	480,00
Mediana (mm)	7,72	7,32	487,50	470,00
Diferença Máxima (mm)	0,64		18,88	
Diferença média (mm)	0,17		45,00	

*Valores com mesma letra maiúscula, não diferem entre si na mesma linha para diâmetro do caule e altura das plantas, analisados separadamente, estatisticamente pelo teste T a 5% de significância.

Nas Figuras 26 e 27 estão apresentados, respectivamente, os valores de altura e diâmetros atingidos pelas mudas de laranja. Os dados foram plotados utilizando os resultados de altura das plantas e diâmetros basal do caule, retirados da bancada experimental onde se instalou a fertirrigação e os resultados da bancada testemunha.

Figura 26 - Altura atingida pelas mudas de laranja na bancada experimental e testemunha

Figura 27 – Diâmetro do caule das mudas de laranja na bancada experimental e testemunha

Analisando os resultados obtidos, apresentados na Tabela 15, observa-se que os dados médios de diâmetro basal do caule igual a 7,43 mm e 7,35 mm, utilizando a bancada experimental com microtubos e a bancada testemunha, respectivamente, não tiveram diferença estatística significativa. O mesmo ocorreu para a altura média atingida pelas mudas de laranja com valores de 457,79 mm e 462,08mm. As plantas não apresentaram diâmetros e alturas homogêneos em ambos os métodos de manejo utilizados, entretanto, os dados de coeficientes de variação foram baixos, sendo sensivelmente maiores utilizando microtubo como métodos de irrigação. Os valores de mínimo, máximo, moda e mediana foram próximos entre ambos os métodos de manejo. Em função dos resultados obtidos, nota - se que tanto os diâmetros do caule quanto as alturas atingidas, estiveram próximos em ambos os métodos de manejo, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 26 e 27. Isso mostra que o sistema de irrigação com microtubo foi mais eficiente tendo em vista que o volume de solução aplicado foi menor. Além disso, os valores de diferença máxima e média apresentados na Tabela 15, tanto nos diâmetros quando nas alturas, podem ser considerados baixos, sendo aceitáveis para comercialização.

3 CONCLUSÕES

- ✓ Dois modelos matemáticos para dimensionamento de microtubo em regime de escoamento turbulento foram desenvolvidos (UNIVERSAL e WSBOTREL), sendo que ambos tiveram ótimo desempenho, podendo ser utilizado qualquer um, dentro das condições desta pesquisa. Para tanto, os coeficientes de dissipação de energia localizada estimados podem ser utilizados e o diâmetro deverá ser aquele determinado por avaliações hidráulicas;
- ✓ A utilização do modelo WSBOTREL é aconselhável para temperaturas da água entre 299 e 306 K, por outro lado, o UNIVERSAL pode ser utilizado para qualquer situação, exigindo, portanto, maior número de dados de entrada;
- ✓ A variação na temperatura altera a velocidade da água dentro dos microtubos operando em regime turbulento, sendo que isso ocorre de maneira mais acentuada em microtubos de diâmetros menores, não apresentando, portanto, alteração significativa na vazão com um acréscimo de 3,00 K;
- ✓ O software desenvolvido (anexo em CD) para ambos os modelos de dimensionamento apresentou precisão na determinação dos comprimentos dos microtubo, e facilidade de manuseio, uma vez sendo utilizado o Excel para programação, acessado pela maioria dos usuários de computação básica;

- ✓ O regime de escoamento turbulento permitiu a utilização dos microtubo em sistema de fertirrigação, não apresentando problemas de entupimento;
- ✓ As plantas fertirrigadas com microtubo, não tiveram diferença das plantas fertirrigadas no sistema tradicional com mangueiras, no que se refere a diâmetro do caule e altura;
- ✓ As vantagens do uso do microtubo em relação à mangueira são: otimização do uso da solução aplicada, evita o molhamento da parte aérea das culturas prevenindo a incidência de patógenos, economia de mão - de - obra. A principal desvantagem é que para produção de mudas, quando se trabalha em estufa, especificamente, no final do ciclo é necessário desmontar o sistema de irrigação para desinfecção do ambiente onde o mesmo esteja instalado, com isso, tem-se um incremento de mão - de - obra inicial.

4 SUGESTÕES DE PESQUISA

- Desenvolver um sistema de irrigação com microtubos operando sob regime turbulento, para reutilização de água em diferentes culturas, e comparar com sistemas de irrigação existentes;
- Projetar sistemas que não necessitem de desmonte no final do ciclo de produção;
- Estudar microtubo em sistema enterrado.

REFERÊNCIAS

- AIROLD, R.P. da S. **Eficiência dos meios filtrantes disco e manta sintética não tecida em fertirrigação por gotejamento**. 2003.204p. Dissertação (Mestrado em Água e Solo) – Universidade de Campinas, Campinas, 2003.
- ARMINDO, R.A. **Avaliação do desempenho e da durabilidade dos componentes do sistema de pulverização Notliada**.2007.70p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos mínimos para elaboração de projetos de sistema de irrigação localizada**;PNBR 12:-02-08-022.São Paulo, 1986.18p.
- BASTOS, E.R. **Modelo matemático para análise de fluxo transiente em rede de canais**.1997.136p.Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657 p.
- BIEMBENGUT, M.S. **Qualidade no ensino de Matemática na engenharia: uma proposta metodológica e curricular**. 1997. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- BIEMBENGUT, M.S. **Modelagem matemática e implicações no ensino-aprendizagem de matemática**.Blumenau:Ed da FURB, 1999.134p.
- BONGANHA, A.C. Meio ambiente: o uso da água na irrigação e o licenciamento ambiental. **Citricultura Atual**, Cordeirópolis, v. 5, n. 25, p.14-15, dez 2001.
- BOTREL, T.A. **Hidráulica de microaspersores e linha laterais para irrigação localizada**. 1984.78p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.
- BRALTS, V.F.; WU, I.P.; GITLIN, H.M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity.**Transaction of the ASAE**. St. Joseph, v.24, n.1,p.113-119,Jan/Feb. 1981.
- CARVALHO, G.B.de. **Dimensionamento e simulação hidráulica da irrigação localizada sob condição variável de setores de operação**. 2004.96p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- CHRISTOFIDIS, D. **Situação das áreas irrigadas: métodos e equipamentos de irrigação** - Brasil. <http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/srhde> (mar. 2002).

CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada sustentável no Semi-Árido e no Rio Grande do Norte. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.1, n. 74/75, p. 62-67, 2007.

CRUCIANI, D.E. **Hidráulica**: equações, tabelas e gráficos. Piracicaba: Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”, 1996.128p.

DAKER, A. **Hidráulica aplicada à agricultura**: A água na agricultura. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 316p.

DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M.G.A.de.; AZEVEDO, C.A.V.de.; ZEVEDO, H.M.de. Performance hidráulica e perfil de distribuição de água do microaspersor Naan 7110, sob diferentes condições de vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. I, p.57-61, 1997.

DETOMINI, E.R. **Modelagem da produtividade potencial de Brachiara brizantha (variedades cultivadas Marandu e Xaraês)**. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FAO PRODUCTION YEARBOOK. Rome: FAO, 2004. AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. Rome: ANA, 2004. CHRISTOFIDS 2004.

GHAEMI, A.; CHIENG, S. Emitter clogging and hydraulics in micro-irrigation lines. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL, 1999, Toronto. **Meeting..** St Joseph: ASAE, 1999 (Paper 992211).

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Operational principles/emitter clogging. In: NAKAYAMA, F.S.; BULKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p.142-163.

GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação**: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. 3.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 412 p.

HOLZAPFEL, E.A.; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, v.116, n.4, p.479-496, 1990.

HOWELL, T.A.; HILLER, E.A. Designing trickle irrigation laterals for uniformity. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2., 1974, San Diego. **Proceedings...** Riverside: Department of Soil Science and Agricultural Engineering, 1974. p.299-304.

JUANA, L.; SINOBAS, L.R.; M. ASCE, A.L. Determining Minor Head Losses in Drip Irrigation Laterals. In: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.1218, n.6, p. 376-384, Dec.2002.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, v.17, n.4, p.678-684, July/Aug., 1974.

KELLER, J.; ADHIKARI, D.L.; PETERSEN, M.R.; SURYAWANSHI, S. Engineering low-cost micro irrigation for small plots. **International development reprisesises**. Disponível em: <http://www.ideorg.org/html/library.jsp>. Acesso em: 11 set. 2003. 25p.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GILTLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.2, p.35-41, 1978.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GILTLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.2, p.167-173, 1979.

KRUSE, E.G. Describing irrigation efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n.1, p.35-41, 1978.

MAIA, L.A.F. **Desenvolvimento de um software para auxiliar no dimensionamento e manejo da irrigação localizada**. 1994. 158p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MAYERS, L.E.; BUCKS, D.A. Uniform Irrigation with low-pressure trickle system. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.100, p.341-347, Sep. 1972.

NASCIMENTO, T. Caracterização Hidráulica do Microaspersor Rain-Bird Qn-141. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.30-33, 1999.

OLIVEIRA, A.M. de S.; PORTO FILHO, F. de Q.; MEDEIROS, J.F. de; COSTA, M. DA C. Caracterização hidráulica do tubo gotejador hidrorip II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.483-486, 2000.

OLIVEIRA, C.A. da S. **Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para irrigação por gotejamento**. 1978. 72p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1978.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos Localizados de Alta Freqüência**. Madrid: Mundi – Prensa. 1987. 461p.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 2001. 519 p.

SAAD, J.C.C. **Otimização de sistemas de irrigação localizada utilizando programação não linear**. 1993. 115p. (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

SCHMIDT, M.V.V. **Características hidráulicas do tubo gotejador "Queen Gil"**. 1995. 43p. Dissertação (Mestrado Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

SILVA, J.G.F. **Características hidráulicas de tubos de polietileno perfurados para irrigação por gotejamento**. 1984. 63p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

SILVA, P.J.C.; BRITO, R.A.L.; AZEVEDO, H.M. Caracterização hidráulica de linhas laterais em sistemas localizados utilizando microtubos de tamanhos variados como emissores. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. **Anais...** Florianópolis: ABID, v.1. 1988. p.473-506.

SILVESTRE, P. **Hidráulica geral**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos, 1979. 310p.

SOARES, A.A. **Características hidráulicas de microtubos Cipla e de linhas laterais para irrigação por gotejamento**. 1981. 68p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n.5, p.1034-1038, 1043, Sept/Oct. 1979.

SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n. IR3, p.293-306, Sep., 1978.

SOLOMON, K.H. Global uniformity of trickle irrigation system. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.4, p.1151-1158, 1985.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistema de irrigação por gotejamento com microtubo**. 2005. 112p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

TESTEZLAF, R.; CAMPIONI, E. Comportamento hidráulico do tubo gotejador "Queen Gil". **Engenharia Agrícola**. Campinas, v.13, p.29-38, 1993.

TULLUS, J.P.; **"Hydraulics of pipelines"**. New York: John Wiley, 1989. 91p.

USDA-SOIL CONSERVATION SERVICE. **Trickle Irrigation**, Washington. 1979. cap. 7, p. 29-38.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. Localized Irrigation. Design, Installation, Operation, Evaluation. **Irrigation and Drainage**, Roma, n.36, p. 203, 1980.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Trad. de H.R. Gheyi, F.A.V. Damasceno, L.G.A. Silva Jr. e J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1997. 184p.

VIEIRA, A.T. **Caracterização hidráulica de um tubo gotejador**. 1996. 56p. (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for Evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995-9005, 1981.