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

**Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação
de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo**

Geancarlo Takanori Katsurayama

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas**

**Piracicaba
2015**

Geancarlo Takanori Katsurayama
Engenheiro Agrônomo

Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

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

Katsurayama, Geancarlo Takanori

Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo / Geancarlo Takanori

Katsurayama. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

53 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação 2. Hidráulica 3. Gotejamento 4. Uniformidade 5. Tecnologia I. Título

CDD 631.7
K19m

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

AGRADECIMENTOS

A meus pais, José e Rozalina, por terem me dado oportunidade de continuar evoluindo em meus estudos e acreditado no meu potencial.

A minha irmã, Aline, por ter me dado apoio nos momentos difíceis.

A Mariana, por estar ao meu lado todo esse tempo.

A todos os amigos e familiares, que estiveram presentes em minha vida, me ajudando e dando apoio, em especial aos amigos Deivid, Daniel, Luciano e Conan.

Aos amigos Ezequiel Saretta e Antônio Pires de Camargo, que se disponibilizaram para me ajudar. Agradeço por todos os conhecimentos a mim repassados.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de aperfeiçoamento e aprendizado.

Ao Professor Tarlei Arriel Botrel, que além de orientador, foi um amigo, sempre me ajudando nos momentos que precisei.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante este curso de mestrado.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

A Universidade do Estado de Santa Catarina pela graduação.

A todos os professores e em especial, ao Professor Olívio José Soccol e Mario Nestor Ullmann pelos conhecimentos transmitidos, ajudando na minha formação.

Aos funcionários da ESALQ e colegas de trabalho, em especial ao Marinaldo, ao Luiz e ao Hélio, pelo apoio e atenção nos momentos em que necessitei para concluir esta etapa.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 MICROIRRIGAÇÃO.....	19
2.1 Emissores.....	20
2.2 Dimensionamento de microtubos	21
2.3 Dimensionamento de linhas laterais	24
2.4 Avaliação de uniformidade.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Ensaios preliminares.....	29
3.1.1 Determinação do diâmetro interno do microtubo.....	29
3.1.2 Determinação da relação Vazão-Pressão do microtubo	30
3.1.3 Determinação da perda localizada de carga devido à inserção do microtubo	31
3.2 Desenvolvimento do aplicativo de dimensionamento de linhas laterais em nível	32
3.3 Ensaio de uniformidade da linha lateral	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Diâmetro interno do microtubo	39
4.2 Relação Vazão-Pressão do microtubo	39
4.3 Perda contínua de carga e perda localizada de carga devido a inserção do emissor.....	39
4.4 Interface do aplicativo de dimensionamento de linhas laterais	40
4.5 Detalhes da linha lateral dimensionada	41
4.6 Ensaios de uniformidade da linha lateral.....	44
CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	51

RESUMO

Metodologia para dimensionamento do intervalo de pressões de operação de linhas laterais de microirrigação com emissores do tipo microtubo

Os projetos de irrigação são convencionalmente dimensionados para operar com potência constante, garantindo-se, assim, um desempenho aceitável a campo. Contudo, existem sistemas de bombeamento que não atendem a esse requisito diretamente, como nos casos da energia fotovoltaica e da eólica. Nesses casos, inclui-se algum componente no sistema para regulação da pressão, como reservatórios, emissores regulados e/ou válvulas reguladoras. Apesar de solucionar o problema, pode haver encarecimento do projeto. Em alternativa aos emissores regulados, podem ser utilizados emissores do tipo microtubo. Estes, além de mais baratos, permitem variar seu comprimento a fim de se compensar a diferença de pressão ao longo da linha lateral. Assim, teoricamente, tem-se 100% de uniformidade na vazão dos emissores. Ainda, pode-se variar a pressão na entrada da linha lateral, dentro de certo limite, sem comprometer a uniformidade mínima de aplicação de água dos emissores. Isso permitiria o acoplamento direto do sistema de irrigação com o sistema de bombeamento, em sistemas com potência variável, sem a necessidade de algum mecanismo de interface entre os dois. Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia e um aplicativo para o dimensionamento de linhas laterais de sistemas de microirrigação com emissores do tipo microtubo, em que fosse obtido o intervalo de pressão recomendado para operação da mesma. O aplicativo foi desenvolvido em linguagem de programação PHP, para disponibilização aos interessados. O dimensionamento da linha lateral ocorreu em duas etapas: a primeira para se obter os comprimentos dos emissores; e a segunda para se obter os limites de pressão para temperaturas de 10 a 35 °C, respeitando uma variação de vazão de 7%. Após o desenvolvimento do aplicativo, foi instalada uma linha lateral com 250 emissores, com vazão de 1 L h⁻¹ por emissor, e espaçamento de 10 cm. A avaliação do conjunto foi realizada coletando-se a vazão de 51 emissores para três pressões: a máxima (84,43 kPa), a mínima (16,32 kPa) e a ótima (39,00 kPa), sendo esta a que fornecia a menor variação de vazão. As uniformidades de distribuição do menor quartil obtidas para a pressão mínima, ótima e máxima, respectivamente, foram de 95,25, 97,80 e 97,83%; e os coeficientes de uniformidade estatísticos 96,79, 98,37 e 98,37%. Ambos os índices, portanto, podem ser classificados como excelentes. Dessa forma, pode-se concluir que aplicativo desenvolvido foi capaz de fornecer tanto os comprimentos dos microtubos, quanto os intervalos de pressão para operação da linha lateral, para a variação de vazão admitida.

Palavras-chave: Irrigação; Hidráulica; Gotejamento; Uniformidade; Tecnologia

ABSTRACT

Methodology for designing intervals of pressures to operate laterals of microirrigation with microtube emitters

Irrigation projects are conventionally designed to operate at constant power, and thus guarantee an acceptable field performance. However, there are pumping systems that do not directly satisfy such requirement, as photovoltaic, and wind energy. For these cases, some components are added to the system to regulate pressure, such as tanks with constant level, regulated emitters, or regulating valves. Despite of the solution of the problem, the project can be enhanced. As an alternative to regulated emitters, microtubes may be used, which are less expensive and allow varying its length in order to compensate the pressure difference along the lateral line. Hence, theoretically, it provides 100% of emitting uniform flow. Furthermore, the inlet pressure of the line can be varied, within certain limits, without compromising the minimal application uniformity. This would permit direct coupling of the irrigation system to the pumping system, for those with variable power, without needing some mechanisms to interface the two systems. Therefore, the purpose of this study was to develop a methodology and a software for the design laterals with microtube emitters of microirrigation systems, from where the intervals of pressure to operate the system can be obtained. The software was developed in the PHP programming language in order to share it with the users. Laterals were designed in two steps: first to obtain the lengths of the emitters, and second to obtain the pressure limits at temperatures from 10 to 35 ° C, regarding to flow variation of 7%. After developing the software, a lateral line with 250 emitters with flow rate of 1 L h⁻¹, and 10-cm spaced. Evaluations of the arrangement were carried out collecting flow of 51 emitters at three pressures: the maximum (84.43 kPa), minimum (16.32 kPa), and the optimal (39.00 kPa), which provided the lower flow variation. The uniformity of distribution of the lower quartile obtained for the lowest, optimal, and greatest pressure were, respectively, 95.25, 97.80 and 97.83%; and the statistical uniformity coefficients were 96.79, 98.37 and 98.37%. Both indices of uniformity may be then rated as excellent. Therefore, it can be concluded that the software was capable of providing both length of microtubes, and intervals of pressure to operate the lateral line, within the admitted flow variation.

Keywords: Irrigation; Hydraulics; Drip irrigation; Uniformity; Technology

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Microtubo do tipo espaguete	21
Figura 2 - Esquema de coleta de vazão para determinação hidráulica do diâmetro equivalente de microtubos	23
Figura 3 - Suporte construído para o ensaio da relação vazão-pressão do microtubo.....	30
Figura 4 - Esquema da bancada de ensaio de perda localizada de carga.....	31
Figura 5 - Fluxograma simplificado da primeira etapa de cálculo do aplicativo caso informado o comprimento do último microtubo	34
Figura 6 - Fluxograma simplificado da primeira etapa de cálculo do aplicativo caso informado a pressão na entrada da linha lateral	34
Figura 7 - Fluxograma simplificado da segunda etapa de cálculo do aplicativo.....	35
Figura 8 - Suporte para a coleta de água durante os ensaios da linha lateral	37
Figura 9 - Comparação entre os dados de vazões observados e estimados para microtubos para $K_1 = 17,78$	39
Figura 10 - Comparação entre a perda contínua de carga observada e estimada com os coeficientes de Blasius e de Cardoso, Frizzone e Rezende (2008)	40
Figura 11 - Tela inicial de interface da primeira versão do aplicativo desenvolvido, para a opção de se informar o comprimento do último microtubo	41
Figura 12 - Comprimento dos microtubos em função da sua posição na linha lateral.....	42
Figura 13 - Pressão na entrada e vazão dos microtubos para as pressões máxima ($P_{m\acute{a}x}$), ótima ($P_{\acute{o}ti}$) e mínima ($P_{m\acute{i}n}$), para 25°C	42
Figura 14 - Número de Reynolds ao longo da linha lateral obtido para as pressões máxima, ótima e mínima, para 25°C.....	43
Figura 15 - Efeito da temperatura nas pressões recomendadas de operação para a linha lateral dimensionada.....	44
Figura 16 - Efeito da temperatura na vazão média dos emissores para as faixas de operações recomendadas para a linha lateral dimensionada	44
Figura 17 - Vazões estimadas e observadas para as pressões máxima ($P_{m\acute{a}x}$), ótima ($P_{\acute{o}ti}$) e mínima ($P_{m\acute{i}n}$).....	45
Figura 18 - Diferenças relativas da vazão nos emissores para a pressão máxima, ótima e mínima.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ajuste da fórmula de cálculo de vazão em um microtubo, proposta por Vermeiren e Jobling (1980)	22
Tabela 2 - Critérios para classificação da uniformidade da UD	27
Tabela 3 - Critérios para classificação da uniformidade do CUE	28
Tabela 4 - Equações de perda de carga (m) em 25,5 m de linha lateral em função da velocidade (m s^{-1})	39
Tabela 5 - Indicadores de uniformidade de vazão e diferenças relativas observadas para as três pressões ensaiadas	46

LISTA DE SÍMBOLOS

a_1, b_1 – coeficientes de ajuste da equação de perda localizada de carga
 c_f, m – coeficientes do cálculo do fator de atrito f
CUE – coeficiente de uniformidade estatístico
 D_m – diâmetro interno do microtubo
 K_1 – coeficiente de perda localizada de carga do emissor
 K_2 – coeficiente de perda localizada de carga
LL – linha lateral
 L_m – comprimento do microtubo
 i – posição do emissor
 N_e – número de emissores
NR – número de Reynolds
 $P_{\text{máx}}$ – pressão máxima
 $P_{\text{mín}}$ – pressão mínima
 $P_{\text{óti}}$ – pressão ótima
 Q_{var} – variação de vazão
UD – uniformidade de distribuição do menor quartil
 x – expoente de fluxo
 ΔQ – diferença relativa

1 INTRODUÇÃO

Os projetos de irrigação geralmente são dimensionados para operar sob vazão e pressão constantes nos eventos de irrigação. No dimensionamento é estabelecida a pressão requerida nas subunidades de irrigação, com uma variação admissível ao longo dela. Assim, espera-se que se mantenha um valor mínimo aceitável de uniformidade de aplicação de água nessa subunidade durante a irrigação.

O comprimento das linhas laterais é calculado a partir da variação admissível de vazão em sua extensão, sendo que o tipo de emissor tem participação direta nesta determinação. Gotejadores não regulados apesar de admitirem linhas laterais menores, podem resultar num projeto de menor custo, quando comparados com os regulados, devido à diminuição dos custos anuais totais, para categorias de pressões similares (HOLZAPFEL et al., 2007).

Uma alternativa aos emissores regulados são as linhas laterais com emissores do tipo microtubo, também conhecido como espaguete. Estes possuem normalmente diâmetro interno variando de 0,5 a 1,5 mm. Além de serem mais baratos em relação aos outros gotejadores, os microtubos apresentam a possibilidade de se obtê-los com qualquer comprimento. Logo, seu comprimento pode ser ajustado de acordo com a distribuição de pressões ao longo da linha lateral (ALMEIDA; BOTREL; SMITH, 2009). Isto, teoricamente, permite que todos os emissores apresentem a mesma vazão e, por conseguinte, ter-se-á uniformidade de 100% na linha lateral.

A partir de uma linha lateral dimensionada com microtubos de diversos comprimentos também há possibilidade de operá-la com uma pressão diferente daquela projetada, atendendo a uma uniformidade mínima desejada. Isso configura, então, um intervalo de pressão em torno da pressão ótima, no qual há possibilidade de operação sem comprometimento da uniformidade. Apesar de alguns trabalhos tratarem da avaliação da uniformidade de sistemas de irrigação submetidos à variação de pressão (ALMEIDA; SAMPAIO; SUSZEK, 2006; CHIGERWE et al., 2004; KLEIN et al., 2013; SAH et al., 2010), pouco se estudou sobre a possibilidade de se dimensionar um intervalo de pressões aceitável para operação.

Sistemas de irrigação que permitam variação de pressão durante as irrigações podem ter aplicação em sistemas de bombeamento fotovoltaicos e eólicos, já que estes apresentam o inconveniente de não fornecerem potência constante ao longo do dia.

Embora esses sistemas tenham ganhado destaque nos últimos anos, ainda não são muito utilizados. Isto principalmente porque a substituição, ou mesmo a implantação de sistemas alternativos de conversão de energia, sempre esbarra no custo em relação a uma

fonte já consolidada. No entanto, a análise deve contemplar toda a vida útil do projeto, não somente os custos de implantação, que é maior no caso da energia fotovoltaica. Dessa maneira, alguns trabalhos obtiveram resultados promissores da energia fotovoltaica em relação a outras fontes convencionais, como o óleo Diesel (KELLEY et al., 2010; ODEH; YOHANIS; NORTON, 2006). Além disso, pode-se considerar que em locais isolados o custo para implantar redes de transmissão das concessionárias é elevado. Assim, fontes alternativas de energia proporcionam a utilização da irrigação nesses locais a um custo apreciável.

Para tentar solucionar o problema de variação de potência nos sistemas de bombeamento fotovoltaico são utilizados, normalmente, reservatórios para armazenar a água recalçada. Outra opção é a utilização de baterias para armazenar energia química, porém não é comum, pois o aumento do custo total a torna inviável economicamente; apesar de tornar independente o período das irrigações da disponibilidade de sol (SCHMIDT et al., 2000 apud MORALES, 2011).

Outra forma é por meio de acoplamento direto entre a bomba e o sistema de irrigação. Mas, para isso, necessita-se determinar a faixa média de pressão fornecida pelo sistema de bombeamento fotovoltaico e escolher emissores regulados para a faixa de operação estimada (PANDE et al., 2003), e/ou instalar válvulas reguladoras de pressão na saída da bomba (HERRERA, 2006 apud MORALES, 2011). Contudo, encarece-se o custo de implantação do projeto, que já é alto quando comparado com motores elétricos e a diesel, devido aos componentes do sistema, havendo também o desperdício de energia útil ao utilizar válvulas reguladoras de pressão.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar uma metodologia e um aplicativo para dimensionamento de linhas laterais com emissores do tipo microtubos, permitindo obter os intervalos de pressão para operação do sistema, mantendo-se a uniformidade desejada.

2 MICROIRRIGAÇÃO

Microirrigação é um método de irrigação caracterizado pela aplicação de pequenos volumes de água em alta frequência. Esta aplicação ocorre próximo ou dentro da zona radicular, mantendo a umidade alta em uma parcela do volume de solo, sendo este explorado pelas raízes da cultura. Nos últimos anos, sua utilização tem aumentado principalmente em locais onde o recurso hídrico é escasso e que há culturas de alto valor agregado.

Dentro das vantagens da microirrigação se destacam:

- Economia de água: menores perdas de água devido a influência de vento; menor evaporação, pois não molha a superfície dos vegetais; menor irrigação para as plantas daninhas; e minimização das perdas por escoamento superficial.
- Maior produtividade: a umidade do solo no volume explorado pelo sistema radicular permanece elevada, devido à alta frequência de irrigação. Isso diminui o estresse hídrico nas plantas.
- Facilita as práticas culturais: por não molhar toda a superfície do solo entre as linhas, alguns tratos culturais como capinas e colheitas podem ser realizados logo após a irrigação.
- Aplicação de fertilizantes: a aplicação de fertilizantes pode ser realizada por meio da irrigação. Com isso, os fertilizantes são aplicados diretamente no volume de solo explorado pelas raízes, além de favorecer a aplicação nos melhores momentos do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Algumas limitações dos sistemas de microirrigação englobam:

- Alto custo inicial: pela necessidade de cobrir toda a área de irrigação, o investimento com aquisição com os componentes é elevado.
- Entupimento dos emissores: devido aos emissores apresentarem pequenas seções de saída, são necessários filtros para retirada de partículas minerais ou orgânicas. Mesmo com essa prevenção, pode ocorrer precipitação de sais e sedimentação de partículas como silte e argila não retirada pelos filtros, ocasionando o entupimento do emissor, principalmente em gotejadores.
- Limitação no desenvolvimento do sistema radicular: por irrigar somente uma parcela do solo, o desenvolvimento das raízes tende a permanecer nesse volume de solo. Isso pode ocasionar menor estabilidade das plantas, ficando sujeitas ao tombamento, e redução na absorção de nutrientes.

2.1 Emissores

A aplicação de água na microirrigação geralmente ocorre na forma de gotas, podendo ser na superfície ou subsuperfície (gotejamento), aspergida (microaspersão/difusão) ou em fluxo contínuo (bubler), sendo os emissores localizados em um tubo paralelo à linha de cultivo (FRIZONNE et al., 2012). Em gotejamento, a vazão dos emissores normalmente está entre 1 e 20 L h⁻¹, enquanto na microaspersão está compreendida entre 20 e 160 L h⁻¹ (BERNARDO; SOARES; MATOVANI, 2008).

Indiferentemente do modelo do emissor, a vazão característica em função da pressão geralmente é dada por uma equação do tipo potencial (eq. (1)).

$$Q = k H^x \quad (1)$$

em que,

Q – vazão do emissor, L h⁻¹;

k – coeficiente de descarga do emissor, adimensional;

H – carga de pressão de serviço do emissor, m; e,

x – expoente de fluxo, adimensional.

O valor do expoente de fluxo do emissor (x) normalmente varia entre 0 e 1, e seu valor irá definir o efeito da variação de pressão na vazão do mesmo. Quando o valor de x é próximo ou é igual a 1, o emissor é considerado de fluxo laminar e é sensível a alterações de pressão (FRIZONNE et al, 2012). Para x próximo de 0,5, o emissor é de fluxo turbulento e, por fim, quando x tende a 0, os emissores são regulados ou auto-compensantes. Na prática, os emissores regulados possuem uma faixa de pressão na qual a vazão é praticamente constante, sendo pouco influenciado pela pressão. Isso se deve à modificações na seção de escoamento do emissor, compensando a variação na pressão.

O expoente de fluxo influencia diretamente o comprimento máximo que uma linha lateral (LL) poderá ter, pois o mesmo irá definir a magnitude da variação de vazão dos emissores ao longo da LL devido a modificações na pressão. Assim, emissores com x menor irão possibilitar comprimentos de laterais maiores, diminuindo o número de subunidades necessárias na área irrigada e/ou aumentando a uniformidade da mesma. Em contrapartida, emissores regulados são mais caros que os não regulados, necessitando um investimento maior na aquisição dos mesmos.

Como alternativa aos emissores regulados, pode-se optar por emissores do tipo microtubo (Figura 1). O microtubo foi o precursor da irrigação por gotejamento

(BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008), cuja principal vantagem é o menor custo de aquisição que os demais tipos de emissores. Este é um emissor de longo percurso com diâmetro interno normalmente variando de 0,5 a 1,5 mm, possuindo o expoente de fluxo normalmente superior a 0,75 (FRIZONNE et al., 2012).

Figura 1 - Microtubo do tipo espaguete
Fonte: Alves (2014)

Entretanto, por apresentar sensibilidade à pressão, temperatura e entupimento, além de exigir mais mão de obra na instalação do projeto, foi sendo substituído por emissores menos sensíveis a esses fatores e que exigem menos mão de obra (ALVES et al., 2012).

Souza (2005) ao avaliar um sistema de irrigação por microtubo observou que a variação de 5 °C na temperatura da água alterou 5% a vazão média dos emissores. Um trabalho teórico realizado por Pinto, Alves e Botrel (2012) mostrou que a variação de vazão pode ser ainda maior, com variação de 20% na vazão a cada 10 °C.

Por apresentar baixo custo de implantação, algumas instituições, como a “International Development Enterprises” e a “Intermediate Technology Consultants”, têm implantado sistemas de irrigação por gravidade com microtubos, em pequenas propriedades de agricultores, especialmente em países pobres da Ásia e África (SOUZA; BOTREL, 2004). Embora existam trabalhos abordando microtubos, no Brasil poucos deles se destinaram a avaliar a utilização de kits de microtubos, que pode ser importante principalmente em propriedades pequenas e menos tecnificadas.

2.2 Dimensionamento de microtubos

Ao se optar por microtubos como emissores, há duas opções para seu dimensionamento: todos os microtubos com mesmo comprimento ou com comprimentos diferentes (variável). A primeira opção é semelhante aos outros emissores, e a sua vazão pode ser representada pela eq. (1) quando se considera um diâmetro fixo.

Ao se trabalhar com microtubos de comprimentos variáveis, o fator a ser determinado é o comprimento do mesmo para que atenda a certa vazão e pressão de projeto. Vermeiren e Jobling (1980) propuseram uma equação para o dimensionamento de microtubos (eq. (2)), na

qual a vazão é função da pressão na entrada do microtubo, do comprimento e diâmetro do microtubo.

$$Q_m = a L_m^b H_m^c D_m^d \quad (2)$$

em que,

Q_m – vazão do microtubo, $L h^{-1}$;

L_m – comprimento do microtubo, m;

H_m – carga de pressão de operação do microtubo, m;

D_m – diâmetro interno do microtubo, mm; e,

a, b, c, d – coeficientes de ajuste da equação, adimensionais.

Os coeficientes de ajuste da eq. (2) podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ajuste da fórmula de cálculo de vazão em um microtubo, proposta por Vermeiren e Jobling (1980)

Coeficientes	Diâmetro interno (mm)						
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
a	0,86	0,91	1,02	1,14	1,16	1,28	1,38
b	-0,78	-0,75	-7,2	-0,68	-0,65	-0,62	-0,58
c	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,69	0,65
d	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Fonte: Adaptado de Vermeiren e Jobling (1980)

Souza e Botrel (2004) utilizando a fórmula universal e a equação de Bernoulli, desenvolveram uma equação para dimensionamento de microtubo para regime laminar de escoamento, evidenciando a perda de carga ao longo do microtubo, a energia cinética e as perdas localizadas de cargas. A equação de Souza e Botrel (2004) modificada pode ser visualizada na eq. (3). Nesta, se adicionou o desnível geométrico do microtubo, que deve ser considerado em situações que o ponto de descarga do emissor é diferente do nível da linha lateral. Os autores assumiram duas situações, uma em que o coeficiente de perda localizada de carga era constante e outra como função do número de Reynolds (NR). Nas duas situações obtiveram resultados similares quando comparado com a equação proposta por Vermeiren e Jobling (1980).

$$H_m = \frac{64 L_m}{NR D_m} \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + K_1 \frac{V^2}{2g} + AL \quad (3)$$

em que,

NR – número de Reynolds, adimensional;

V – velocidade de escoamento da água, $m s^{-1}$;

g – aceleração da gravidade, $m s^{-2}$;

K_1 – coeficiente de perda localizada de carga do emissor, adimensional; e,
 AL – desnível entre o orifício de descarga do microtubo e a linha lateral, m.

Partindo do mesmo princípio que Souza e Botrel (2004), Souza et al. (2011) equacionaram o dimensionamento de microtubos para o regime turbulento, obtendo coeficientes de determinação acima de 98%, mostrando viabilidade técnica também para esse regime de escoamento.

Indiferentemente do modelo de equação utilizado, necessita-se conhecer as características do emissor para se realizar um projeto criterioso e que apresente um bom desempenho a campo. Desta maneira, é recomendado que as características hidráulicas dos emissores sejam determinadas experimentalmente em laboratório (PIZARRO-CABELLO, 1996 apud ALVES et al., 2012).

No dimensionamento de microtubos, a determinação do diâmetro interno (D_m) também é um fator importante, pois o valor informado pelo fabricante pode não corresponder ao D_m real do mesmo. Além disso, pequenos erros no valor deste parâmetro podem ocasionar uniformidade menor que a desejada na irrigação. Assim como os outros parâmetros hidráulicos, deve-se determiná-lo experimentalmente, por meio de perfilômetros. No entanto, perfilômetros são equipamentos pouco disponíveis, logo também outros métodos podem ser aplicados, como o método hidráulico, sugerido por Almeida e Botrel (2010).

A determinação do D_m pelo método hidráulico consiste em medir a vazão de microtubos submetidos a uma carga hidráulica baixa, sendo que o comprimento utilizado deve ser grande o suficiente para que a perda localizada de carga possa ser desprezada. De acordo com Almeida e Botrel (2010), microtubos com comprimentos de 3,0 m e carga hidráulica de 2,0 m já são suficientes para realização do ensaio. Com os dados obtidos de vazão (Figura 2) pode-se determinar o diâmetro interno equivalente pela eq. (4).

Figura 2 - Esquema de coleta de vazão para determinação hidráulica do diâmetro equivalente de microtubos
 Fonte: Almeida e Botrel (2010)

$$D_m = \left(\frac{0,08262647 Q_m^2 + 4,153269 v L_m Q_m}{Z} \right)^{0,25} \quad (4)$$

em que,

v – viscosidade cinemática da água, $m^2 s^{-1}$; e,

Z – carga hidráulica, m.

2.3 Dimensionamento de linhas laterais

Para o dimensionamento de linhas laterais de gotejamento, indiferente do método utilizado, é necessário estabelecer critérios visando um desempenho aceitável da mesma. O critério mais utilizado é a máxima variação de vazão (Q_{var}) admissível (eq. (5)) entre os emissores da subunidade, sendo permitida normalmente uma variação de 10 a 20% (FRIZONNE et al, 2012). Nos projetos, essa variação é dividida em duas: uma para os emissores da LL e outra para variação na linha de derivação, proporção estabelecida pelo projetista.

$$Q_{var} = \frac{100(Q_{máx} - Q_{mín})}{Q_{máx}} \quad (5)$$

em que,

Q_{var} – variação de vazão, %;

$Q_{máx}$ – maior vazão, $L h^{-1}$; e,

$Q_{mín}$ – menor vazão, $L h^{-1}$.

Com a Q_{var} máxima admissível pode-se obter o comprimento que a LL pode possuir. Como mencionado anteriormente, o valor do expoente de fluxo irá influenciar diretamente nesse comprimento, já que quanto menor seu valor, menos a vazão do emissor é alterada devido a modificações na pressão ao longo da LL.

Ao utilizar microtubos como emissores, tem-se a vantagem de poder obter emissores com comprimento variável ao longo da LL. Com isso, o sistema pode ser planejado para que cada emissor compense a diferença de pressão. Teoricamente essa característica proporciona vazão uniforme dos emissores ao longo de toda a LL, ou seja, Q_{var} igual a 0%. Assim, pode-se variar a pressão para mais ou para menos sem que extrapole os limites de desempenho desejados. Contudo, isso requer o conhecimento da pressão em cada emissor ao longo de toda LL, sendo o método trecho a trecho o indicado para essa determinação. Além de contabilizar a perda contínua de carga e a perda localizada de carga, esse método facilita a inclusão da energia potencial ao longo da linha, se necessária.

Existem várias equações empíricas para o cálculo da perda contínua de carga, como Manning, Hazen-Williams e Flamant. Mas essas equações apresentam o inconveniente de apresentar o fator de rugosidade constante para diferentes diâmetros e velocidades de escoamento (KAMAND, 1988), além de serem limitadas aos diâmetros em que foram determinadas. Apesar das desvantagens, equações empíricas ganharam evidência devido a facilidade de cálculo. Contudo, com o advento da computação e programação, a tendência é de serem substituídas por modelos mais exatos, como por exemplo, a equação universal de perda de carga (eq. (6)).

$$hf_c = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

em que,

hf_c – perda contínua de carga no tubo, m;

f – coeficiente de atrito, adimensional;

L – comprimento do tubo, m; e,

D – diâmetro interno, m.

De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), o regime de escoamento pode ser classificado em três categorias com base no NR (eq. (7)): laminar, transição e turbulento. O regime laminar ocorre quando o $NR < 2000$; quando o $NR > 4000$ o regime de escoamento é turbulento; e, entre os dois limites, tem-se uma zona crítica de transição.

$$NR = \frac{V D}{\nu} \quad (7)$$

Para o regime laminar, o fator de atrito f pode ser estimado pela equação de Hagen-Poiseuille (eq. (8)).

$$f = \frac{64}{NR} \quad (8)$$

De acordo com Yitayew (2009) e Juana, Rodrigues-Sinobas e Losada (2002), quando o NR está entre 3000 e 100000 em tubos hidraulicamente lisos, a equação de Blasius (eq. (9)) pode ser utilizada para fornecer uma estimativa do fator de atrito f .

$$f = \frac{c_f}{NR^m} \quad (9)$$

em que,

$c_f = 0,316$; e,

$m = 0,25$.

Cardoso, Frizzone e Rezende (2008) afirmam que os coeficientes c_f e m de Blasius superestimam os valores de f em tubos de polietileno de pequeno diâmetro, sugerindo os valores 0,300 e 0,25 para c_f e m , respectivamente.

Além da perda contínua de carga na tubulação, outro fator importante no dimensionamento da LL é a perda localizada de carga provocada pela inserção dos microtubos. A obstrução da seção de escoamento modifica as linhas de fluxo do líquido, causando essa perda adicional de carga.

A negligência da perda localizada de carga pode levar a superestimativa do comprimento máximo permitido e, por fim, a uma uniformidade menor do que a recomendada. Gomes et al. (2010) encontraram valores de superestimativa no comprimento máximo de linhas laterais de 27,7% para emissores regulados, e de 9,5% para os não regulados, em casos que a perda localizada de carga foi desprezada.

A perda localizada pode ser expressa pela eq. (10), sendo o coeficiente de perda localizada de carga (K_2) dependente das características das peças e do NR, diminuindo com o aumento deste último até o limite em que permanece praticamente constante (JUANA et al., 2002). De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), o valor de K_2 permanece praticamente constante para valores de NR superiores a 50000, independentemente do diâmetro da tubulação e da velocidade e natureza do fluído.

$$hf_{loc} = K_2 \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

em que,

hf_{loc} – perda localizada de carga, m; e,

K_2 – coeficiente de perda localizada de carga, adimensional.

O procedimento para se obter a perda localizada, também utilizado por Al-Amoud (1995) e Perboni (2012), consiste em realizar ensaios para determinar a perda de carga da linha com os emissores, em que a perda localizada de carga será a diferença dessa perda com da linha sem os emissores (eq. (11)). Com a diferença pode ser ajustado uma equação do tipo potencial para representar a perda localizada de carga.

$$hf_{ins} = \frac{(hf_{tubo+emissores} - hf_{tubo})}{Ne} = a_1 V^{b_1} \quad (11)$$

em que,

hf_{ins} – perda localizada de carga devido a inserção do emissor, m;

$hf_{tubo+emissores}$ – perda de carga da linha com os emissores, m;

- hf_{tubo} – perda de carga da linha sem os emissores, m;
 N_e – número de emissores, adimensional;
 a_1, b_1 – coeficientes de ajuste da equação, adimensional.

2.4 Avaliação de uniformidade

Para o sistema de irrigação ser eficiente é necessário que o mesmo apresente uma uniformidade de aplicação de água adequada. Isso fará com que todo o estande de plantas apresente condições ambientais semelhantes, uniformizando seu crescimento e facilitando os tratos culturais e outras operações requeridas na área de cultivo. Sistemas de irrigação com baixa uniformidade podem proporcionar estresse hídrico, sendo por excesso de água em algumas regiões e por déficit em outras.

Dentre os fatores que contribuem para a diferença na aplicação de água, destacam-se as diferenças de pressões ao longo das linhas laterais e as variações na fabricação dos emissores. Essa última pode ser minimizada ao se selecionar emissores de boa qualidade, com coeficiente de variação de fabricação baixo. Já as diferenças causadas por variações de pressões normalmente ocorrem devido à perda de carga nas tubulações e desnível no terreno, que podem ser minimizadas por meio de um projeto criterioso e bem planejado.

Para avaliação de sistemas de microirrigação, um dos critérios mais utilizados é o da uniformidade de distribuição do menor quartil (UD) (eq. (12)). Inicialmente a UD foi apresentada por Keller e Karmeli (1974 apud FAVETTA; BOTREL, 2001), sendo a razão entre a média dos 25% menores valores de vazão pela vazão média total.

$$UD = 100 \frac{\bar{q}_{25}}{\bar{q}} \quad (12)$$

em que,

$\bar{q}_{25}$ – vazão média do menor quartil, $L h^{-1}$; e,

$\bar{q}$ – vazão média dos emissores, $L h^{-1}$.

De acordo com Bralts (1986 apud ALVES, 2010) a UD pode ser interpretada conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios para classificação da uniformidade da UD

UD	Classificação
90% ou mais	Excelente
80 a 90%	Bom
70 a 80%	Regular
Menor que 70%	Ruim

Fonte: Bralts (1986 apud ALVES, 2010)

Além da UD outro critério utilizado é o coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) (eq. (13)), a princípio proposto por Wilcox e Swailes (1947 apud FAVETTA; BOTREL, 2001) para avaliação de sistemas de irrigação por aspersão. Bralts, Edward e Wu (1987 apud FRIZZONE et al., 2012) consideram que o CUE resulta em uma combinação probabilística dos fatores que influenciam a variação de vazão dos emissores, propondo a mesma abordagem estatística para sistemas de microirrigação.

$$CUE = 100 \left(1 - \frac{S_q}{\bar{q}} \right) \quad (13)$$

em que,

S_q – desvio padrão das vazões no emissor, $L h^{-1}$; e,

$\bar{q}$ – vazão média dos emissores, $L h^{-1}$.

De maneira geral, a interpretação do CUE pode ser feita conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios para classificação da uniformidade do CUE

CUE	Classificação
90% ou mais	Excelente
80 a 90%	Bom
70 a 80%	Regular
60 a 80%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Adaptado de Almeida (2008)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Ensaios preliminares

Nesse tópico serão apresentados os ensaios realizados para levantamento dos valores das variáveis necessárias para o desenvolvimento do modelo de dimensionamento. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. Tendo em vista que esses ensaios não compunham o objetivo principal do trabalho, servindo apenas como informações básicas e que já foram descritos e discutidos por diversos autores (ALMEIDA; BOTREL, 2010; PERBONI, 2012; SOUZA e BOTREL, 2004; VILAÇA, 2012), os resultados serão discutidos brevemente no próximo capítulo.

3.1.1 Determinação do diâmetro interno do microtubo

Foram utilizados dois segmentos de microtubos com quatro metros, cujo diâmetro interno fornecido pelo fabricante era 0,6 mm e diâmetro externo de 2,5 mm. Eles foram submetidos a uma carga constante de 3 m, sendo monitorada a temperatura da água durante o ensaio, por meio de um termômetro de mercúrio para estimativa da viscosidade cinemática e na massa específica. No ensaio, foram coletados volumes de água durante 45 min, a qual permaneceu com temperatura de 29 °C. Para o cálculo da massa específica da água foi utilizada a eq. (14), sugerida por Kell (1975), e para a viscosidade a eq. (15) (PINTO et al., 2014). Posteriormente, converteu-se as massas coletadas em volumes para se obter as vazões, e utilizando-se a eq. (4) foi calculado o diâmetro interno equivalente do microtubo.

$$\rho = (999,8676 + 17,801161 T - 7,942501 \times 10^{-3} T^2 - 52,56328 \times 10^{-6} T^3 + 137,6891 \times 10^{-9} T^4 - 364,4647 \times 10^{-12} T^5) / (1 + 17,735441 \times 10^{-3} T) \quad (14)$$

em que:

ρ – massa específica da água, kg m⁻³; e,

$$\nu = \frac{32,025666 \times 10^{-6}}{\rho} e^{\frac{482,134866}{T+119,886026}} \quad (15)$$

T – temperatura, °C.

em que:

ν – viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

3.1.2 Determinação da relação Vazão-Pressão do microtubo

Analogamente ao ensaio para determinar o D_m , o processo para determinação da relação vazão-pressão consistiu em submeter microtubos de diferentes comprimentos a várias pressões.

Nos ensaios para determinação da vazão dos microtubos, utilizaram-se quatro microtubos para cada comprimento avaliado, sendo que os comprimentos variaram de 0,55 a 0,85 m, com incremento de 0,1 m.

Os microtubos foram inseridos aproximadamente cinco milímetros dentro do um tubo de polietileno de 12,7 mm de diâmetro interno e suas saídas estavam à altura de 12 cm acima do chão (Figura 3).

Figura 3 - Suporte construído para o ensaio da relação vazão-pressão do microtubo

As pressões utilizadas variaram de 7,85 a 96,11 kPa, com incrementos de 9,81 kPa. Para as pressões de até 17,65 kPa se utilizou somente a carga hidráulica fornecida pelo reservatório, enquanto que para as demais pressões se empregou um conjunto motobomba. O ajuste da pressão foi realizado com um registro do tipo agulha e, quando necessário, também por meio de um retorno, ambos localizados após a saída da bomba. A pressão foi monitorada com um piezômetro para as três menores pressões e com um manômetro de mercúrio para as demais.

Nos ensaios foram coletados volumes em um intervalo de tempo que dependia da pressão, além de se monitorar a temperatura, que permaneceu em 25 °C. Assim como na determinação do D_m , os volumes de água foram pesados e as vazões calculadas em função da massa específica.

Com os dados obtidos nos ensaios, optou-se por realizar o ajuste da eq. (3), já que em relação as outras, ela apresenta a vantagem de ter dedução teórica. Optou-se por trabalhar com um valor fixo de K_1 , mesmo sabendo que seu valor varia conforme o NR para o regime de escoamento utilizado. Assim, selecionou-se o valor de K_1 que apresentasse o menor valor de raiz quadrada da média dos erros quadráticos (RMEQ), dado pela equação a seguir:

$$\text{RMEQ} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}} \quad (16)$$

em que,

n – número de observações;

$\hat{y}_t$ – valor estimado; e,

y_t – valor observado.

3.1.3 Determinação da perda localizada de carga devido à inserção do microtubo

Utilizaram-se motobomba, reservatório e registros para ajuste da vazão, sendo um registro instalado no retorno para o reservatório, um na entrada e outro no final da LL, conforme Figura 4. Além disso, utilizaram-se os seguintes manômetros: manômetro diferencial entre início e final da LL, sendo que parte das medições foram feitas utilizando líquido manométrico de densidade 1,75 e o restante utilizando mercúrio; e, um manômetro digital na entrada para determinar as pressões avaliadas. O tubo utilizado era de polietileno com diâmetro interno de 12,7 mm e 25,5 m de comprimento entre as tomadas de pressão. Assim como nos demais ensaios, as vazões foram obtidas por pesagem. A temperatura durante os ensaios permaneceu entre 25 e 27°C, sendo utilizada para obter a massa específica e se obter o volume coletado.

1 – Reservatório de água; 2 – Conjunto motobomba; 3 – Filtro de disco; 4 – Tubulação de retorno; 5 – Registro; 6 – Manômetro digital; 7 – Tubo; 8 – Ponto de medição de vazão; 9 – Manômetro diferencial

Figura 4 - Esquema da bancada de ensaio de perda localizada de carga

Inicialmente, determinou-se a perda de carga em várias vazões para o tubo sem

emissores por meio dos manômetros diferenciais. Após essa etapa, 80 microtubos previamente obstruídos foram inseridos com espaçamento de 30 cm a uma profundidade de 5 mm no tubo. Adicionalmente, vedou-se o local da inserção a fim de se evitar vazamentos.

Os resultados de perda de carga foram divididos em dois grupos, em função do NR: abaixo de 2000 e acima de 3000. Não foram utilizadas vazões que proporcionavam NR entre 2000 e 3000, pois dentro desse intervalo a perda de carga é imprevisível.

Com base nos dados obtidos de perda de carga, realizou-se o ajuste de quatro equações (eq. (11)), duas para a linha com os emissores e duas para a linha sem emissores. Em posse dessas equações, foram adotados valores de velocidade e estimadas as perdas de cargas correspondentes, e com as diferenças foram ajustadas duas equações potenciais para as perdas localizadas de carga devido à inserção dos microtubos. Optou-se por ajustar uma equação para o regime laminar de escoamento, pois não se sabia qual o regime de escoamento que prevaleceria ao se obter a pressão mínima de operação da LL.

Adicionalmente, os dados de perda contínua de carga obtidos foram utilizados para comparar os coeficientes c_f e m de Blasius e Cardoso, Frizzone e Rezende (2008) por meio do índice RMEQ (eq. (16)).

3.2 Desenvolvimento do aplicativo de dimensionamento de linhas laterais em nível

O aplicativo para dimensionamento de linhas laterais foi desenvolvido em linguagem de programação PHP, permitindo uso via web pelos interessados.

O dimensionamento foi separado em duas etapas no algoritmo do aplicativo, sendo a primeira para cálculo do comprimento de cada emissor e a segunda para encontrar os limites de pressão de acordo a Q_{var} desejada. Resumidamente, a primeira etapa consistiu em:

a) O usuário informa os seguintes dados, que posteriormente são convertidos nas unidades de cálculo:

- Vazão do microtubo, $L h^{-1}$;
- Diâmetro interno do microtubo, mm;
- Comprimento do último microtubo instalado na linha lateral, cm;
- Desnível entre o orifício de descarga do microtubo e a linha lateral, cm;
- Coeficientes da eq. (9), adimensional;
- Coeficiente K_1 do emissor, adimensional;
- Coeficientes de perda localizada de carga e seus respectivos intervalos de números de Reynolds, adimensional;

- Número de emissores na linha lateral, adimensional;
- Espaçamento entre emissores, m;
- Diâmetro interno da linha lateral, mm;
- Comprimento da linha lateral, m;
- Temperatura da água, °C;
- Variação de vazão permitida, %; e,
- Vazão mínima média, $L h^{-1}$.

b) Para fins de cálculo, utilizou-se o valor de identificação i para os emissores da LL, inicialmente seu valor é igual ao número de emissores (N_e) e decresce à medida que se aproxima do início da LL. A pressão necessária no último microtubo para que haja a vazão desejada é calculada pela eq. (3).

c) A pressão no emissor $i-1$ é obtida pela eq. (17).

$$H_{i-1} = H_i + hf_{c(i \rightarrow i-1)} + hf_{ins(i-1)} \quad (17)$$

em que,

H_{i-1} – carga de pressão no emissor $i-1$, m;

H_i – carga de pressão no emissor i , m;

$hf_{c(i \rightarrow i-1)}$ – perda contínua de carga no trecho entre os emissores i e $i-1$, m; e,

$hf_{ins(i-1)}$ – perda localizada de carga causada pela inserção do emissor $i-1$, m.

d) O comprimento do emissor $i-1$ é calculado através da eq. (3), isolando-se o termo L_m ;

e) O aplicativo retorna ao item (c) até que tenha sido encontrado o comprimento para todos os emissores;

f) Após dimensionar os emissores, a pressão na entrada da LL pode ser obtida pela seguinte equação:

$$P_e = H_1 + hf_{c(1 \rightarrow entrada)} \quad (18)$$

em que,

P_e – carga de pressão na entrada da linha lateral, m;

H_1 – carga de pressão no primeiro emissor da linha lateral, m; e,

$hf_{c(1 \rightarrow entrada)}$ – perda contínua de carga entre a entrada da linha lateral e o primeiro emissor, m.

Opcionalmente, o usuário poderá informar a pressão na entrada da LL ao invés do

comprimento do último microtubo. Os dois procedimentos para dimensionamento são semelhantes; a diferença é que o processo ocorrerá do início para o fim, caso a pressão na entrada da LL for informada.

Os itens descritos anteriormente, relativos à primeira etapa executada pelo aplicativo caso informado o comprimento do último microtubo estão expostos na Figura 5. Se o usuário optar por informar a pressão na entrada da LL, o aplicativo executa à primeira etapa conforme a Figura 6.

Figura 5 - Fluxograma simplificado da primeira etapa de cálculo do aplicativo caso informado o comprimento do último microtubo

Figura 6 - Fluxograma simplificado da primeira etapa de cálculo do aplicativo caso informado a pressão na entrada da linha lateral

Os comprimentos calculados na primeira etapa do aplicativo são utilizados para encontrar o intervalo de pressão de operação da LL, configurando a segunda etapa de dimensionamento. O aplicativo utiliza os critérios fornecidos pelo usuário, sendo eles a Q_{var}

máxima admissível e a vazão mínima média. O fluxograma simplificado dessa segunda etapa é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma simplificado da segunda etapa de cálculo do aplicativo

Na execução da segunda etapa de dimensionamento se deve encontrar o intervalo de pressões de operação dos emissores em torno da pressão ótima. Optou-se por adotar valores de pressão no final da LL até encontrar o limite, tanto para a pressão acima da ótima como para pressão abaixo. Então, a execução do algoritmo obedecia os seguintes itens:

- O primeiro valor das tentativas é a carga de pressão no final da linha lateral calculado na primeira etapa, acrescido ou subtraído de 0,001 m para o cálculo das pressões máxima ($P_{\text{máx}}$) e mínima ($P_{\text{mín}}$);
- A velocidade de escoamento do emissor, e consequentemente a vazão, pode ser obtida substituindo a eq. (7) na eq. (3) e resolvendo-a pela fórmula de Bhaskara;
- O cálculo da pressão no emissor $i-1$ é similar ao da etapa 1;
- Após calcular a vazão para todos os emissores os critérios preestabelecidos são avaliados. Para a $P_{\text{máx}}$ são avaliados dois critérios, a Q_{var} (eq. (5)), que deve ser menor que a estipulada pelo usuário, e o NR no emissor, pois o escoamento de água no microtubo deve permanecer no regime laminar. Do mesmo modo, a $P_{\text{mín}}$ deve possuir Q_{var} menor que a estipulada inicialmente e a vazão média dos emissores deve ser maior que a vazão mínima média requerida pelo usuário;
- Caso não seja atingido o limite dos critérios, o aplicativo adota uma nova pressão no final da linha lateral, retornando ao item (a);

f) Após encontrar os limites, calculam-se as $P_{\text{máx}}$ e $P_{\text{mín}}$ na entrada da LL (eq. (18)).

Após as duas etapas o aplicativo recalcula as pressões de operação da LL para as temperaturas de 10 a 35 °C. Isso é necessário devido à sensibilidade dos microtubos às mudanças na temperatura da água em regime laminar de escoamento.

3.3 Ensaio de uniformidade da linha lateral

Para validação da utilização de pressão variável na microirrigação foi dimensionada e implantada uma LL. Utilizou-se um tubo de polietileno com diâmetro interno de 12,7 mm, sendo do mesmo material utilizado no ensaio para determinação da perda de carga devido a inserção do emissor. A LL contava com 250 emissores inseridos 5 mm, espaçados de 10 cm, vazão de 1,0 L h⁻¹ por emissor e D_m de 0,739 mm.

Na situação em que se trabalha com vazões baixas, pode ocorrer a obstrução de microtubos por acúmulo de ar, por isso a necessidade de se limitar uma vazão mínima. No dimensionamento foi selecionada a vazão de 0,2 L h⁻¹, embora não se saiba qual é a vazão mínima indicada para essa situação. O comprimento do último emissor foi estipulado em 60 cm, para que todos permanecessem entre o intervalo de comprimentos utilizados na determinação da relação vazão-pressão.

Alguns parâmetros como o comprimento da LL foram adotados devido a limitações no espaço físico do laboratório e/ou dos equipamentos utilizados. Em particular, selecionou-se a altura dos emissores de 13 cm devido à altura dos coletores. Já a temperatura foi obtida no dia do dimensionamento, mesmo sabendo que a mesma poderia apresentar valor diferente no dia de ensaio.

Os valores dos parâmetros de entrada utilizados no dimensionamento da LL foram os seguintes:

- Vazão do microtubo = 1 L h⁻¹;
- Diâmetro interno do microtubo = 0,739 mm;
- Comprimento do último microtubo instalado na linha lateral = 60 cm;
- Desnível entre o orifício de descarga do microtubo e a linha lateral = 13 cm;
- Coeficientes do fator de atrito f de Cardoso, Frizzone e Rezende (2008);
- Coeficiente K_1 do emissor = 17,78;
- Coeficientes de perda localizada de carga:
 - Intervalo 1 = Número de Reynolds de 0 a 2000;

- $a_1 = 0,01239$;
- $b_1 = 1,543$;
- Intervalo 2 = Número de Reynolds acima de 2000;
- $a_1 = 0,0066$;
- $b_1 = 1,679$;
- Número de emissores na linha lateral = 250;
- Espaçamento entre emissores = 0,1 m;
- Diâmetro interno da linha lateral = 12,7 mm;
- Comprimento da linha lateral = 25 m;
- Temperatura da água = 25°C;
- Variação de vazão = 7 %;
- Vazão média mínima = 0,2 L h⁻¹.

Para fornecer a pressão necessária para os ensaios, foi utilizado um reservatório localizado 15 m acima da LL, com um registro de agulha instalado no início da LL para controle da pressão. Monitorou-se a pressão por meio de um piezômetro para pressões de até 34,32 kPa e por um manômetro diferencial de mercúrio para as maiores. O sistema de filtragem da água foi constituído de um filtro de tela de 120 mesh.

Para avaliação da LL mediram-se as vazões de 51 emissores igualmente espaçados ao longo da LL, incluindo o primeiro emissor. Para facilitar a coleta da água foram montados suportes de madeira, cada um servindo para dois microtubos (Figura 8). Foram realizadas três repetições para cada uma das três pressões predeterminadas, sendo que a temperatura da água no dia do ensaio era de 20 °C.

Figura 8 - Suporte para a coleta de água durante os ensaios da linha lateral

Com os dados de vazão obtidos para cada pressão foram calculadas as diferenças relativas (ΔQ) entre os valores estimados e observados em cada emissor avaliado (eq. (19)). Dois critérios de desempenho também foram utilizados para avaliação: o CUE e a UD,

calculados pelas eq. (13) e (12), respectivamente.

$$\Delta Q = 100 \left(\frac{|\hat{q}_i - q_i|}{\hat{q}_i} \right) \quad (19)$$

em que,

ΔQ – diferença relativa para o emissor i , %;

q_i – vazão média observada para o emissor i , $L \, h^{-1}$;

$\hat{q}_i$ – vazão estimada para o emissor i , $L \, h^{-1}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diâmetro interno do microtubo

A massa média de água coletada foi de 176,59 g, fornecendo o D_m equivalente de 0,739 mm. Em comparação com o D_m informado pelo fabricante, ocorreu uma diferença de 23,17% com o obtido experimentalmente. Esse resultado corrobora com os resultados de Almeida e Botrel (2010), que obtiveram diferenças de até 11,25%, mostrando a importância de realizar a determinação do diâmetro interno experimentalmente.

4.2 Relação Vazão-Pressão do microtubo

O valor de K_1 igual a 17,78 foi o que apresentou o menor valor de RMEQ da vazão, sendo este de 0,078 L h⁻¹. Comparando-se os valores de vazão estimados com os obtidos experimentalmente (Figura 9), nota-se que houve um ajuste adequado para vazões baixas, e maior dispersão para as vazões maiores.

Figura 9 - Comparação entre os dados de vazões observados e estimados para microtubos para $K_1 = 17,78$

4.3 Perda contínua de carga e perda localizada de carga devido a inserção do emissor

As equações ajustadas com os dados obtidos nos ensaios de perda de carga podem ser visualizadas na Tabela 4. Nota-se que para ambos os grupos, os ajustes das equações foram excelentes, com R^2 acima de 0,997.

Tabela 4 - Equações de perda de carga (m) em 25,5 m de linha lateral em função da velocidade (m s⁻¹)

Número de Reynolds	Equações					
	hf_{tubo}	R^2	$hf_{tubo + loc(80 \text{ emissores})}$	R^2	$hf_{loc(80 \text{ emissores})}$	R^2
Até 2000	$hf = 0,427 v$	0,997	$hf = 1,102 v^{1,189}$	0,995	$hf = 0,991 v^{1,543}$	0,999
Acima de 3000	$hf = 2,839 v^{1,747}$	0,999	$hf = 3,367 v^{1,736}$	1,000	$hf = 0,528 v^{1,679}$	1,000

Comparando os coeficientes para estimativa do fator de atrito f , apesar dos valores estimados estarem próximos (Figura 10), os coeficientes de Cardoso, Frizzone e Rezende (2008) apresentaram um RMEQ de 0,05 m, contra 0,12 m obtido com os coeficientes de Blasius. Por esse motivo, optou-se por utilizar os valores propostos por aqueles autores para o regime turbulento de escoamento. Ainda, preferiu-se utilizar esses mesmos coeficientes para estimar os valores do fator f para o escoamento com o NR entre 2000 e 3000, já que nesse intervalo a vazão é imprevisível e não é possível estimar com exatidão a perda de carga.

Figura 10 - Comparação entre a perda contínua de carga observada e estimada com os coeficientes de Blasius e de Cardoso, Frizzone e Rezende (2008)

4.4 Interface do aplicativo de dimensionamento de linhas laterais

A interface do aplicativo com o usuário pode ser visualizada na Figura 11. Até o momento o aplicativo se encontra disponível no link <http://docentes.esalq.usp.br/tabotrel/utilitarios.html>.

O aplicativo fornece algumas funcionalidades, como por exemplo, o usuário pode informar os coeficientes para estimativa do fator de atrito f que melhor representar o material utilizado no seu projeto. Outra opção é considerar ou não a perda localizada de carga, mesmo se sabendo que é um item importante no dimensionamento.

APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DO INTERVALO DE PRESSÕES DE OPERAÇÃO DE LINHAS LATERAIS DE MICROIRRIGAÇÃO COM EMISSORES DO TIPO MICROTUBO

Dados de entrada

Fator de atrito da tubulação da linha lateral (Equação)

☒ Usar coeficientes de Blasius ($c = 0,316$ e $m = 0,25$)
☐ Usar coeficientes de Cardoso ($c = 0,300$ e $m = 0,25$)
☐ Inserir coeficientes

Coeficiente 'c'

Coeficiente 'm'

Dados do emissor - microtubo (Equação)

Vazão L/h

Diâmetro interno mm

Comprimento do último microtubo cm

Desnível entre o orifício de descarga do microtubo e a linha lateral cm

Coeficiente 'k'

Vazão média mínima do emissor L/h

Perda localizada de carga devido a inserção do emissor (Equação)

☒ Não considerar perda localizada
☐ Um intervalo

-Intervalo

Número de Reynolds - Inicial Final

Coeficientes - a b

☐ Dois intervalos

-Intervalo 1

Número de Reynolds - Inicial Final

Coeficientes - a' b'

-Intervalo 2 (*começa no final do intervalo 1)

Coeficientes - a'' b''

Dados da linha lateral

Número de emissores

Espaçamento entre emissores m

Diâmetro interno mm

Comprimento m

Temperatura da água °C

Variação de vazão admissível %

Figura 11 - Tela inicial de interface da primeira versão do aplicativo desenvolvido, para a opção de se informar o comprimento do último microtubo

4.5 Detalhes da linha lateral dimensionada

Como pode ser visto na Figura 12, o comprimento dos microtubos decresceu do primeiro ao último emissor, pois a pressão diminuiu ao longo da linha devido à perda de carga. Assim, os primeiros emissores devem ser maiores para dissipar a maior pressão no início e manter a vazão constante ao longo da LL.

Figura 12 - Comprimento dos microtubos em função da sua posição na linha lateral

Para a temperatura da água 25 °C, a pressão ótima ($P_{óti}$) na entrada da LL foi de 31,97 kPa, com $P_{máx}$ e $P_{mín}$ de 68,64 kPa e 13,28 kPa (Figura 13), respectivamente, obtidos para uma Q_{var} máxima de 7% entre o primeiro e último emissor. Para a $P_{óti}$, a pressão no final da LL foi de 26,15 kPa fornecendo uma variação de pressão de 18,2% e Q_{var} igual a 0. Essa mesma variação de pressão forneceria uma Q_{var} de aproximadamente 10% para um emissor com expoente de fluxo igual a 0,5. Isso mostra que apesar de necessitar de mais mão de obra para a instalação, pode-se adotar microtubos para obtenção de linhas laterais mais longas, e possivelmente melhorar a sua uniformidade.

Figura 13 - Pressão na entrada e vazão dos microtubos para as pressões máxima ($P_{máx}$), ótima ($P_{óti}$) e mínima ($P_{mín}$), para 25°C

Na $P_{óti}$, teoricamente, todos os emissores apresentam a vazão de 1,0 L h⁻¹ quando a água estiver a 25°C (Figura 13). Quando se utiliza a $P_{máx}$, as vazões dos primeiros emissores se tornam maiores que as dos últimos, e o efeito contrário ocorre quando se trabalha com a $P_{mín}$. Isso ocorre porque os emissores tiveram seu comprimento dimensionado para dissipar energia operando na $P_{óti}$ e com alteração desta, a diferença de pressão entre o início e o final da linha também foi modificada.

Outro fato importante é o NR ao longo da linha lateral (Figura 14), que para a $P_{mín}$,

mesmo no início da linha não ultrapassou o valor de 4000. Salienta-se que foi realizado o dimensionamento da linha para tal situação, na qual se obteve o limite inferior de 15,31 kPa. Embora a diferença absoluta seja pequena, a diferença relativa foi de 15,3%. Isso evidencia que se pode cometer erros no dimensionamento ao utilizar a perda localizada de carga devido a inserção do microtubo do regime turbulento para o regime laminar.

Figura 14 - Número de Reynolds ao longo da linha lateral obtido para as pressões máxima, ótima e mínima, para 25°C

Devido a sensibilidade do microtubo a mudanças na temperatura da água, os limites precisam ser corrigidos e trabalhados em função dessa. Na Figura 15 pode ser visualizada a faixa de pressão recomendada para operação da LL conforme a temperatura da água, respeitando a Q_{var} máxima admissível de 7%. Nota-se que a medida que a temperatura da água diminui, é possível se trabalhar com um intervalo maior de pressão. Enquanto que para temperatura de 10 °C a P_{min} foi de 29,02 kPa e a P_{max} 150,48 kPa, para a temperatura de 35 °C foram de 8,24 e 43,06 kPa, respectivamente. Outro fato interessante, é que para temperatura de 10°C pode haver uma modificação de mais de cinco vezes na pressão da entrada da LL sem comprometer o desempenho da mesma.

Naturalmente, a mudança da temperatura da água também afeta na vazão da LL, conforme os resultados das estimativas apresentados na Figura 16. Com a diminuição da temperatura também houve aumento da vazão permitida na LL, apesar de haver aumento da viscosidade cinemática da água e, logo, da perda de carga.

Figura 15 - Efeito da temperatura nas pressões recomendadas de operação para a linha lateral dimensionada

Figura 16 - Efeito da temperatura na vazão média dos emissores para as faixas de operações recomendadas para a linha lateral dimensionada

4.6 Ensaios de uniformidade da linha lateral

Ao medir a temperatura da água no dia de ensaio, constatou-se que a mesma estava em 20 °C, sendo necessário utilizar os valores de pressão correspondentes a essa temperatura. Denominou-se como $P_{óti}$ a que forneceria menor Q_{var} para a linha lateral dimensionada. Portanto, os valores de $P_{máx}$, $P_{óti}$ e $P_{mín}$ utilizados foram de 84,43, 39,00 e 16,32 kPa, respectivamente.

Os valores de vazão estimada corresponderam aos valores de vazão observada, conforme apresentado na Figura 17. Nota-se que para a $P_{máx}$, a vazão observada no início da LL foi menor que a estimada, contudo, manteve-se constante ao longo dela. Essa diferença indica que o modelo teórico ainda necessita de algum ajuste para fornecer valores adequados.

Figura 17 - Vazões estimadas e observadas para as pressões máxima ($P_{\text{máx}}$), ótima ($P_{\text{óti}}$) e mínima ($P_{\text{mín}}$)

Os primeiros emissores foram os que apresentaram maiores variações em relação ao valor estimado, com as maiores ΔQ (Figura 18). Como principais fontes dessas variações, podem-se destacar erros nos modelos, fatores de fabricação dos emissores e a montagem da LL, ou até mesmo alguma obstrução dos emissores. De qualquer maneira, o maior valor obtido de ΔQ foi de cerca de 6%, para a $P_{\text{máx}}$; e quase 90% dos valores estimados tiveram ΔQ menor que 3%.

Figura 18 - Diferenças relativas da vazão nos emissores para a pressão máxima, ótima e mínima

Em relação à uniformidade obtida, embora a UD tenha sido menor que o CUE (Tabela 5), ambos os índices de uniformidade calculados reportaram uniformidade excelente, visto que foram todos maiores que 90%. Isso, junto com os valores da diferença relativa, confirmam a validade da metodologia de dimensionamento de intervalos de pressões de operações desenvolvida, dentro das condições do experimento.

Tabela 5 - Indicadores de uniformidade de vazão e diferenças relativas observadas para as três pressões ensaiadas

Pressão	Valor da pressão (kPa)	Vazão média dos emissores (L h ⁻¹)		Diferença relativa de vazão (%)	UD (%)	CUE (%)
		Estimada	Observada			
P _{mín}	16,32	0,51	0,50	1,77	95,25	96,79
P _{óti}	39,00	1,12	1,11	0,56	97,80	98,37
P _{máx}	84,43	2,08	2,06	1,12	97,93	98,37

Os valores de uniformidade obtidos foram maiores que os encontrados por Chigerwe et al. (2004) para quatro conjuntos com microtubos de comprimento fixo. Os autores variaram a pressão de 0,98 a 29,42 kPa, obtendo valores médios de UD menores que 90% para três dos quatro conjuntos, e de 91% para o que apresentou melhor desempenho. Também testando diferente pressões de operação em conjuntos de microtubo, Sah et al. (2010) obtiveram UD médias de 93,64 e 91,46% para situação em nível e desnível a 0,5%, respectivamente. Os CUE também foram menores que os obtidos: 89,96% para situação em nível e 87,32% para a de desnível.

Valores de CUE excelente (98,25%) também foram observados por Souza et al. (2011), utilizando microtubos com comprimentos variáveis em fertirrigação, em regime turbulento de escoamento. Uniformidades semelhantes foram encontradas por Souza, Pérez e Botrel (2006) trabalhando com microtubos com comprimentos fixos, sendo a UD média de 96,9%.

Por outro lado, valores de UD menores (62%) também podem ser obtidos utilizando-se microtubos de mesmo comprimento, conforme observado por Souza et al. (2009) com conjuntos de irrigação. Apesar de alguns conjuntos terem obtido valores de UD de 95%, os autores também concordaram que um dos fatores da menor uniformidade foi a utilização de emissores de mesmo comprimento.

Em termos de aplicabilidade do conceito de intervalo de pressão, abre-se possibilidades para operação de um sistema com diferentes combinações de unidades operadas simultaneamente. Assim, o projetista e o usuário têm mais liberdade para as combinações, mesmo que uma unidade opere com pressão diferente da ótima, mas ainda dentro da faixa recomendada (Figura 15).

Outra possibilidade é variar a vazão das linhas laterais em sistemas que permitam variar a potência da bomba. Assim, pode-se manejar a irrigação conforme os requerimentos hídricos da cultura, sem alterar o tempo de irrigação. Ou mesmo reduzir o tempo de irrigação de uma área ao se utilizar vazões maiores.

Por meio da metodologia desenvolvida, sistemas de bombeamento fotovoltaicos e eólicos podem ser conectados diretamente ao sistema de irrigação. Isso porque se forem operados dentro da faixa recomendada, poderá ser realizado a irrigação com índices de uniformidade excelentes, contornando-se o inconveniente da potência variável durante o dia.

CONCLUSÕES

A utilização de microtubos de diferentes comprimentos permite o dimensionamento de linhas laterais com comprimentos maiores e/ou aumentar a suas uniformidades.

Os intervalos de pressão obtidos no dimensionamento foram aptos para operação da linha lateral, com índices de uniformidades excelentes.

Ao utilizar microtubos em regime laminar de escoamento, as pressões de operação da linha lateral e a vazão média em função da temperatura da água devem ser corrigidas, a fim de se estimar adequadamente o volume de água aplicado.

O aplicativo desenvolvido foi capaz de fornecer tanto os comprimentos dos microtubos, como informar o intervalo de pressão recomendado para operação da linha lateral dimensionada, respeitando a variação de vazão admitida para a mesma.

A alteração da vazão das linhas laterais pode ser utilizada como uma estratégia de manejo da irrigação, sem necessidade de aumentar o tempo de irrigação, ou mesmo diminuí-lo, desde que o sistema permita variar a potência.

REFERÊNCIAS

- AL-AMOUD, A.I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n.1, p. 1-5, 1995.
- ALMEIDA, C.D.G.C. **Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada**. 2008. 104p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A. Determinação do diâmetro de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.5, p.413-417, 2010.
- ALMEIDA, A.M.; SAMPAIO, S.C.; SUSZEK, M. Comportamento hidráulico de gotejadores em linha lateral de irrigação. **Varia Scientia**, Cascavel, v. 6, n. 11, p. 129-140, 2006.
- ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A.; SMITH, R.J. Characterization of the microtube emitters used in a novel micro-sprinkler. **Irrigation Science**, New York, v. 27, p. 209-214, 2009.
- ALVES, D.G. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados**. 2010. 86p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ALVES, D.G. **Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas**. 2014. 86p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- ALVES, D.G.; PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de um sistema de microirrigação utilizando microtubos ramificados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 125-132, 2012.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNADEZ Y FERNADEZ, M.; ARAUJO, R. de; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2008. 625p.
- CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.30, n.3, p.299-305, 2008.
- CHIGERWE, J.; MANJENGWA, N.; ZAAG, P. van der; ZHAKATA, W.; ROCKSTROM, J. Low head drip irrigation kits and treadle pumps for smallholder farmers in Zimbabwe: a technical evaluation based on laboratory tests. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 29, p. 1049–1059, 2004.
- FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.427-430, 2001.

- FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; FARIA, M.A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356p.
- GOMES, A.W.A.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J.H. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n. 3, p.435-446, 2010.
- HOLZAPFEL, E.A.; ABARCA, W.A.; PAZ, V.P.S.; ARUMI, J.L.; RODRIGUEZ, A.; ORREGO, X.; LOPEZ, M.A. Selección técnico-económica de emissores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 547-556, 2007.
- JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.128, n.6, p.376-384, 2002.
- KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage engineering**, New York, v. 114, n. 2, p.311-323, 1988.
- KELL, G.S. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0° to 150°C. **Journal of Chemical Engineering Data**, Washington, v.20, p.97-105, 1975.
- KELLEY, L.C.; GILBERTSON, E.; SHEIKH, A.; EPPINGER, S.D.; DUBOWSKY, S. On the feasibility of solar-powered irrigation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 14, p. 2669-2682, 2010.
- KLEIN, M.; SZEKUT, F.; SUSZEK, F.; REIS, C.; AYMORÉ, C.; GUERRA, J.; VILAS BOAS, M. Uniformidade de irrigação e fertirrigação em um sistema de irrigação familiar por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 3, p. 56-69, 2013.
- MORALES, L.R.V. **Utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 2011.170p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Eletrotécnica e Energia/Escola Politécnica/ Instituto de Física/ Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- ODEH, I.; YOHANIS, Y.G.; NORTON, B. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 80, p. 850-860, 2006.
- PANDE, P.C.; SINGH, A.K.; ANSARI, S.; VYAS, S.K.; DAVE, B.K. Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 28, p. 385–396, 2003.
- PERBONI, A. **Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores**. 2012. 72p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- PINTO, M.F.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Influência da temperatura no desempenho de microtubos spaghetti. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 1., ; WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 4, 2012, Fortaleza, **Anais...** Fortaleza, 2012. p. 1-5.

PINTO, M.F.; CAMARGO, A.P.; RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A. Caracterização hidráulica de tubos porosos oriundos de pneus reciclados utilizados em irrigação subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 1095-1101, 2014.

SAH, S.N.; PUROHIT, R.C.; KUMAR, V.; SHUKLA, V.K.; JAIN, S.K. Design, construction and evaluation of low pressure and low cost drip irrigation system. **International Agricultural Engineering Journal**, Beijing, v. 19, n. 2, p. 32-38, 2010.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistema de irrigação por gotejamento com microtubos**. 2005. 100p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 16-22, 2004.

SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 266-279, 2006.

SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; ALMEIDA, A.C.S.; CORREA, C.B. Modelo matemático aplicado à irrigação localizada com microtubos sob regime de escoamento turbulento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.2, p. 278-289, 2011.

SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. Fertigação em mudas de citros utilizando-se mangueiras e microtubos sob regime de escoamento turbulento. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.8, p.816–822, 2011.

SOUZA, R.O.R.M.; MIRANDA, E.P.; NASCIMENTO NETO, J.R.; FERREIRA, T.T.S.; MESQUITA, F.P. Irrigação localizada por gravidade em comunidades agrícolas do Ceará. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 40, n. 1, p. 34-40, 2009.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Localized irrigation: Design, installation, operation, evaluation**. Rome: FAO, 1980. 203p.

VILAÇA, F.N. **Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada**. 2012. 67p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

YITAYEW, M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.135, n.1, p.111-114, 2009.