Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem cor	n
reversão de fluxo de alta frequência	

Marinaldo Ferreira Pinto

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2013

Marinaldo Ferreira Pinto Engenheiro Agrícola

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem com reversão de fluxo de alta frequência

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

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

Pinto, Marinaldo Ferreira Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem com reversão de fluxo de alta frequência / Marinaldo Ferreira Pinto.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013. 99 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Qualidade da água 2. Obstrução de emissores 3. Filtro de tela I. Título

CDD 631.7 P659d

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

Aos meus pais e meus irmãos. Acredito que essa realização tem mais responsabilidade deles do que minha. Pois foram eles que deram suporte emocional e financeiro para que tudo isso pudesse acontecer, principalmente na Graduação.

Ao povo do sertão nordestino. Tudo que conquistei foi em nome dessa "nação", que tem como principal valor a honra e como principal riqueza o orgulho.

"Já errei muito mais do que devia
Hoje estou começando errar bem menos
Meu desvios começam ser pequenos
Bem menores que ânsia de chegar
Eu sair sem saber como voltar
Eu seguir os atalhos do destino
Apanhei pra deixar de ser menino
E hoje apanho tentando não errar"

Maciel Melo

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", principalmente ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, no nome do professor Frizzone por ter concedido a liberação para cursar a pós-graduação mesmo sendo servidor do departamento. Além disso, sempre se comportou de maneira exemplar nos tratando com muito respeito.

Ao professor Tarlei Arriel Botrel pela orientação acadêmica como também nos aspectos relacionados à vida pessoal. Seus ensinamentos com certeza irão nortear o modo como orientaremos no futuro, quando nos tornarmos professores. Talvez o mais importante é que nós devemos nos preocuparmos com o bem estar das pessoas entes dos aspectos técnicos e acadêmicos, uma vez que o sucesso do segundo está totalmente relacionado com primeiro.

Aos professores do LEB, pela colaboração em minha formação profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro por meio do projeto de pesquisa 2010/52457-6, ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) 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).

Aos colegas de trabalho Osvaldo e Antonio que além de contribuírem para a realização do trabalho também se sacrificaram em alguns momentos na realização de atividades relacionadas ao LEB para que eu pudesse me dedicar à pesquisa nos momentos mais críticos. Aos demais colegas e amigos do LEB em especial a Luiz, Helio, Gilmar e Paula pelo auxílio na realização do trabalho.

Aos colegas de curso, em especial aos "Irmãos de orientação" e colegas de casa pela convivência harmoniosa. A todos que contribuíram diretamente para realização deste trabalho: Dinara, Renan e Ezequiel. A Dinara por sua dedicação e amor, tendo me amparado nos momentos mais difíceis e me acompanhado nos momentos de felicidade.

SUMÁRIO

RESUMO	.11
ABSTRACT	.13
LISTA DE FIGURAS	.15
LISTA DE TABELAS	.19
LISTA DE SÍMBOLOS	.21
1 INTRODUÇÃO	.23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	.25
2.1 Microirrigação	.25
2.2 Qualidade da água para irrigação e a obstrução de emissores	.27
2.3 Granulometria das partículas	.30
2.4 Tratamento físico da água de irrigação	.33
2.5 Hidrociclone	.35
2.6 Filtros de areia	.37
2.7 Filtros de tela	.39
2.8 Filtros de disco	.41
2.9 Limpeza dos filtros	.43
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Caracterização experimental	.47
3.2 Descrição do sistema de filtragem	.47
3.3 Construção dos protótipos	.49
3.4 Desenvolvimento do circuito eletrônico e software de controle	.51
3.5 Caracterização hidráulica	.55
3.5.1 Curva vazão x perda de carga sob água isenta de sólidos em suspensão	55
3.5.2 Volume de água despendido durante uma limpeza, em função do tempo	
abertura das válvulas VL e do número de pulsos elétricos	
3.5.3 Caracterização do perfil de perda de carga mediante a mudança de direção	
fluxo	
3.5.4 Evolução da perda de carga em função do volume filtrado (tempo	
funcionamento)	
3.6 Avaliação de desempenho do sistema de filtragem	59
3.6.1 Controle da vazão de saída do sistema de filtragem	
	. 55

3.6.2 Avaliação da eficiência de retenção do sistema de filtragem segundo a
metodologia proposta pela ASABE60
3.6.3 Avaliação da eficiência de retenção do sistema de filtragem (metodologia
proposta)62
3.6.4 Eficiência energética (coeficiente ηf)63
3.7 Modelagem da redução de vazão em função do incremento da perda de carga
nos filtros para sistemas de irrigação64
3.7.1 Caso I: Sistema de bombeamento com dispositivo regulador de pressão 66
3.7.2 Caso II: Sistema de bombeamento sem dispositivo regulador de pressão 67
3.8 Aplicação da modelagem da redução de vazão na limpeza automática do
sistema de filtragem68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO71
4.1 Curva vazão x perda de carga sob água sem adição de sólidos71
4.2 Volume de água despendido durante uma limpeza, em função do tempo de
abertura das válvulas VL72
4.3 Caracterização do perfil de perda de carga mediante a mudança de direção de
fluxo74
4.4 Evolução da perda de carga em função do volume filtrado (tempo de
funcionamento)75
4.5 Eficiência energética (coeficiente ηf)77
4.6 Eficiência de retenção e volume de água de limpeza por volume de água
filtrada 78
4.7 Eficiência da retrolavagem e da inversão de fluxo na limpeza dos filtros
(retomada da perda de carga inicial)80
4.8 Simulação da variação de vazão em função do incremento da perda de carga do
sistema de filtragem83
5 CONCLUSÕES 87
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS89
REFERÊNCIAS91
APÊNDICES

RESUMO

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem com reversão de fluxo de alta frequência

A obstrução de emissores tem sido um entrave para a microirrigação. Porém, tem-se notado poucos estudos relativos ao desenvolvimento de equipamentos que auxiliam na prevenção da obstrução de emissores nos últimos anos. Os estudos realizados nesta linha estão geralmente ligados à caracterização dos sistemas em uso. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de filtragem com reversão automática de fluxo, de alta frequência. O sistema foi concebido para operar com água de baixa qualidade, com inversão de fluxo e limpezas automáticas e com volume mínimo de água para realização das limpezas. As decisões do controlador do sistema de filtragem têm como base a perda de carga, obtida por meio de transdutores de pressão instalados na entrada e na saída do sistema. O protótipo final é composto, basicamente, por três filtros de tela e onze válvulas solenoides controladas eletronicamente. Determinou-se a curva de perda de carga em função da vazão, a eficiência de retenção e o volume mínimo de água para limpeza dos filtros. A eficiência de retenção de partículas foi determinada em delineamento experimental inteiramente aleatorizado em esquema fatorial, sendo testados três fatores: tempo de reversão (15 e 30 s); incremento da perda de carga (25 e 50%) e concentração de sólidos (500 e 1000 mg L⁻¹). A eficiência de retenção de sólidos totais foi de 71,7 e 78,3% para as concentrações de 500 e 1000 mg L⁻¹, respectivamente, tendo apresentado diferença significativa a 1% de probabilidade. Entretanto, a eficiência retenção de sólidos maiores que 50 μ m (Ed > 50) foi de 98,6 \pm 0,7%, não sendo significante para nenhum dos tratamentos ao nível de significância de 1%. O volume médio de água despendido durante as limpezas foi de 5,39 L por limpeza, que representou um volume de água de limpeza por volume de água filtrada de 8,0 e 12,6 L m⁻³, para as concentrações de 500 e 1000 mg L⁻¹, respectivamente. Os valores de eficiência energética do sistema de filtragem variaram de 80 a 90% para a vazão de 2 m³ h⁻¹ com pressão de entrada entre 15 a 40 mca. As limpezas do sistema de filtragem não foram totalmente eficazes na retomada da perda de carga, com tendência de aumento com o tempo. A inversão de fluxo com frequências de 11,11 e 22,22 mHz influenciou na evolução da perda de carga do sistema de filtragem, tornando-a mais lenta que a evolução para o sistema funcionando sem inversão de fluxo. Considerou-se que o sistema de filtragem desenvolvido apresentou potencial para filtragem da água de irrigação com baixa qualidade, porém necessita de manutenções periódicas para limpeza do elemento filtrante. A perda de carga admissível do sistema de filtragem deve ser o valor mais restritivo entre o critério de desempenho de retenção de partículas e o de variação de vazão do sistema de irrigação.

Palavras-chave: Qualidade da água; Obstrução de emissores; Filtro de tela

ABSTRACT

Development and assessment of filtration in irrigation system with high frequency reversal flow

Emitters clogging have been a barrier to trickle irrigation. Just a few studies have been performed concerning equipments which assist in preventing emitters clogging in recent years, especially regarding to development equipment. Studies carried out on this issue are usually linked to the characterization of systems in use. The aim of this study was to develop a filtering system with automatic flow reversal of high frequency. The system is designed to operate with low quality water, with reverse flow and automatic cleanings and with minimum volume of water to perform the cleaning. Decisions by the controller of the filtration system are based on head loss, obtained by pressure transducers installed at the upstream and downstream of the system. The final prototype consists of three screen filters and eleven electronically controlled solenoid valves. The curve of head loss was determined as a function of water flow, retention efficiency and minimum volume of water required for cleaning the filters. The efficiency in particle retention was determined following a completely randomized experimental design in a factorial scheme in which three factors were tested: reversal time (15 and 30 s) increase in head loss (25 and 50%) and solids concentration (500 and 1000 mg L⁻¹). The total solids retention efficiency was 71.7 and 78.3% for concentrations of 500 and 1000 mg L⁻¹, respectively, presenting a significant difference at 1%. However, when analyzing the retention efficiency of solids larger than 50 µm (Ed> 50), none of the treatments was significant at 1%, whose efficiency was 98.6 ± 0.7%. The mean volume of water expended during the cleaning was 5.39 L. It represented a volume of water for cleaning per volume of filtered water from 8.0 and 12.6 L m⁻³, to concentrations of 500 and 1000 mg L⁻¹, respectively. The energy efficiency values of filtering system ranged from 80 to 90% considering flow rate of 2 m³ h⁻¹ and inlet pressure ranging from 15 to 40 mca. The filtering system cleaning was not totally effective in reestablishing the head loss, with an upward trend over time. The reverse flow with frequency of 11.11 and 22.22 mHz influenced the head loss evolution of the filtration system, making it slower than the trend for the system running without flow reversal. The developed filtration system has potential for filtering low quality irrigation water, but it requires periodic maintenance to clean the filter element. The allowable head loss of the filter system should be the most restrictive value between the criterion of particle retention performance and the flow variation of the irrigation system because of the increase in head loss in the filters.

Keywords: Water quality; Emitter clogging; Screen filter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre as principais escalas granulométricas. Fonte: Adaptado
de Caputo (1973) e Head (1984)31
Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica, seguindo a classificação
da ABNT. F: fina; M: média; e G: grossa. Fonte: Adaptado de Caputo (1973)33
Figura 3 – Esquema de um hidrociclone e princípio de funcionamento. Fonte:
Adaptado de Cruz e Zanini (2010)36
Figura 4 – Filtros de areia ligados em paralelo37
Figura 5 – Efeito da taxa de fluxo no tamanho máximo das partículas que passam pelo
meio filtrante, sob diferentes granulometrias. Fonte: Adaptado de Keller e Bliesner
(1990)38
Figura 6 – Materiais comumente usados como meio filtrante. Fonte: Hubel39
Figura 7 – Filtros de tela40
Figura 8 – Filtros de disco42
Figura 9 – Esquema de ligação hidráulica para operação: A. por blocos; e B. por pares.
Fonte: Adaptado de Medina San Juan (2000)45
Figura 10 – Esquema de funcionamento do sistema de filtragem (tubos com fluxo em
azul). Filtros em reversão: A. Filtro F1; B. Filtro F2; C. Filtro F3. V1 a V8: Válvulas
(válvulas acionadas em vermelho); VL1, VL2 e VL3: Válvulas de limpeza dos filtros
48
Figura 11 – Protótipo 1 construído para desenvolvimento do controle do sistema de
filtragem49
Figura 12 – A. Protótipo 2, com apenas uma válvula de limpeza; e, B. Protótipo 3, com
uma válvula de limpeza para cada filtro50

Figura 13 – Curva característica de perda de carga em função da vazão das válvulas
hidráulicas (hf _V) e dos filtros utilizados no protótipo (hf _F). Fonte: Adaptados do catálogo Bermad e Amiad51
Figura 14 – Interface do programa desenvolvido para a coleta de dados por meio da
porta serial52
Figura 15 – Curva de calibração do sensor MPX5700DP, realizada em laboratório 53
Figura 16 – A. Circuito impresso; e B. hardware completo do sistema de controle 53
Figura 17 – Esquema de ligação do circuito eletrônico de controle54
Figura 18 – Fluxograma de controle automático do sistema55
Figura 19 – Combinação de tempo de abertura, número de pulsos para os filtros F1, F2 e F357
Figura 20 – Esquema de funcionamento da válvula de retenção dos sólidos no filtro
Figura 21 – Bancada de ensaio usada na avaliação do sistema de filtragem 60
Figura 22 – Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios de eficiência de retenção de partículas. X: percentagem passante; d: diâmetro das partículas 61
Figura 23 – Esquema do sistema de injeção de areia62
Figura 24 – Esquema ilustrativo de um sistema de irrigação associado ao sistema de filtragem
Figura 25 – Representação gráfica do comportamento da variação de vazão em função do aumento da perda de carga, considerando a altura manométrica constante
Figura 26 – Representação gráfica do comportamento da variação de vazão em função do aumento da perda de carga, considerando-se a altura manométrica variável
Figura 27 – Esquema da interface do controlador com o usuário

Figura 28 - Curva característica de perda de carga em função da vazão de entrada
do sistema de filtragem. RF1, RF2 e RF3: Filtros F1, F2 e F3 em reversão,
respectivamente71
Figura 29 – Volume de água utilizado na limpeza do sistema de filtragem em função
do tempo de abertura das válvulas. TOTAL: volume total de uma limpeza; F1, F2 e
F3: volume de limpeza dos filtros 1, 2 e 3, respectivamente72
Figura 30 – Volume de água de limpeza sob diferentes combinações de tempo de
abertura e número de pulsos para os filtros F1, F2 e F373
Figura 31 – Perfil de perda de carga mediante a mudança de direção de fluxo. hf:
perda de carga; estabilização: intervalo de tempo de estabilização da perda de carga
após uma mudança de direção de fluxo; e MDF: mudança de direção de fluxo74
Figura 32 – Variação da perda de carga em função do tempo de injeção de sólidos a
taxa constante: SVR: Sem a válvula de retenção dos sólidos; CVR: Com a válvula de
retenção dos sólidos. LIMP: limpeza dos filtros75
·
Figura 33 – Evolução da perda de carga: A. em função do tempo de ensaio e; B. massa
de sólidos injetada77
Figura 34 – Curvas do coeficiente ηf para pressões de entrada (P: 40, 30, 20 e 15
mca) do sistema de filtragem: A: em função da vazão; e B: em função da perda de
carga78
Figura 35 – Perfil do incremento da perda de carga em função do número de
retrolavagens do sistema de filtragem com inversão de fluxo. LIMP: limpeza; hfMIN:
perda de carga mínima depois de ser realizada uma retrolavagem81
perda de carga minima depois de ser realizada dina retrolavagem
Figura 36 – Perfil de perda de carga em função do número de retrolagem do sistema
de filtragem sem inversão de fluxo. LIMP: limpeza; hfMIN: perda de carga mínima
depois de ser realizada uma retrolavagem82
Figura 37 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do
expoente de vazão (x) e das características do sistema de irrigação (K) para altura
manométrica total constante e vazão inicial de 2 m ³ h ⁻¹

Figura 38 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do
expoente de vazão (x) e da variação de vazão (1 - r) para altura manométrica total
constante e vazão inicial de 2 m³ h⁻¹84
Figura 39 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do
expoente de vazão (x) e das características do sistema de irrigação (K) para altura
manométrica total variável e vazão inicial de 2 m³ h-1
Figura 40 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do
expoente de vazão (x) e da variação de vazão (1 - r) para altura manométrica total
variável e vazão inicial de 2 m³ h ⁻¹ 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expoente de fluxo de diferentes tipos dos emissores26
Tabela 2 – Classificação de emissores quanto à sensibilidade de obstrução26
Tabela 3 – Valores normais para os fatores indicadores da qualidade da água de irrigação
Tabela 4 – Classificação da água de irrigação quanto ao risco de obstrução dos emissores
Tabela 5 – Abertura da malha das peneiras ASTM (mm)31
Tabela 6 – Critérios para seleção de sistemas de tratamento físico da água para microirrigação35
Tabela 7 – Características das areias mais empregadas como elemento filtrante39
Tabela 8 – Relação entre o número de mesh e a abertura da tela de aço inoxidável41
Tabela 9 – Recomendação de velocidade em filtros de tela41
Tabela 10 – Cores dos discos em função do número de ranhuras42
Tabela 11 – Características físicas dos componentes do sistema de filtragem50
Tabela 12 – Características técnicas dos principais componentes eletrônicos52
Tabela 13 – Quadro de análise de variância da eficiência de retenção de sólidos totais79
Tabela 14 – Quadro de análise de variância da eficiência de retenção de sólidos com
diâmetro maior que 50 µm80

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b, c,k e x – parâmetros de ajuste

 A_F – área transversal interna do filtro de tela

At - área da tela de cada filtro

C_c – coeficiente de curvatura

C_e – concentração de sólidos a montante do sistema de filtragem

 $\ensuremath{C_l}$ — concentração de sólidos com diâmetro menor que 50 µm, presentes na água de limpeza

C_s – concentração de sólidos a jusante do sistema de filtragem

C_u – coeficiente de uniformidade

C_x – concentração de sólidos na amostra "x"

D – diâmetro da tubulação a montante e a jusante do sistema filtragem

d – diâmetro equivalente da partícula

 d_{30} – diâmetro da malha que permite a passagem de 30% do peso total de solo

 d_{60} – diâmetro da malha que permite a passagem de 60% do peso total de solo

def - diâmetro efetivo

E_{d>50} – eficiência de remoção de sólidos com diâmetro superior a 50 μm

E_e – energia hidráulica imediatamente a montante do sistema de filtragem

E_r – eficiência de remoção

E_s – energia hidráulica imediatamente a jusante do sistema de filtragem

g – aceleração da gravidade

H – altura manométrica total quando os filtros possuem partículas sólidas retidas

h_{fc} – perda de carga crítica

H₀ – altura manométrica total quando os filtros se encontram limpos

h_f' – perda de carga nos filtros com partículas sólidas retidas

h_{fN} – perda de carga nominal

H_G – altura geométrica

I – índice de filtrabilidade

int – parte inteira do resultado numérico

K – constante da curva do sistema de recalque

m – expoente da equação de perda de carga

m_a – massa da solução que se deseja medir a concentração de sólidos

 m_r – massa de sólidos com diâmetro superior a 50 μ m, retida nos filtros

m_s – massa de sólidos

m_t – massa de sólidos injetada nos filtros

n – número de emissores

N – número de filtros

P – pressão na entrada do emissor

p – porcentagem da superfície dos orifícios

P₁ e P₂ – pressão a montante e a jusante do sistema filtragem

q - vazão do emissor

Q – vazão do sistema de filtragem

r - redução de vazão

V - velocidade de escoamento

 V_F – volume de água filtrada

V_I - volume de água de limpeza

w - dissipação de energia entre a entrada e a saída do sistema

z₁ e z₂ – cota da tubulação a montante e a jusante do sistema filtragem

γ_a – peso específico da água

 γ_s – peso especifico do solo

 ε – fator de incremento da perda de carga

η - coeficiente de viscosidade do meio dispersor

ηf – coeficiente de eficiência energética

υ - velocidade de dispersão das partículas

ρ_a – massa especifica da água

 ρ_s – massa específica da areia

1 INTRODUÇÃO

Devido à escassez de água, nos últimos anos a utilização da microirrigação tem aumentado em relação aos demais métodos. Este crescimento está relacionado ao seu potencial de obtenção de alta eficiência e facilidade de controle, além de outras vantagens como facilidade e eficiência da injeção de fertilizantes, menor exigência de mão de obra e redução dos riscos de contaminação de alimentos por organismos patogênicos, visto que a água não entra em contato direto com a planta (PATERNIANI et al., 1994). No entanto, restrições como a qualidade da água têm limitado o uso desse método. O emprego de filtros pode evitar a passagem de partículas com dimensão grande o suficiente para causar a obstrução dos emissores.

A obstrução dos emissores pode comprometer a uniformidade de aplicação de sistemas localizados, em consequência da redução da vazão dos emissores Um aumento da obstrução dos emissores da ordem de 1 a 5% pode resultar em uma grande redução da uniformidade de aplicação (NAKAYAMA; BOOKS, 1981). Segundo Frizzone et al. (2012) a obstrução total de 5 a 10% dos emissores proporciona coeficientes de variação de vazão de 23 a 33%. De maneira similar, Bralts (1986) afirma que um nível de obstrução de 5% pode reduzir a uniformidade estatística para 75%.

As principais causas de entupimento de emissores são, basicamente, materiais em suspensão, precipitados químicos e crescimento microbiano, podendo estes fatores agirem simultaneamente. Segundo Adin e Alon (1986), a maioria das causas de entupimento se deve à presença de materiais em suspensão, o que reforça a importância do sistema de filtragem para a microirrigação.

Os principais filtros utilizados no processo de remoção de partículas presentes na água para fins de microirrigação são os de areia, de tela e de disco. Os filtros de areia são recomendados para remoção de contaminantes orgânicos e de algas (TESTEZLAF, 2008). De modo geral, é utilizado um filtro de areia no início do cabeçal de controle, e um de tela ou de disco a jusante. Quando se utiliza injetor de fertilizante este deve ficar localizado entre o filtro de areia e o filtro de tela ou disco. Em alguns casos utilizam-se dois filtros de tela em série, sendo o primeiro com uma malha de maior diâmetro, para reter partículas maiores (BERNARDO et al., 2006).

Os filtros de tela ou disco são eficientes na retenção de partículas sólidas de pequenos diâmetros, porém quando submetidos a águas de baixa qualidade, com

grande quantidade de impurezas, como algas ou matéria orgânica, são muito suscetíveis à obstrução, necessitando de limpezas frequentes, sendo que na ocasião da obstrução, quando o elemento filtrante é a tela, é possível ocorrer seu rompimento, caso não sejam realizados procedimentos de limpeza do mesmo (PIZARRO CABELLO, 1996). Trabalhos realizados por Adin e Elimelech (1989) com filtros de areia e tela, com água residuária, levaram à conclusão que os filtros de areia apresentaram eficiência de 85%, enquanto os filtros de tela foram rapidamente obstruídos, não sendo obtida a eficiência retenção. Estas condições inviabilizam a utilização de filtros de tela.

Porém, os resultados encontrados pelos autores citados anteriormente, foram obtidos com os filtros funcionando de maneira tradicional, ou seja, sem inversão de fluxo. Acredita-se que se estes elementos filtrantes forem submetidos a uma reversão de fluxo de alta frequência, pode-se obter um bom desempenho de filtragem para águas com diferentes concentrações de material em suspensão. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivos: a) desenvolver um sistema de filtragem com reversão automática de fluxo de alta frequência; b) efetuar a caracterização hidráulica do sistema de filtragem em relação à perda de carga em função da vazão, ao volume de água para limpeza dos filtros e a eficiência energética; c) minimizar o volume de água despendido durante a limpeza dos filtros; e d) avaliar o desempenho de retenção de partículas sólidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microirrigação

Os sistemas de microirrigação são caracterizados pela aplicação de água em uma fração do solo, podendo ser em faixa ou em pontos discretos. Seus emissores normalmente apresentam baixa vazão, aplicando água por longos períodos, com alta frequência e sob baixa pressão (FRIZZONE et al., 2012). Existe uma infinidade de emissores, apresentando diferentes princípios de funcionamento. Eles são distinguidos como tubos gotejadores, fitas gotejadoras, microaspersores e *bubblers*.

Os emissores apresentam geometrias diversificadas, com variados mecanismos de dissipação de energia. Os principais são os emissores de longo percurso (microtubos, helicoides e labirintos), orifícios e câmara de vórtice, podendo apresentar mecanismos especiais como regulador de fluxo (autocompensante) e dispositivos autolimpantes (PIZARRO CABELLO, 1996; AYERS et al., 2007; KELLER; BLIESNER, 1990; FRIZZONE et al., 2012). A NBR ABNT ISO 9261: 2006 os classifica quanto à reutilização (tubos emissores reutilizáveis e não-reutilizáveis), tipo de regulagem de pressão (não regulados e regulados), tipo de operação a baixa pressão (regular e antidrenante), tipo de conexão do emissor no tubo (*on-line* e *in-line*) e tipo de emissor de múltiplas saídas (emissor múltiplo e emissor de múltiplas saídas).

Os emissores podem ser caracterizados por meio de sua equação vazão versus pressão, sendo que cada tipo de emissor, dependendo do regime de escoamento, apresenta valor de expoente de fluxo distinto, como pode ser visualizado na Tabela 1. O valor do expoente de fluxo (x) é, portanto um indicador do regime de escoamento e do tipo de emissor, além de expressar indiretamente a sua sensibilidade de variação de vazão devido a mudanças na pressão de entrada. Seu valor varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 0, menor é a sensibilidade do emissor a variações de pressão (DUTTA, 2008).

Por se tratar de emissores de pequeno diâmetro interno, eles são muito susceptíveis à obstrução. Segundo Pizarro Cabello (1996), o grau de susceptibilidade desses emissores está relacionado ao seu diâmetro interno, conforme está apresentado na Tabela 2. Entretanto, além do diâmetro, a velocidade tem uma grande influência na susceptibilidade à obstrução de emissores. Segundo Keller e Bliesner

(1990), velocidades entre 4 e 6 m s⁻¹ diminuem a chance de obstrução.

Tabela 1 – Expoente de fluxo de diferentes tipos dos emissores

Emissor	Expoente de fluxo (x)
De regime laminar	1,00
Microtubos	0,75 a 1,00
Helicoidal	0,65 a 0,75
De regime turbulento (orifício, de labirinto)	0,50
Vórtice	0,40
Autocompensante	0,00 a 0,40
Teórico perfeitamente autocompensante	0,00

Fonte: Pizarro Cabello (1996)

Tabela 2 – Classificação de emissores quanto à sensibilidade de obstrução

	Diâmetro (mm)	Sensibilidade à obstrução	
-	≤ 0,7	Alta	
	0,7 a 1,5	Média	
	> 1,5	Baixa	

Fonte: Pizarro Cabello (1996)

Além desses parâmetros, características construtivas, hidráulicas ou mecanismos de autolimpeza, os diferenciam quanto a este aspecto (RESENDE; COELHO; PIEDADE, 2000). A arquitetura interna dos gotejadores tem uma grande importância, sendo que emissores de longo percurso na forma de labirintos devem apresentar uma configuração, que facilite a passagem de impurezas sem que estas provoquem sua obstrução. Segundo os mesmos autores, quando os fatores de obstrução são de origem biológica a arquitetura interna é muito mais determinante do que o diâmetro e a vazão, de modo que, emissores que apresentam um percurso maior estão mais susceptíveis à deposição de partículas e à formação de mucilagem que aqueles com menor percurso, mesmo com diâmetro menor.

Segundo Capra e Scicolone (2004) para a mesma condição de vazão, emissores do tipo vórtice são mais sensíveis à obstrução do que os emissores do tipo labirinto. Os mesmos autores afirmam ainda que os emissores do tipo labirinto *in-line* são influenciados, em relação à susceptibilidade ao entupimento, pelo diâmetro interno da tubulação, de modo que aqueles inseridos em tubulações de menor diâmetro estão mais susceptíveis à obstrução. Airoldi (2007) afirma que os microtubos (emissores de longo percurso e normalmente funcionam sob regime laminar)

apresentam maior sensibilidade ao entupimento que os gotejadores do tipo labirinto. Souza (2008) trabalhou com microtubos sob regime turbulento, aplicando soluções nutritivas de fertirrigação e não verificou a ocorrência de obstrução, comprovando que sob este regime a sensibilidade destes emissores à obstrução foi reduzida, visto que sob regime laminar, eles são classificados como emissores de alta susceptibilidade à obstrução (SOARES, 1981).

2.2 Qualidade da água para irrigação e a obstrução de emissores

Os principais fatores que caracterizam a água para o uso na irrigação estão relacionados com os aspectos físicos, químicos e biológicos (PITTS; HAMAN; SMAJSTRLA, 2003). A característica física da água que tem mais importância para a irrigação é a quantidade de sólidos em suspensão (GILBERT; FORD, 1986). Em relação às características químicas se destacam o pH, sólidos dissolvidos, ferro total, manganês, carbonato de cálcio e sulfeto de hidrogênio. Entre os fatores biológicos, destacam-se as bactérias, algas, zooplâncton e protozoários, sendo o último presente principalmente em águas residuárias (RAVINA et al., 1992). Estes agentes formam um biofilme, resultante da interação de colônias de bactérias e algas, que tem um elevado potencial de obstrução de gotejadores (BATISTA et al., 2010). Este cenário pode ser agravado quando ocorrem interações com agentes químicos e físicos já presentes na água ou injetados durante a irrigação. Acerca disto, a aplicação de fertilizantes pode contribuir para o crescimento de algas no interior da tubulação e dos emissores (RIBEIRO et al., 2004a).

No que se refere à qualidade química da água de irrigação tem-se uma situação relacionada aos impactos da salinidade e sodicidade do solo (OLIVEIRA; MAIA, 1998) e a outra ao potencial de obstrução dos emissores. Em relação ao segundo fator, temse que cálcio, magnésio, ferro e manganês são os elementos que apresentam maior potencial de obstrução (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2007), sendo que a precipitação de carbonatos constitui a causa de obstrução química mais comum na irrigação por gotejamento (DIAS; OLIVEIRA; COELHO, 2004). Segundo Morais, Maia e Oliveira (1998) nos aquíferos da região da Chapada do Apodi-RN, a água de poços rasos e profundos apresenta elevada concentração de íons carbonatos e altos valores de pH.

A precipitação de íons é favorecida quando o pH da água é mantido em valores

acima de 7. Outros fatores, como temperaturas elevadas, ocorrência de íons incompatíveis e evaporação da água dos emissores após a irrigação também podem ocasionar a precipitação de íons. Quando a água evapora, a concentração de íons aumenta e, consequentemente ocorre a precipitação, no momento em que é atingido o limite de solubilidade (PIZARRO CABELLO, 1996). Além disso, caso a adição de fertilizantes na água de irrigação não seja adequadamente planejada, podem ocorrer problemas de precipitação de outros íons, se estes forem incompatíveis, ou o próprio fertilizante pode precipitar na tubulação e nos emissores, dependendo do tipo e da sua concentração (FRIZZONE et al. 2012).

Já em relação ao risco de impactos nos atributos físico-químicos do solo, têmse os indicadores Razão de Adsorção de Sódio (RAS) e Condutividade elétrica da solução do solo (CE) (OLIVEIRA; MAIA, 1998), sendo que existe uma infinidade de modelos de classificação de água para irrigação baseados nesses indicadores. Contudo, segundo Almeida (2010), os mais utilizados são os do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos - 1993, Richards - 1993 e FAO – Ayers e Westcot -1987. Segundo Ayers e Westcot (1991), os fatores avaliados no estudo da qualidade da água de irrigação normalmente se apresentam na faixa apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores normais para os fatores indicadores da qualidade da água de irrigação

Parâmetros	Unidade	Valores normais
Condutividade elétrica	dS m ⁻¹	0 - 3
Sais totais dissolvidos	mg L ⁻¹	0 - 2000
Cálcio	meq L ⁻¹	0 - 20
Magnésio	meq L ⁻¹	0 - 5
Sódio	meq L ⁻¹	0 - 40
Carbonatos	meq L ⁻¹	0 - 0,1
Bicarbonatos	meq L ⁻¹	0 - 10
Cloretos	meq L ⁻¹	0 - 30
Sulfatos	meq L ⁻¹	0 - 20
Nitrato	mg L ⁻¹	0 - 10
Amônio	mg L ⁻¹	0 - 5
Fosfato	mg L ⁻¹	0 - 2
Potássio	mg L ⁻¹	0 - 2
Boro	mg L ⁻¹	0 - 2
рН		6 - 8,5
RAS	(mmol L ⁻¹) ^{1/2}	0 - 15

Fonte: Adaptado de Ayers e Westcot (1991)

Segundo Nunes et al. (2005) as águas superficiais e as águas captadas do subsolo apresentam características diferenciadas quanto às características químicas.

As águas superficiais são classificadas como de baixo risco de salinidade e alto risco de sodicidade, enquanto que as de poços podem ser consideradas, em sua maioria, de médio risco de salinidade e baixo risco de sodicidade. Ainda sobre os impactos da qualidade da água sobre o solo, Morais, Maia e Oliveira (1998) afirmaram que 35% das águas do semiárido apresentam boa qualidade, sendo que aproximadamente 6% das águas provocam problemas relativos à redução da capacidade de infiltração de água no solo.

Além das características químicas que têm correlação com a origem da água, de modo geral, os agentes físicos e biológicos também estão assim relacionados. Segundo Abbott (1987) as águas superficiais apresentam problemas de sólidos em suspensão como limo e argila, além de algas, enquanto que as águas provindas de poços contêm partículas de areia.

A respeito das causas mais frequentes de obstrução de emissores, há divergência na literatura. Adin e Alon (1986) comentam que as partículas sólidas são as causas mais frequentes de obstrução de emissores, enquanto Vermeiren e Jobling (2007) afirmam que as causas biológica, física e química representam 37, 31 e 22% dos casos, respectivamente, sendo os 10% restantes devido a causas incertas. Nakayama e Bucks (1991) comentam que as causas de obstrução variam de lugar para lugar, mas a maioria delas tem o envolvimento de partículas sólidas. Por isso, o diagnóstico exato das causas de obstrução dos emissores se torna complexo, uma vez que os agentes causadores da obstrução podem interagir (RAVINA et al., 1992), além de serem dinâmicos, apresentando variação temporal, principalmente na concentração bacteriana. Estas variações influenciam a evolução da perda de carga dos sistemas de filtragem e interferem nos intervalos das retrolavagens, dependendo do tipo de elemento filtrante (RIBEIRO et al., 2005a).

Os modelos de classificação da água de irrigação mencionados anteriormente levam em consideração apenas aspectos gerais, que estão relacionados com os impactos nas características físico-químicas do solo. Entretanto, os impactos causados aos sistemas de irrigação são desconsiderados. Sendo assim, Gilbert e Ford (1986) apresentaram a classificação de água em relação ao risco de obstrução dos emissores, em que se consideram os aspectos físicos, químicos e biológicos, conforme apresentado na Tabela 4. Apesar desta contribuição, são poucas as informações no que se refere ao risco de obstrução de emissores (PEREIRA; FEITOSA FILHO; SILVA, 2005).

Tabela 4 – Classificação da água de irrigação quanto ao risco de obstrução dos emissores

	Baixo*	Moderado	Severo
Físico			
Sólidos em suspensão	< 50	50 - 100	> 100
Químico			
рН	< 7	7 - 8	> 8
Sólidos dissolvidos	< 500	500 - 2000	> 2000
Ferro total	< 0,2	0,2 - 1,5	> 1,5
Manganês	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Sulfeto de hidrogênio	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Biológicos			
População bacteriana (NMP mL ⁻¹)	< 10000	10000 - 50000	> 50000

^{*}As unidades dos parâmetros físicos e químicos, exceto pH, são mg L-1.

Fonte: Gilbert e Ford (1986).

2.3 Granulometria das partículas

As partículas de solo são classificadas de acordo com o seu tamanho, podendo ser pedregulho, areia, silte ou argila, obedecendo a limites estabelecidos por diferentes padronizações. Dentre elas, destacam-se as escalas granulométricas da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), da ASTM (American Society for Testing and Materials) e da British (CAPUTO, 1973; HEAD, 1984). No Brasil tem-se a escala da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (PINTO, 2006). As diferenças entre essas escalas de classificação podem ser observadas na Figura 1.

As frações de cada classe de partículas são determinadas por meio do ensaio de análise granulométrica. As partículas maiores que 75 µm são classificadas pela passagem destas por um conjunto de peneiras, cujas malhas variam de 0,075 a 4,760 mm, conforme está apresentado na Tabela 5. Estas são especificadas em número de mesh, que é a quantidade de aberturas por polegada linear de tela da peneira (CAPUTO, 1973).

A proporção das partículas com dimensão inferior a 75 µm é estimada por meio do método de sedimentação, aplicado à lei de Stokes (Equação 1). A percentagem de partículas com diâmetro menor ou igual ao calculado pela lei Stokes, em um instante "t" qualquer e profundidade "z", pode ser determinada por meio da relação entre a densidade da suspensão inicial e a existente na suspensão mantida em repouso. A densidade da suspensão pode ser determinada por meio de densímetros (PINTO, 2006), sendo que a velocidade de dispersão das partículas é determinada pela relação

entre a profundidade em que são efetuadas as medidas de densidade e o tempo. Ressalta-se que o diâmetro determinado por meio da Equação 1, é um diâmetro equivalente, pois as partículas do solo não são esféricas. O diâmetro equivalente das partículas é o diâmetro de uma esfera de mesmo peso específico que o das partículas ensaiadas e que sedimenta com mesma velocidade.

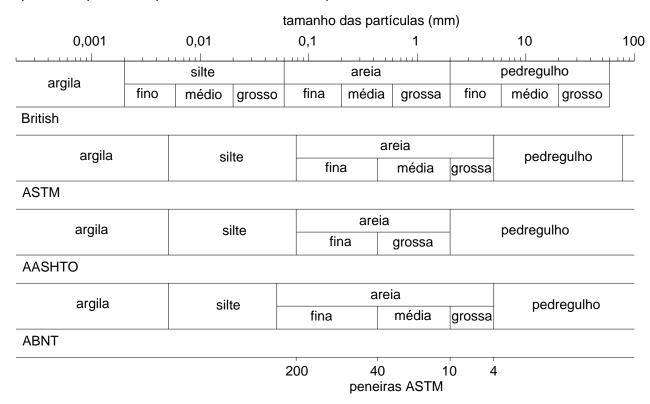


Figura 1 – Comparação entre as principais escalas granulométricas. Fonte: Adaptado de Caputo (1973) e Head (1984)

Tabela 5 - Abertura da malha das peneiras ASTM (mm)

N° (mesh)	Abertura (mm)	N° (mesh)	Abertura (mm)	N° (mesh)	Abertura (mm)
200	0,075	45	0,350	14	1,41
140	0,105	40	0,420	12	1,68
120	0,125	35	0,500	10	2,00
100	0,149	30	0,590	8	2,38
80	0,177	25	0,710	7	2,83
70	0,210	20	0,840	6	3,36
60	0,250	18	1,000	5	4,00
50	0,297	16	1,190	3/16"	4,76

Fonte: Caputo (1973)

$$\upsilon = \frac{2}{9} \frac{\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm a}}{\eta} \left(\frac{\rm d}{2}\right)^2 \tag{1}$$

em que:

υ: velocidade de dispersão das partículas, m s⁻¹;

 γ_s : peso específico do solo, N m⁻³;

γ_a: peso específico do meio dispersor, N m⁻³;

d: diâmetro equivalente da partícula, m; e

η: coeficiente de viscosidade dinâmica do meio dispersor, N s m⁻².

As frações de cada classe de partícula, com dimensão superior 75 µm, são calculadas pelo quociente entre a massa retida na peneira correspondente e a massa total ensaiada (HEAD, 1984). Segundo Ruiz (2005), algumas metodologias propõem o cálculo da proporção da fração silte por meio da diferença entre o somatório das demais frações em relação à amostra original. O mesmo autor propõe que o cálculo desta fração seja baseado em uma coleta adicional da suspensão (silte + argila), visando distribuir o erro total para todas as frações do solo.

De posse das proporções de todas as frações do solo, é possível a construção da curva granulométrica, que caracteriza a distribuição das diferentes frações das partículas do solo. O modelo de Rosin-Rammler-Bennet (Equação 2) é empregado para descrever a distribuição acumulada de partículas (SCHEID, 1992 Apud SOCCOL et al., 2005). Na Figura 2 está apresentado um exemplo de uma curva granulométrica seguindo a classificação da ABNT.

$$X = 1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{d_*}\right)^{\alpha}\right]}$$
 (2)

em que:

X: fração acumulativa de massas das partículas com diâmetro menor que d, adimensional; e

d_∗ e ∝: parâmetros de ajuste.

Outros critérios de caracterização das partículas do solo são o diâmetro efetivo, coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura (CAPUTO, 1973). O primeiro parâmetro é a abertura da malha que permite a passagem de 10% do peso total do solo (d_{ef}). O coeficiente de uniformidade (C_u) é o quociente entre a malha que permite a passagem de 60% do peso total solo (d_{60}) e o diâmetro efetivo (Equação 3). O coeficiente de curvatura (C_c) é função da malha que permite a passagem de 30% do peso total de solo (d_{30}), do diâmetro efetivo e do coeficiente de uniformidade (Equação 4).

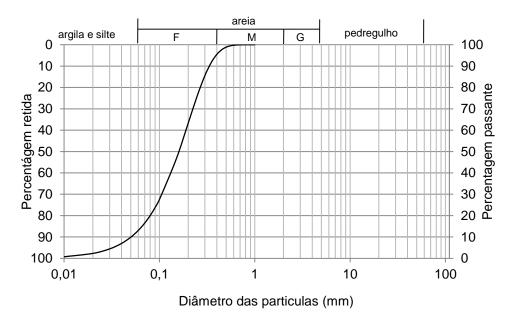


Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica, seguindo a classificação da ABNT. F: fina; M: média; e G: grossa. Fonte: Adaptado de Caputo (1973)

$$C_{\rm u} = \frac{d_{60}}{d_{\rm ef}} \tag{3}$$

$$C_{\rm u} = \frac{d_{60}}{d_{\rm ef}}$$

$$C_{\rm c} = \frac{d_{30}^{2}}{d_{60} \times d_{\rm ef}}$$
(4)

Os coeficientes de uniformidade e de curvatura indicam a uniformidade e a graduação da granulometria das partículas, respectivamente (CAPUTO, 1973). O primeiro parâmetro pode ser avaliado da seguinte forma: muito uniforme ($C_u < 5$); uniformidade média (5 < C_u < 15); e desuniforme (C_u > 15). Consideram-se solos bem graduados aqueles que apresentam valores de C_c entre 1 e 3. Segundo Pizarro Cabello (1996) a areia usada em filtros para irrigação deve apresentar um coeficiente de uniformidade entre 1,4 e 1,6, de modo a proporcionar uma filtragem eficiente.

2.4 Tratamento físico da água de irrigação

Os sistemas de microirrigação são concebidos para operar, quase que obrigatoriamente, em conjunto com um sistema de filtragem, uma vez que estes sistemas apresentam emissores com orifícios de pequenos diâmetros e, portanto, muito suscetíveis à obstrução por partículas sólidas. A remoção dessas partículas é feita por meio de filtros, que são diferenciados pelos seus elementos filtrantes. Os elementos filtrantes mais empregados na filtragem de água de irrigação são areia, tela e disco. Em alguns casos é necessária a utilização de pré-tratamento por meio de decantadores e/ou de hidrociclones. Segundo Capra e Scicolone (2004), na maioria dos casos, os sistemas de filtragem são compostos por filtros de tela, uma vez que estes apresentam a vantagem de serem simples, econômicos e de fácil manejo, quando comparados com os filtros de areia, que apresentam maior complexidade e maior custo.

Além dos filtros citados acima, alguns trabalhos têm testado o uso de elementos compostos de mantas sintéticas não tecidas. Este elemento filtrante substitui os discos ou as telas visando melhorar a eficiência de retenção de partículas. Os resultados indicam que este elemento aumenta a remoção de partículas orgânicas e inorgânicas presentes na água, apresentando uma evolução mais rápida de perda de carga em função do volume filtrado. Em consequência, necessita de um número maior número de retrolavagens em comparação com o elemento de disco (SCATOLINI; PATERNIANI, 2001; RIBEIRO et al., 2004a).

A escolha do sistema de filtragem deve ser baseada no tipo e na quantidade de contaminante, na vazão requerida e no tempo entre limpezas (KELLER; BLIESNER, 1990; OLIVEIRA, 2010). Esta complexidade tem feito com que grande parte dos sistemas de filtragem opere muito abaixo do nível ótimo, em decorrência de erros na escolha, no monitoramento e na manutenção em campo, mas se tem observado melhorias no dimensionamento destes sistemas com o passar do tempo (PHILLIPS, 1995). Diante da complexidade desses sistemas, o mesmo autor estabeleceu critérios para auxiliar na escolha adequada de sistemas de tratamento físico da água. Estes critérios estão apresentados na Tabela 6. Segundo Oliveira (2005) a eficiência dos filtros, depende de características próprias, inerentes a cada equipamento, mas também está diretamente ligada ao dimensionamento, às condições de funcionamento e à qualidade da água.

Para que o controle de obstrução dos emissores seja eficaz, os orifícios do elemento filtrante devem estar de acordo com as dimensões das partículas que se deseja reter. De modo geral, recomenda-se que os orifícios do elemento filtrante sejam capazes de reter partículas com 1/10 do diâmetro do emissor, evitando-se, com isso, que as partículas agrupadas provoquem obstruções. Podem-se utilizar critérios diferenciados para gotejadores (1/10) e microaspersores (1/5), uma vez que o último tipo de emissor apresenta menor suscetibilidade à obstrução (PIZARRO CABELLO, 1996).

não

> 100mg L^{-1 (3)}

Tipo de contaminante	Concontração	Carga aproximada (1),(2)	Filtro de tela	
ripo de contaminante	Concentração	<u> </u>	Fillio de tela	
	Leve	<10mg L ⁻¹		
Orgânicos ou mistura orgânico/ inorgânico	Moderada	10-25mg L ⁻¹		
	Média	25-50mg L ⁻¹	não	
	Média/alta	50-75mg L ⁻¹	Hao	
	Alta	75-100mg L ⁻¹		
	Muito alta	> 100mg L ^{-1 (3)}		
	Leve	<10mg L ⁻¹	sim	
	Moderada	10-25mg L ⁻¹		
la ovaŝajo o	Média	25-50mg L ⁻¹	sim (3)	
Inorgânicos	Média/alta	50-75mg L ⁻¹		
	Alta	75-100mg L ⁻¹	. ~ .	

Tabela 6 – Critérios para seleção de sistemas de tratamento físico da água para microirrigação

Muito alta

Fonte: Adaptado de Phillips (1995).

2.5 Hidrociclone

São equipamentos que auxiliam na remoção de partículas sólidas em suspensão em líquido, por meio do princípio da força centrífuga, sendo utilizados de maneira generalizada no setor industrial, mas pouco utilizados no ramo da irrigação brasileira (CRUZ; ZANINI, 2010). Segundo Soccol (2003) são equipamentos de fácil construção e baixo custo, quando feitos com material disponível em lojas de material de construção ou fibra de vidro. São indicados para pré-tratamento de água para irrigação, devido à sua eficiência quando operado em baixos diferenciais de pressão.

Os ciclones são compostos de uma parte cilíndrica com uma entrada tangencial de fluido, uma saída na parte superior e uma parte cônica onde há um orifício, destinado a eliminação do concentrado da suspensão (SOUZA et al., 2000), como pode ser observado na Figura 3. Soccol (2003) verificou que o formato do bocal de entrada do hidrociclone influencia na perda de carga, na vazão e na obstrução, sendo que o formato circular apresentou menor perda de carga em relação aos demais formatos.

A separação das partículas sólidas de maior diâmetro é proporcionada por meio

⁽¹⁾ Recomenda-se tela na sucção da bomba somente como pré-tratamento antes do filtro primário e separador centrífugo somente para remoção de material inorgânico com peso específico maior ou igual a 2 g cm⁻³, devendo-se utilizar em conjunto com filtro de tela ou areia;

⁽²⁾ Recomenda-se utilizar filtro de areia;

⁽³⁾ É recomendado um pré-tratamento com separador centrífugo.

de forças centrífugas, uma vez que a água é inserida tangencialmente, o que produz um vórtice descendente, fazendo com que as partículas maiores, que possuem maior densidade relativa sejam direcionadas à saída inferior (*underflow*). Por outro lado, as partículas menos densas são arrastadas para o centro do cone, onde se forma um vórtice ascendente que as direciona à saída superior (*overflow*) (Figura 3) (VIEIRA; DAMASCENO; BARROZO, 2010). A grande vantagem dos hidrociclones é que eles não apresentam partes móveis, o que os torna mais baratos que outros separadores com o mesmo princípio, como as centrífugas.

Esses equipamentos são recomendados para irrigação, quando a água apresentar altas concentrações de areia (SOCCOL et al., 2005). Estes autores avaliaram um hidrociclone de Rietema que apresentou uma eficiência total média de 96,1% para os diferenciais de pressão de 10 e 20 kPa. Segundo Pizarro Cabello (1996), esses equipamentos não apresentam variação de perda de carga ao longo do tempo, ao contrário dos filtros de areia, tela e disco.

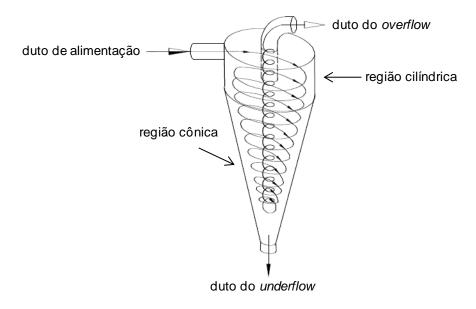


Figura 3 – Esquema de um hidrociclone e princípio de funcionamento. Fonte: Adaptado de Cruz e Zanini (2010)

Os diferentes hidrociclones são classificados em famílias de acordo com as variações geométricas de suas dimensões, podendo ser adaptados a diferentes processos (SOUZA et al., 2000). A escolha do hidrociclone deve ser baseada na necessidade do processo, seja por uma alta eficiência de classificação, baseada no tamanho das partículas, ou na concentração destas no *underflow* (BARBOSA et al., 2003). No caso da irrigação o objetivo é a eliminação de partículas cuja dimensão

seja superior a 100 µm, funcionando em conjunto com os filtros, podendo retirar até 98% destas partículas (SOCCOL, 2003).

2.6 Filtros de areia

Estes equipamentos consistem, basicamente, de recipientes cilíndricos, normalmente metálicos, preenchidos com areia (Figura 4). A entrada de água é feita pela parte superior, que possui um defletor para a distribuição da água. Na parte inferior têm-se coletores revestidos com tela, para evitar a saída de areia na tomada de água, localizada logo abaixo.



Figura 4 – Filtros de areia ligados em paralelo

A espessura da camada de areia influencia a eficiência de filtragem até um limite superior, chamado de espessura crítica, que varia de 0,4 a 0,6 m, a partir da qual o aumento da espessura da camada filtrante não condiciona melhorias na eficiência de retenção de partículas, além de dificultar a limpeza do meio filtrante durante as retrolavagens (PIZARRO CABELLO, 1996). Vermeiren e Jobling (2007) comentam que a espessura da camada filtrante pode variar de 0,15 m a vários metros, sendo que não se deve exceder 1,0 m.

A filtragem em meios porosos, como a areia, dá-se por meio de fenômenos superficial ou mecânico, sedimentação, e ação de forças adesivas e coesivas. O conjunto dessas ações faz com que os filtros de areia retenham partículas muito inferiores ao tamanho dos poros, sendo recomendados para retenção de contaminantes orgânicos e de algas (TESTEZLAF, 2008). Porém, esse meio pode

fornecer condições favoráveis à proliferação de bactérias (PHILLIPS, 1995).

O diâmetro efetivo das partículas do meio filtrante varia de acordo com o tamanho das partículas que se deseja reter. Aquelas que passam pelo meio filtrante apresentam aproximadamente um diâmetro de 1/12 a 1/10 do diâmetro das partículas do meio filtrante, apesar de depender da taxa de fluxo, como pode ser observado na Figura 5. (KELLER; BLIESNER, 1990). Desse modo, a taxa de fluxo nos filtros deve ser limitada de modo a proporcionar a eficiência de retenção desejada para a condição do meio poroso escolhido.

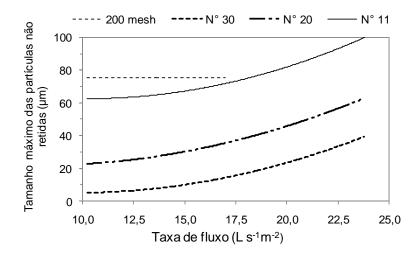


Figura 5 – Efeito da taxa de fluxo no tamanho máximo das partículas que passam pelo meio filtrante, sob diferentes granulometrias. Fonte: Adaptado de Keller e Bliesner (1990)

Segundo López et al. (1997) os principais materiais utilizados como meio filtrante nos filtros para irrigação são granito e areia de sílica. Estes são especificados por números relacionados ao tamanho médio dos grãos conforme está apresentado a seguir: números 8 e 11, constituídos de granito, e números 16, 20 e 30, constituídos de areia de sílica. As características de cada um desses materiais estão apresentadas na Tabela 7. Outros materiais como areia vulcânica, antracito e carvão ativado também são utilizados como meio filtrante (Figura 6).

O dimensionamento de sistemas de filtragem a partir de filtros de areia é feito tendo como variáveis decisivas a vazão do sistema de irrigação e o diâmetro dos emissores, sendo este usado para escolha do diâmetro efetivo da areia. A quantidade de filtros que o sistema necessita é função da vazão a ser filtrada, majorada em 20%, tendo como restrição a taxa de fluxo de água, que deve ser de no máximo 60 m³ m-² h-¹ (Equação 5), pois valores de taxa de fluxo superiores a este provocam redução na

eficiência de filtragem.



Figura 6 – Materiais comumente usados como meio filtrante. Fonte: Hubel

Tabela 7 – Características das areias mais empregadas como elemento filtrante

Material	N°	Diâmetro efetivo médio (µm)	Diâmetro do poro (µm)	Equivalente em mesh			
Granito moído	8	1500	214	70			
Granito moído	11	780	111	140			
Areia de sílica	16	660	94	170			
Areia de sílica	20	460	66	230			
Areia de sílica	30	270	39	400			

Fonte: Adaptado de López et al. (1997).

$$N = \begin{cases} \frac{2Q}{100A_F} & , & \frac{2Q}{100A_F} - int\left(\frac{2Q}{100A_F}\right) = 0\\ 1 + int\left(\frac{2Q}{100A_F}\right), & \frac{2Q}{100A_F} - int\left(\frac{2Q}{100A_F}\right) > 0 \end{cases}$$
 (5)

em que:

int: expressão lógica designada para descrever a parte inteira do resultado numérico;

N: número de filtros;

Q: vazão do sistema, m³h⁻¹; e

 A_F : área transversal interna do filtro, m².

2.7 Filtros de tela

Os filtros de tela são compostos de cilindros que contém no seu interior o elemento filtrante, constituído de tela de aço ou náilon (Figura 7). A retenção de partículas é feita por meio da ação superficial, ou seja, as partículas retidas são maiores que os orifícios do elemento filtrante, não apresentando volume de filtragem, como no caso dos filtros de areia (ADIN; ALON, 1986). Dessa forma, esses filtros devem ser usados em água com baixa concentração de partículas em suspensão, pois em condições de alta concentração colmatam rapidamente, reduzindo a sua

eficiência de filtragem. Por isso, de modo geral, eles são instalados a jusante dos filtros de areia e do sistema de injeção de fertilizantes, visando reter as partículas que ocasionalmente passarem pelos sistemas anteriores.



Figura 7 – Filtros de tela

Existem diversos tipos de telas, construídas de materiais como aço inoxidável ou plástico. Estas são especificadas pelo número de mesh, variando comumente de 100 a 200 mesh. Entretanto, como o número de mesh corresponde o número aberturas por polegada linear de tela, dependendo do material que esta é constituída, a abertura da tela pode ser maior ou menor para o mesmo número de mesh. Sendo assim, é necessário que os fabricantes forneçam o tamanho do orifício. Na Tabela 8 está apresentada a relação entre o número de mesh e a abertura da tela de aço inoxidável em µm (PIZARRO CABELLO, 1996).

O dimensionamento desses filtros é feito com base na velocidade de água no filtro. A velocidade recomendada é função da qualidade da água (Tabela 9). O número de filtros para uma determinada vazão, majorada em 20% pode ser calculada a partir da Equação 6.

$$N = \begin{cases} \frac{Q}{30p \ vAt} &, & \frac{Q}{30p \ vAt} - int\left(\frac{Q}{30p \ vAt}\right) = 0\\ 1 + int\left(\frac{Q}{30p \ vAt}\right), & \frac{Q}{30p \ VAt} - int\left(\frac{Q}{30p \ vAt}\right) > 0 \end{cases}$$
 (6)

em que:

N: número de filtros;

Q: vazão, m³ s⁻¹;

At: área da tela de cada filtro, m2;

p: porcentagem da superfície dos orifícios, %;

v: velocidade de escoamento, m s⁻¹; e

int: expressão lógica designada para descrever a parte inteira do resultado numérico.

Tabela 8 – Relação entre o número de mesh e a abertura da tela de aço inoxidável

Número de mesh	Orifício (µm)	Número de mesh	Orifício (µm)
3,5	5600	32	500
4	4750	35	425
5	4000	42	355
6	3350	48	300
7	2800	60	250
8	2360	65	212
9	2000	80	180
10	1700	100	150
12	1400	115	125
14	1180	150	106
16	1000	170	90
20	850	200	75
24	710	250	63
28	600		

Fonte: Pizarro Cabello (1996)

Tabela 9 – Recomendação de velocidade em filtros de tela

Tamanho do orifício (µm)	Classe de água	Velocidade (m s ⁻¹)
300-125	Limpas	0,4 - 0,9
300-125	Com algas	0,4-0,6
125-75	Qualquer	0,4-0,6

Fonte: Pizarro Cabello (1996)

2.8 Filtros de disco

A estrutura dos filtros de disco é similar à dos filtros de tela, porém seu elemento filtrante tem um princípio de funcionamento diferenciado, contemplando algumas características dos filtros de tela e de areia. Trata-se de um conjunto de anéis com ranhuras em ambos os lados, de modo que, quando empilhados uns sobre os outros, forma-se um conjunto de pequenos condutos por onde a água passa (Figura 8). A dimensão desses condutos depende da quantidade de ranhuras presente em cada

disco, sendo normalmente especificados em número de mesh equivalente. Os números mesh disponíveis variam de 40 a 200 e, são diferenciados por meio de cores conforme está apresentado na Tabela 10 (PIZARRO CABELLO, 1996).



Figura 8 - Filtros de disco

Quando o elemento filtrante de filtros de disco e de tela se encontra isento de partículas sólidas, a perda de carga em função da vazão pode ser descrita através do modelo potencial (OLIVEIRA, 2005; TESTEZLAF; RAMOS, 1995). Para a vazão nominal a perda de carga normalmente varia de 1 a 3 mca.

Tabela 10 – Cores dos discos em função do número de ranhuras

Cor	Número de ranhuras	Mesh	Diâmetro (µm)
Azul	170	40	420
Amarelo	340	80	177
Vermelho	490	120	125
Preto	660	140	105

Fonte: Frizzone et al. (2012)

Esses filtros são recomendados em substituição aos filtros areia para sistemas de baixa vazão em que o custo de aquisição desses tornar-se-ia muito elevado (NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2007) e/ou nos casos de água com baixa carga de partículas em suspensão.

Apesar de serem semelhantes aos de areia, ou seja, o elemento filtrante apresenta um volume de filtragem, esse volume é razoavelmente pequeno, o que lhe confere a característica de necessidade de limpeza frequente como é o caso dos filtros de tela. Batista et al. (2004) avaliaram o potencial de entupimento de filtro de discos

por esgoto sanitário tratado e concluíram que esse elemento filtrante apresentou baixa eficiência na retenção de partículas em suspensão, devido à obstrução do filtro.

2.9 Limpeza dos filtros

Pela retenção das partículas suspensas no meio filtrante, os filtros sujam com o passar do tempo, causando aumento na perda de carga e, por conseguinte, há necessidade de se proceder a limpeza para retirar todas as impurezas retidas, de modo a retomar sua eficiência e perda de carga original. Esta limpeza, denominada retrolavagem, é realizada mediante a mudança na direção de fluxo a partir da tubulação de saída. Assim, tanto a tubulação de entrada deve possuir uma derivação para eliminar a água suja, quanto o sistema deve permitir essa mudança de direção de forma manual ou automática (TESTEZLAF, 2008). No caso dos filtros de tela e/ou discos, o elemento filtrante pode ser limpo diretamente pelo usuário, bastando retirálo do corpo do filtro, visto que esses filtros são de pequeno porte, o que facilita este tipo de operação. No caso dos filtros de discos é recomendável que os discos sejam separados para que a limpeza seja realizada com eficácia.

Apesar de existirem alguns critérios para definição do momento da retrolavagem, Nakayama (1986) afirma que não existe uma regra universal para predizer com precisão o momento exato da limpeza do filtro. Em sua maioria, os filtros são retrolavados manualmente, com intervalos de tempo predefinidos, ou se utilizando sistemas automáticos baseados em valores de perda de pressão, ocasionada pelo entupimento da camada filtrante. A perda de carga crítica para se proceder a retrolavagem é, de modo geral, de 6 mca. (BERNARDO et al., 2006; PIZARRO CABELLO, 1996; LÓPEZ et al., 1997). Já para os filtros limpos essa perda de carga normalmente varia de 1 a 3 mca. Outro critério é a redução da vazão proveniente do aumento da perda de carga, também devido ao acúmulo de partículas sólidas, sendo este o critério menos utilizado, (MEDINA SAN JUAN, 2000). Já Silva, Mantovani e Ramos (2003) recomendam que a retrolavagem seja realizada a cada aumento de 10 a 20% da perda de carga em relação ao filtro limpo, entretanto, este critério provavelmente proporciona um maior número de retrolavagens comparado com o critério anterior, recomendado pela maioria dos autores. Keller e Bliesner (1990) e James e Shannon (1986) recomendam que a limpeza deve ser realizada quando a perda de carga aumentar em 35 kPa (3,6 mca) e, Zeier e Hills (1987) recomendam uma perda de carga máxima de 39 kPa (4 mca).

Para o filtro de areia, a vazão de retrolavagem tem que ser suficiente para originar a fluidização do leito filtrante, ou seja, a passagem reversa da água pela camada de areia deve determinar um estado de suspensão das partículas de areia na água, com expansão progressiva do leito até certo limite, que possibilite a remoção das partículas contaminantes, mas que mantenha a areia dentro do filtro. Esta vazão varia com o diâmetro efetivo médio da areia, com a altura da camada filtrante e com o modelo construtivo de filtro (TESTEZLAF, 2008). Apesar dessas variações, Keller e Bliesner (1990) recomendam taxas médias de fluxo de 7 a 10 L m⁻² s⁻¹ (25,2 a 36 m³ h⁻¹m⁻²) para diâmetros efetivos médios de areia entre 1900 e 1000 μm, e de 14 a 17 L s⁻¹ m⁻² (50,4 a 61,2 m³ h⁻¹ m⁻²) para diâmetros entre 1000 e 825 μm.

A complexidade da definição do valor correto da vazão de retrolavagem devese ao fato de que ela depende do diâmetro e do modelo construtivo do filtro, do diâmetro médio efetivo e da espessura da camada de areia e da quantidade de contaminantes retidos no filtro. Outro problema que ocorre na retrolavagem é a perda de água durante a sua operação que, dependendo da forma de manutenção e do tempo utilizado pelo agricultor, pode atingir valores excessivos (TESTEZLAF, 2008).

Os filtros podem ser arranjados para operarem em série durante as retrolavagens, embora sejam dimensionados para operar em paralelo durante os eventos de irrigação. Os principais esquemas de ligação hidráulica, segundo Medina San Juan (2000), são por blocos ou por pares, como pode ser visualizado nas Figuras 9A e 9B, respectivamente.

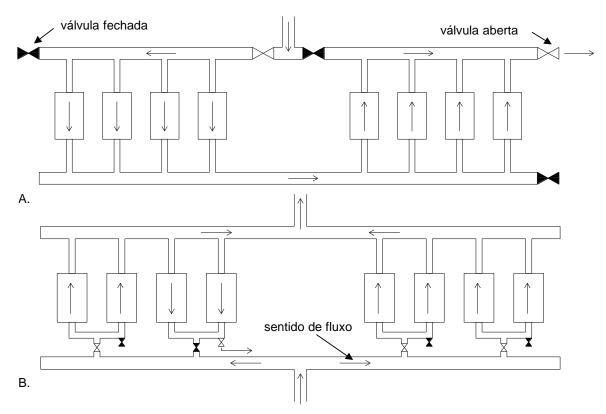


Figura 9 – Esquema de ligação hidráulica para operação: A. por blocos; e B. por pares. Fonte: Adaptado de Medina San Juan (2000)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização experimental

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, Piracicaba, SP. Este laboratório é equipado com instrumentos de medição e dispõe de infraestrutura para confecção de circuitos eletrônicos. Para a avaliação de desempenho do sistema proposto foi utilizada a infraestrutura do Laboratório de Solos e Qualidade da Água.

3.2 Descrição do sistema de filtragem

O sistema de filtragem é composto de três filtros, onze válvulas solenoides controladas eletronicamente e por conexões e tubulações que fazem a junção dos componentes hidráulicos. Esta configuração, teve como objetivo condicionar uma situação na qual seja possível a retrolavagem de um dos filtros, com o sistema em funcionamento, visto que estes estão dispostos em série, como pode ser visualizado por meio das Figuras 10A, 10B e 10C. Os componentes F1, F2 e F3 representam os filtros, V1 a V8 as válvulas de controle de direção de fluxo, e VL1, VL2 e VL3 representam as válvulas para limpeza dos filtros.

A função das válvulas solenoides é garantir a possibilidade do controle eletrônico da direção do fluxo de água no sistema, bem como, a frequência com que esta é modificada, visando fazer a retrolavagem do filtro subsequente.

A ordem de abertura das válvulas em função do filtro que está submetido ao processo de reversão (retrolavagem) está apresentada na Figura 10. Os trecho em azul representam o caminho pelo qual a água se desloca no sistema de filtragem, sendo que as válvulas acionadas para cada situação de reversão estão indicadas em vermelho. Sendo assim, para os filtros F1, F2 e F3 em reversão, tem-se o esquema de ligação hidráulico correspondente, indicado nas Figuras 10A, 10B e 10C, respectivamente.

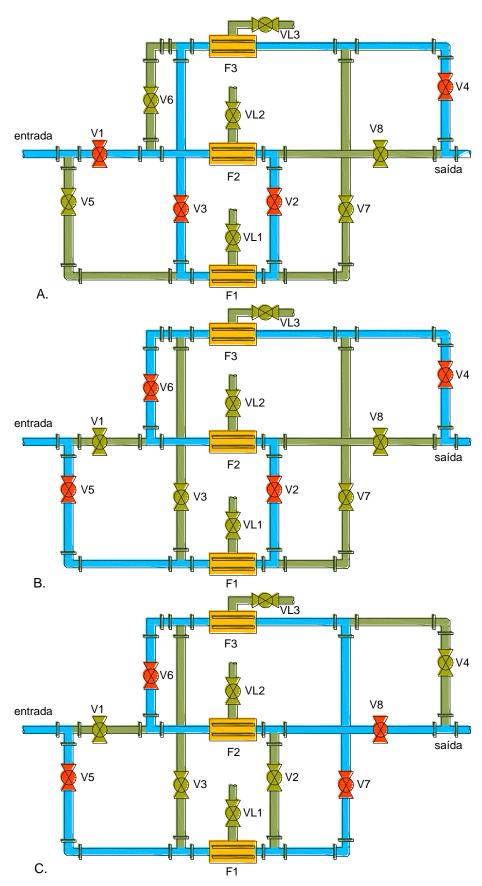


Figura 10 – Esquema de funcionamento do sistema de filtragem (tubos com fluxo em azul). Filtros em reversão: A. Filtro F1; B. Filtro F2; C. Filtro F3. V1 a V8: Válvulas (válvulas acionadas em vermelho); VL1, VL2 e VL3: Válvulas de limpeza dos filtros

Durante o curso do processo, as partículas que ficam retidas nos filtros precisam ser retiradas do sistema, uma vez que a sujeira retirada de um filtro durante o processo de reversão fica retida no filtro subsequente, ao passo que com o tempo esta tende a provocar um aumento da perda de carga. Sendo assim, as válvulas VL, apresentadas na Figura 10, tiveram por finalidade eliminar a sujeira do sistema quando esta provocar uma perda de carga máxima admissível.

3.3 Construção dos protótipos

Construiu-se dois protótipos (Protótipo 1 e Protótipo 2), sendo o primeiro destinado à realização de estudos no que tange à funcionalidade do sistema de filtragem concebido *a priori*. Esse protótipo foi composto de válvulas solenoides de pequeno porte (vazão máxima de 40 L min⁻¹), filtros de papel (usados em automóveis) e tubos flexíveis transparentes (Figura 11). Por meio destes tubos era possível a observação do fluxo de água em função do sinal de acionamento das válvulas, fornecendo condições para obtenção de informações técnicas que possibilitaram a elaboração do software de controle.



Figura 11 – Protótipo 1 construído para desenvolvimento do controle do sistema de filtragem

O Protótipo 2 é constituído de três filtros de tela de 120 mesh, com entrada de 1 polegada, nove válvulas solenoides de comando hidráulico do tipo globo de 1 polegada e conexões hidráulicas como uniões, luvas, tês, joelhos e *nipples*. Maiores detalhes deste protótipo podem ser visualizados na Figura 12A e, as características

técnicas dos seus componentes estão mostradas na Tabela 11. Este sistema conta com duas tomadas de pressão localizadas na entrada e na saída do protótipo onde estão conectados microtubos ligados a um transdutor de pressão diferencial que possibilita a determinação da perda de carga, que é um fator de controle do sistema.

Os filtros utilizados no Protótipo 2 são o modelo Super de 1", fabricados pela Amiad, cuja vazão nominal é de 7 m³ h-¹. A carcaça desses filtros pode ser utilizada tanto com elemento filtrante de tela como de disco, bastando apenas inverter o sentido de fluxo, pois, quando o elemento filtrante é o disco a água deve entrar pela parte externa dos discos, enquanto que, no caso da tela a água deve entrar pela parte interna da tela.

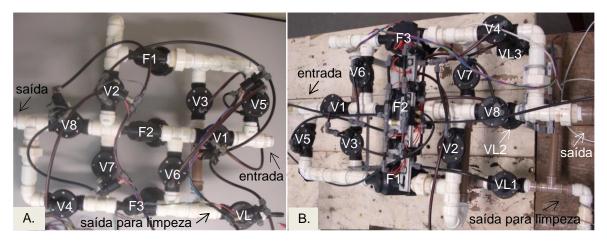


Figura 12 – A. Protótipo 2, com apenas uma válvula de limpeza; e, B. Protótipo 3, com uma válvula de limpeza para cada filtro

Devido à constatação da ineficácia da limpeza dos filtros no Protótipo 2, foram realizadas mudanças no sentido de corrigir este inconveniente, chegando-se ao Protótipo 3 (os detalhes a respeito da ineficácia da limpeza estão no Item 3.5.4). A saída para limpeza por meio da válvula (VL) foi substituída por três saídas instaladas na parte inferior de cada filtro, como pode ser visualizado na Figura 12B.

Tabela 11 – Características físicas dos componentes do sistema de filtragem

Componentes	Diâmetro	Quantidade
Cotovelo de 90°	25 mm	7
União	25 mm	4
Luva	25 mm	2
Tê	25 mm	9
Nipple	25 mm	40
Válvula	1 pol (25 mm)	9
Filtro	1 pol (120 mesh)	3
	- (/	

A curva característica de perda de carga em função da vazão de água nas válvulas e nos filtros estão apresentadas na Figura 13, sendo a perda de carga nas válvulas e nos filtros representada por hf_V e hf_F , respectivamente.

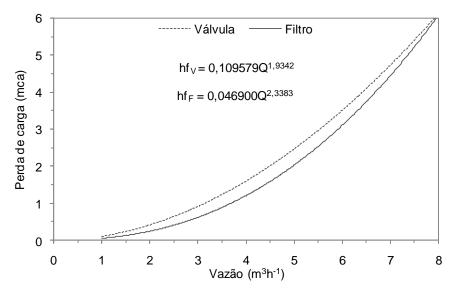


Figura 13 – Curva característica de perda de carga em função da vazão das válvulas hidráulicas (hf√) e dos filtros utilizados no protótipo (hfF). Fonte: Adaptados do catálogo Bermad e Amiad

3.4 Desenvolvimento do circuito eletrônico e software de controle

O circuito eletrônico foi confeccionado no Laboratório de Hidráulica, onde se dispõe dos equipamentos necessários para tal finalidade. Os principais componentes eletrônicos utilizados no circuito de controle, bem como suas características técnicas estão apresentados na Tabela 12.

Utilizou-se o microcontrolador PIC18F4550, da Microchip Technology Inc, que apresenta uma memória *flash* de 32 kbytes, e é programado em Linguagem C. Para comunicação serial RS-232, utilizou-se um circuito integrado MAX 232, que proporcionou a aquisição e visualização dos dados por meio da interface de microcomputadores. Para este trabalho a aquisição de dados foi feita por meio de um aplicativo desenvolvido em linguagem de programação Pascal, em ambiente Delphi, que permite o armazenamento dos dados em um arquivo de texto, salvo em diretório especificado pelo usuário, conforme apresentado na Figura 14. Além disso, o sistema eletrônico conta com uma interface própria para a visualização direta dos eventos e a interferência nos mesmos, por meio de um visor de cristal líquido (LCD).

A determinação da pressão foi feita por meio do transdutor de pressão MPX5700DP, que opera na faixa de 0 a 700 kPa. As curvas de calibração dos

transdutores de pressão (Figura 15) foram obtidas em laboratório, por meio de um manômetro do tipo peso morto.

Tabela 12 – Características técnicas dos principais componentes eletrônicos

Componente	Característica	Unidade			
PIC18F4550					
Fabricante	Microchip Technology				
Alimentação	5	V			
N° pinos	40	-			
Pinos					
AD (10 bits)	13	-			
Portas	5	-			
Memória					
Flash	32	kbytes			
EEPROM	256	bytes			
Temperatura de operação	-40 a 85	°C			
Impedância de entrada máxima	2,5	kΩ			
MAX 232					
Fabricante	Texas Instruments				
N° pinos	16	-			
Temperatura de operação	0 a 70	°C			
Alimentação	5	V			
MPX 5700 DP					
Fabricante	Freescale				
Temperatura de operação	0 a 85	°C			
Alimentação	5	V			
Pressão	0 a 700	kPa			

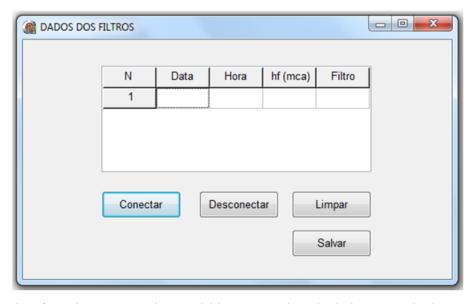


Figura 14 – Interface do programa desenvolvido para a coleta de dados por meio da porta serial

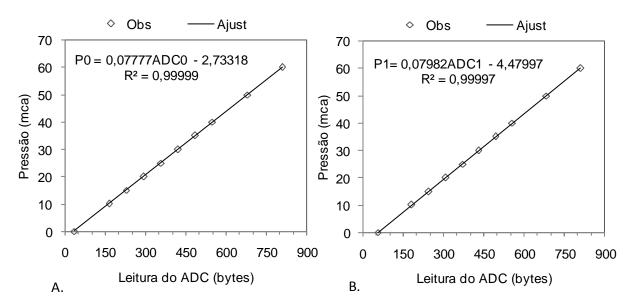


Figura 15 – Curva de calibração do sensor MPX5700DP, realizada em laboratório

O circuito completo com os componentes e o esquema de ligação elétrica estão apresentados nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

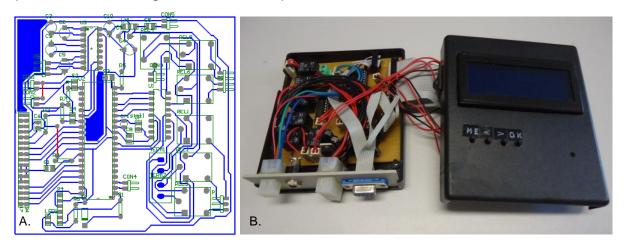


Figura 16 – A. Circuito impresso; e B. hardware completo do sistema de controle

O fluxograma do software de controle do sistema de filtragem está apresentado na Figura 18. A lógica de controle das limpezas dos filtros é baseada na perda de carga média das condições de funcionamento dos filtros, sendo as limpezas realizadas no momento da reversão de fluxo, para cada filtro. As limpezas eram realizadas por meio de pulsos elétricos. A duração dos pulsos e a quantidade de pulsos foram determinadas conforme está descrito no item 3.5.2.

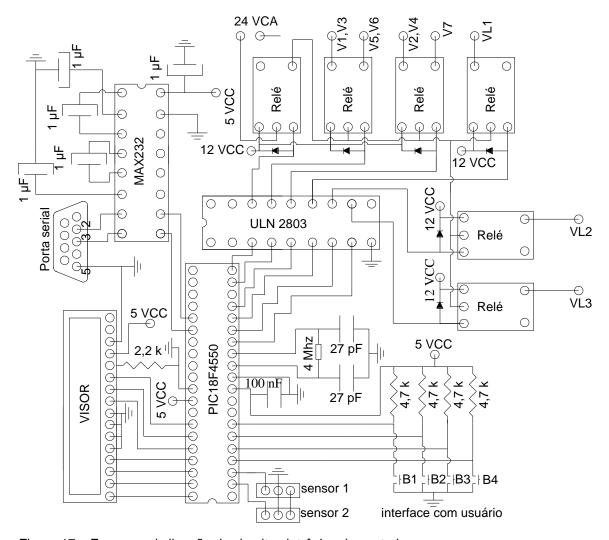


Figura 17 – Esquema de ligação do circuito eletrônico de controle

As saídas F1, F2, F3, Limpa F1, Limpa F2 e Limpa F3 do controlador agem sobre as válvulas solenoides e proporcionam as diferentes condições de funcionamento que são: filtros 1, 2, 3 em reversão; e limpeza do sistema de filtragem. As variáveis "i" e "j" são indicadores de ações relativos à reversão dos filtros e o número de medidas para o cálculo da perda de carga média, respectivamente. Adicionalmente, as entradas hf(AD), hf e T, são a perda de carga instantânea, perda de carga média e tempo de controle, respectivamente.

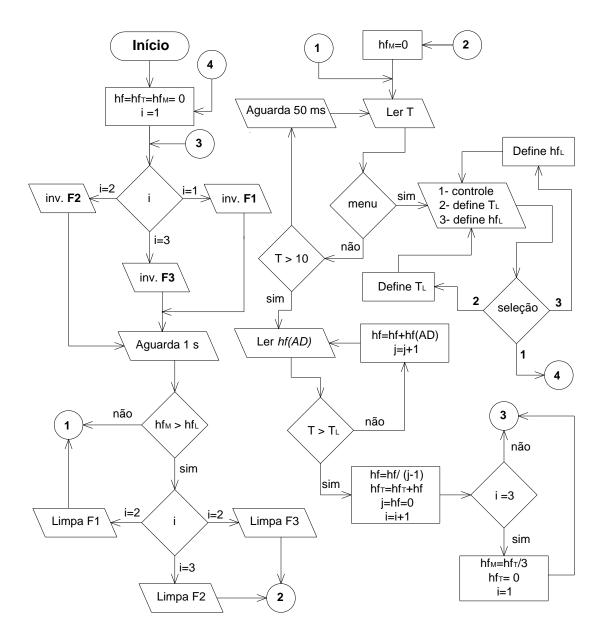


Figura 18 – Fluxograma de controle automático do sistema

3.5 Caracterização hidráulica

3.5.1 Curva vazão x perda de carga sob água isenta de sólidos em suspensão

A perda de carga foi obtida por meio da diferença de pressão entre a entrada e a saída do sistema determinada por meio de um manômetro diferencial de mercúrio. Esta foi determinada para as três condições de funcionamento do sistema (filtros 1, 2 e 3 em reversão), coletando-se 10 pontos de vazão e perda de carga para cada condição. Este número de pontos é superior ao limite de sete pontos, recomendado

pela ASAE S 539. O procedimento experimental foi realizado de acordo com Testezlaf e Ramos (1995), disponibilizando-se de um medidor eletromagnético de vazão em série com o sistema de filtragem, sendo realizado o controle da vazão por meio de uma válvula instalada a jusante do medidor. Segundo esses autores, o comportamento da perda de carga em filtros de tela e disco, em função da vazão, ajusta-se ao modelo potencial (Equação 7).

$$h_f = aQ^b \tag{7}$$

em que:

 h_f : perda de carga decorrente da vazão Q (m³ h-¹) utilizada no ensaio, quando os filtros estão sem partículas sólidas retidas, mca; e

a e b: parâmetros de ajuste.

Para evitar a influência da turbulência nas medidas de pressão e vazão, instalaram-se tubos retos a montante e a jusante dos pontos de medida, conforme recomendações de Peres (2008).

3.5.2 Volume de água despendido durante uma limpeza, em função do tempo de abertura das válvulas VL e do número de pulsos elétricos

O volume de água por acionamento da válvula de limpeza VL é dependente do tempo de sua abertura e da pressão da água no interior dos filtros. Inicialmente foi obtida a curva de volume de água em função do tempo de abertura das válvulas de limpeza, funcionando com água limpa. Os tempos de abertura ensaiados variaram de 0,25 a 3,0 s, sob pressão de entrada do sistema de filtragem de pressão de 20 mca. As medidas de volume de água foram efetuadas indiretamente, por meio da coleta da água em um recipiente previamente pesado, sendo obtida a massa de água. O volume foi calculado dividindo-se a massa de água pela massa específica da água. Como a massa específica é função da temperatura da água, esta foi mensurada durante os testes. As medidas de massa de água e temperatura foram efetuadas por meio de uma balança digital e de um termômetro de mercúrio, com resolução de 0,1 g e 1°C, respectivamente.

Para minimizar o volume de água despendido durante a limpeza dos filtros, foram analisadas diferentes combinações de tempos de abertura e número pulsos elétricos, para cada filtro individualmente, conforme está apresentado na Figura 19. As limpezas eram realizadas no momento em que a perda de carga atingia um incremento de 50%. Para cada combinação analisada era possível verificar a

presença de vazamento de água nas válvulas de limpeza logo após seu acionamento e o volume de água em cada limpeza para cada filtro.

Pulso1 (ms)		Pulso2 (ms)												Pulso3 (ms)		
		500			750		1000		1500		2000					
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
250	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	_	_	_	250
_	_	_	_	_	_	_	Χ	Χ	_	Χ	Χ	_	Χ	Χ	Χ	500
500	_		_	_	_	_	_	_	Χ	Χ		Χ	_		Χ	500

Figura 19 – Combinação de tempo de abertura, número de pulsos para os filtros F1, F2 e F3 Legenda:

X ensaio realizado

— ensaio não realizado

3.5.3 Caracterização do perfil de perda de carga mediante a mudança de direção de fluxo

O controlador do sistema de filtragem toma decisões baseado na perda de carga, conforme está descrito no item 3.4. Toda vez que ocorre uma mudança de direção do fluxo, em consequência do fechamento e abertura das válvulas de controle, tem-se como resultado, perturbações na pressão de entrada e saída do sistema de filtragem. Estas perturbações são inconvenientes, pois mascaram a perda de carga real.

O conhecimento do comportamento destas perturbações é essencial para contorná-las, ou seja, deve-se evitar que as medidas de pressão sejam realizadas no momento em que as perturbações na pressão estão ocorrendo. Para isso, coletou-se dados de perda de carga em intervalos de tempo de 1 s, obtendo-se o perfil de perda de carga em função do tempo de ensaio, para vazão de aproximadamente 2 m³ h-1.

3.5.4 Evolução da perda de carga em função do volume filtrado (tempo de funcionamento)

Ao passo que se acumulam partículas sólidas na tela de um filtro, a perda de carga para a mesma vazão aumenta, uma vez que ocorre a obstrução dos poros da tela. Segundo Adin e Alon (1986) a relação entre a perda de carga e o volume filtrado, considerando-se uma vazão e uma concentração constante, tem um comportamento exponencial (lei de Boucher), expressa pela Equação 8. Ou seja, pode-se inferir que a relação entre massa de partículas retidas no filtro e a perda de carga também tem

uma relação exponencial.

$$h_f' = h_f e^{IV_F}$$
 (8)

em que:

 h_f ': perda de carga ocasionada por uma vazão Q, depois de filtrado um volume de água $V_F(L)$, mca;

e: número de Neper; e

I: índice de filtrabilidade, que é função da concentração de sólidos em suspensão.

Para ocasionar a evolução da perda de carga nos filtros foi injetada areia a montante do sistema de filtragem, simulando uma concentração de 1 g L⁻¹, o que corresponde uma taxa de injeção de 0,555 g s⁻¹, seguindo metodologia apresentada no item 3.6.3.

A evolução da perda de carga em função do volume filtrado foi caracterizada somente para o Protótipo 3, sendo necessária uma adequação da válvula de limpeza dos filtros (Figura 20), uma vez que se constataram inconvenientes devido à obstrução das válvulas. Sendo assim, foram feitos ensaios de evolução da perda de carga antes e depois dessa adequação. Para o Protótipo 3 também foi feito o ensaio de evolução da perda de carga com o sistema funcionando sem inversão de fluxo, de tal modo a obter o efeito da inversão de fluxo na evolução da perda de carga.

A adequação da válvula de limpeza foi feita, adicionando-se na base dos filtros, um êmbolo preso a uma mola apoiada em uma base fixa (Figura 20). Quando a válvula de descarga está fechada, tem-se que a pressão no interior do filtro (p1) é igual à pressão na tubulação de descarga (p2), sendo assim, como a mola está comprimida, então se tem uma resultante no sentido da tela, o que mantém o êmbolo na saída inferior do filtro, obstruindo-a e não permitindo a passagem dos sólidos para o tubo de descarga (Figura 20). Por outro lado, quando a válvula de descarga é aberta, tem-se que a pressão p2 se torna muito inferior à pressão p1, o que gera uma resultante no sentido da válvula de descarga. Esta força desloca o embolo para baixo, desobstruindo a saída inferior do filtro.

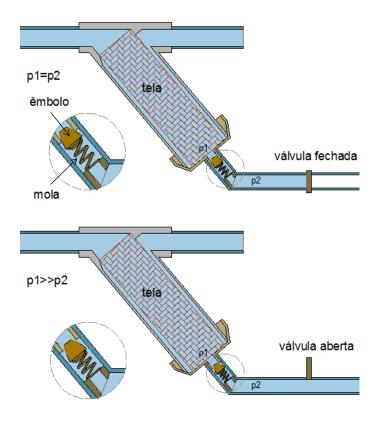


Figura 20 – Esquema de funcionamento da válvula de retenção dos sólidos no filtro

3.6 Avaliação de desempenho do sistema de filtragem

O desempenho do sistema de filtragem foi verificado por meio da eficiência de filtragem obtida de ensaios realizados em delineamento experimental inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 2 x 3, com três repetições. Os fatores considerados foram: concentração de sólidos (500 e 1000 mg L⁻¹); tempo de reversão de fluxo (15 e 30 s); e, incremento da perda de carga para efetuar a limpeza dos filtros (25 e 50%).

3.6.1 Controle da vazão de saída do sistema de filtragem

Como a vazão não era um fator de estudo, esta foi mantida constante durante os ensaios. Para isto, na saída da tubulação de descarga do sistema de filtragem foi instalado um bocal e um regulador de pressão (Seninger, pressão nominal 10 mca), conforme está apresentado na Figura 21. Uma vez que a vazão de um bocal é função apenas da pressão de entrada, considerando as características construtivas constantes, tem-se que a vazão na sua saída será constante para uma pressão de entrada constante. O bocal foi escolhido para proporcionar uma vazão de 2 m³ h-1, sob

uma pressão de 10 mca. Esta vazão foi estabelecida, baseando-se na curva de perda de carga em função da vazão e da eficiência energética (coeficiente ηf).



Figura 21 – Bancada de ensaio usada na avaliação do sistema de filtragem

3.6.2 Avaliação da eficiência de retenção do sistema de filtragem segundo a metodologia proposta pela ASABE

A eficiência de filtragem ou de remoção pode ser calculada por meio da Equação 9, conforme recomendações da ASAE S 539. O ensaio foi realizado em circuito fechado. Para manter os sólidos em suspensão foi utilizado um agitador hidráulico. Outros detalhes da bancada de teste podem ser visualizados na Figura 21.

$$E_{\rm r} = 1 - \frac{C_{\rm s}}{C_{\rm e}} \tag{9}$$

em que:

E_r: eficiência de remoção (adimensional);

C_s: concentração de sólidos a jusante do sistema de filtragem, mg L⁻¹; e

C_e: concentração de sólidos a montante do sistema de filtragem, mg L⁻¹.

O material adicionado à água para composição das concentrações desejadas foi areia, por se tratar de um material inerte, e por sua vez é pouco susceptível às variações de outros fatores. Caso fosse usado partículas não inertes estas poderiam sofrer alterações durante os testes, como agregação ou dispersão de partículas, o que inviabilizaria o controle das fontes de variação dos ensaios. A curva granulométrica da areia utilizada está apresentada na Figura 22, sendo caracterizada pelos seguintes

indicadores, recomendados por Caputo (1973): d_{ef} , d_{30} , d_{60} , C_u (Equação 3) e C_c (Equação (4), apresentando valores de 217,3 µm, 305,4 µm, 397,5 µm, 1,83 e 1,08, respectivamente.

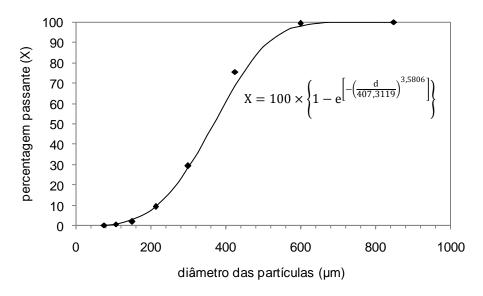


Figura 22 – Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios de eficiência de retenção de partículas. X: percentagem passante; d: diâmetro das partículas

A concentração de sólidos totais na entrada e na saída foram determinadas pelo método gravimétrico, coletando-se três amostras de água, armazenadas em recipientes com capacidade de 500 mL. Depois de se determinar a massa de água, as amostras foram transferidas para recipientes metálicos e levados para a estufa de circulação forçada a 105 °C. Depois que toda água havia evaporado, as amostras foram mantidas a 105 °C por 24 horas, quando era efetuada a medição da massa de sólidos. O cálculo da concentração foi feito de acordo com a Equação 10.

$$C_{x} = \frac{m_{s} \times 1000}{\left(\frac{m_{a} - m_{s}}{\rho_{a}}\right) + \frac{m_{s}}{\rho_{s}}} \tag{10}$$

em que:

 C_x : concentração de sólidos na amostra "x", seja C_e ou C_s (g L^{-1});

m_s: massa de sólidos (g);

m_a: massa da solução que se deseja medir a concentração de sólidos (g);

ρ_a: massa específica da água (g cm⁻³); e,

ρ_s: massa específica da areia (g cm⁻³).

3.6.3 Avaliação da eficiência de retenção do sistema de filtragem (metodologia proposta)

Devido às dificuldades de se manter a concentração de sólidos constante ao longo dos testes e entre os testes, o que dificulta o controle desta variável, que é um fator em análise, optou-se por desenvolver uma metodologia que possibilitasse repetibilidade dos ensaios. Isto foi obtido por meio da injeção dos sólidos diretamente na tubulação de entrada do sistema de filtragem, por meio do arranjo de válvulas instaladas na tubulação, como pode ser visualizado na Figura 23.

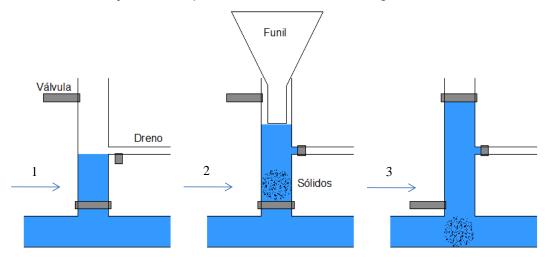


Figura 23 – Esquema do sistema de injeção de areia

A eficiência de remoção foi obtida por meio dos sólidos totais na entrada e os sólidos totais retidos nos filtros (Equação 11). Como o material sólido adicionado à água foi areia, têm-se duas componentes de sólidos totais: sólidos com diâmetro maior que 50 μm (areia injetada) e sólidos com diâmetro menor que 50 μm, já presentes na água. Então, coletou-se, para cada ensaio, uma amostra de água de 500 mL do reservatório e outra do recipiente de coleta da água de limpeza, para se obter a concentração de sólidos com diâmetro menor que 50 μm. Sendo assim, foi possível calcular a massa de sólidos com diâmetro menor que 50 μm, uma vez que se determinou o volume de água filtrada e da água de limpeza. O volume filtrado foi medido por meio de um hidrômetro com faixa de vazão de 0 a 2,5 m³ h-¹ e o volume de água de limpeza foi determinado por meio de pesagem, adotando-se a mesma metodologia utilizada no item 3.5.2. Para separação das partículas com diâmetro maiores e menores que 50 μm, foi adaptada uma peneira ABNT n° 270 (53 μm) na entrada do recipiente de coleta da água de limpeza, sendo que os sólidos da fração

areia ficaram retidos na peneira. Como no momento da limpeza a água saía sob pressão, esta era coletada em recipiente com um orifício na base (recipiente auxiliar), escoando por esse orifício sobre a peneira, sendo assim, a energia do jato era dissipada no recipiente auxiliar, não incidindo diretamente sobre a peneira, evitando respingos (Figura 21).

Note-se que por meio desta metodologia é possível se calcular a eficiência de retenção de sólidos maiores que 50 µm (Equação 12).

$$E_{r} = \frac{m_{r} + C_{l}V_{l}}{m_{t} + C_{e}(V_{F} + V_{l})}$$
(11)

$$E_{d>50} = \frac{m_{\rm r}}{m_{\rm t}} \tag{12}$$

em que:

 $E_{d>50}$: eficiência de remoção de sólidos com diâmetro superior a 50 μ m (adimensional);

m_r: massa de sólidos com diâmetro superior a 50 μm, retida nos filtros, g;

m_t: massa de sólidos injetada nos filtros, g;

 C_1 : concentração de sólidos com diâmetro menor que 50 μ m, presentes na água de limpeza, g L^{-1} ;

C_e: concentração de sólidos injetados na entrada do sistema, g L⁻¹;

 V_F : Volume filtrado, L; e

V₁: volume de água de limpeza, L.

3.6.4 Eficiência energética (coeficiente ηf)

A relação entre a energia de entrada e saída é definida como coeficiente ηf ($0 \le \eta f \le 1$) e considera a dissipação de energia hidráulica no sistema de filtragem, segundo Marques Júnior (1998), conforme Equação 13, complementando a análise de eficiência de retenção de partículas sólidas, uma vez que envolve também o aspecto econômico, que está relacionado ao consumo energético do sistema.

$$\eta f = \frac{E_s}{E_e} = 1 - \frac{w}{E_e} \tag{13}$$

em que:

E_s: energia hidráulica imediatamente a jusante do sistema de filtragem, mca;

E_e: energia hidráulica imediatamente a montante do sistema de filtragem, mca; e
w: dissipação de energia entre a entrada e a saída do sistema, mca.

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos situados imediatamente a montante e a jusante do sistema filtragem, tem-se a seguinte expressão matemática (Equação 14).

$$E_{e} = \frac{8 Q^{2}}{g \pi^{2} D^{4}} + \frac{P_{1}}{\gamma_{a}} + z_{1} = \frac{8 Q^{2}}{g \pi^{2} D^{4}} + \frac{P_{2}}{\gamma_{a}} + z_{2} + w$$
 (14)

em que:

D: diâmetro da tubulação a montante e a jusante do sistema filtragem, m;

γ_a: peso específico da água, kgf m⁻³;

Q: vazão, m³ s⁻¹;

 P_1 e P_2 : pressões a montante e a jusante do sistema filtragem, respectivamente, kqf m⁻²:

 z_1 e z_2 : cota da tubulação a montante e a jusante do sistema filtragem, respectivamente, m; e

g: aceleração da gravidade, m s-2.

Para a situação em que a tubulação se encontre em nível, e tomando o ponto z_1 como referência, tem-se que a energia hidráulica na entrada do sistema de filtragem e a dissipação ao longo deste pode ser estimada por meio da Equação 15 e da Equação 16, respectivamente.

$$E_{e} = \frac{8\gamma_{a}Q^{2} + g\pi^{2}D^{4}P_{1}}{g\pi^{2}\gamma_{a}D^{4}}$$
 (15)

$$w = \frac{P_1 - P_2}{\gamma_a} = h_f$$
 (16)

Aplicando a Equação 15 e a Equação 16 na Equação 13, resulta na Equação 17.

$$\eta f = 1 - \frac{g\pi^2 D^4 \gamma_a h_f}{8\gamma_a Q^2 + g\pi^2 D^4 P_1}$$
(17)

3.7 Modelagem da redução de vazão em função do incremento da perda de carga nos filtros para sistemas de irrigação

Para um dado instante, de acordo a lei de Boucher (Equação 8), cujo volume filtrado é V_F , tem-se que o termo exponencial é uma constante (ϵ), que multiplica a perda de carga na condição inicial, em que o sistema de filtragem estaria limpo (Equação 18).

$$h_{f}' = \varepsilon h_{f} \tag{18}$$

Segundo Mendonça (1999) a curva vazão versus pressão de uma bomba centrífuga pode ser descrita por um polinômio de segundo grau (Equação 19).

$$H = aQ^2 + bQ + c \tag{19}$$

em que:

H: altura manométrica total para uma vazão Q, m; e

a, b e c: parâmetros de ajuste da equação.

A altura manométrica total, para um sistema de irrigação é a soma da perda de carga total do sistema, do desnível de elevação e da pressão de serviço emissor. Imagine-se um sistema de irrigação qualquer, associado ao sistema de filtragem, como pode ser visualizado na Figura 24. Neste caso a altura manométrica total é diferenciada unicamente pela mudança da perda de carga nos filtros, que é alterada com incremento da retenção de partículas. O equacionamento deste comportamento pode ser expresso de acordo com as Equações 20 e 21.

$$H_0 = H_G + KQ_0^m + h_f + P$$
 (20)
 $H = H_G + KQ^m + h_f' + P$ (21)

$$H = H_G + KQ^m + h'_f + P (21)$$

em que:

 H_{0} : altura manométrica total para uma vazão Q_{0} , que provoca uma perda de carga inicial h_f, no sistema de filtragem, m;

H_G: altura geométrica, m;

P: pressão na entrada do emissor, m;

K: constante que caracteriza os componentes hidráulicos do sistema de recalque de água; e

m: expoente da vazão da equação de perda de carga.

A equação de vazão em função da pressão de entrada de um emissor pode ser definida de acordo com a Equação 22 (FRIZZONE et al., 2012).

$$q = kP^{x}$$
 (22)

em que:

q: vazão do emissor; m³ s⁻¹;

P: pressão no emissor, mca; e

k e x: parâmetros de ajuste da equação.

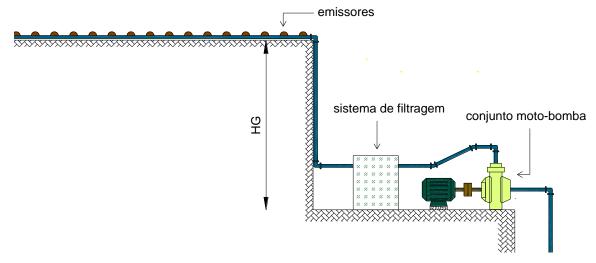


Figura 24 – Esquema ilustrativo de um sistema de irrigação associado ao sistema de filtragem

Considerando um sistema com n emissores, tem-se que a vazão total será:

$$Q = nq (23)$$

Aplicando-se a Equação 23 na Equação 22, tem-se:

$$P = \left(\frac{Q}{nk}\right)^{\frac{1}{x}} \tag{24}$$

Aplicando-se a Equação 24 na 21, tem-se:

$$H = H_G + KQ^m + h'_f + \left(\frac{Q}{nk}\right)^{\frac{1}{x}}$$
 (25)

Neste caso, têm-se duas situações: I) suponha-se que há algum mecanismo para a regulação da pressão na saída do conjunto motobomba, fazendo com que a altura manométrica total se mantenha constante (Figura 25); e II) não há mecanismo de regulação de pressão (Figura 26). Esses dois casos serão avaliados nos itens 3.7.1 e 3.7.2.

3.7.1 Caso I: Sistema de bombeamento com dispositivo regulador de pressão

Como a altura manométrica não varia, tem-se da Equação 25 que:

$$h'_{f} = H_{0} - \left(H_{G} + KQ^{m} + \left(\frac{Q}{nk}\right)^{\frac{1}{x}}\right)$$
 (26)

Quando $h_f^\prime = h_f$, então $Q = Q_0$ e representa a curva do sistema inicial, ou seja,

com o sistema de filtragem limpo. Em um instante qualquer após a limpeza, a curva do sistema é alterada conforme está apresentado na Figura 25.

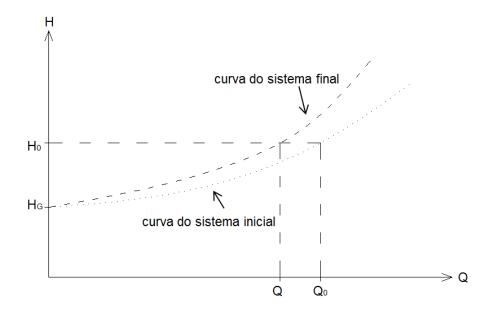


Figura 25 – Representação gráfica do comportamento da variação de vazão em função do aumento da perda de carga, considerando a altura manométrica constante

3.7.2 Caso II: Sistema de bombeamento sem dispositivo regulador de pressão

Aplicando a Equação 25 em 19, tem-se:

$$H_G + KQ^m + h'_f + \left(\frac{Q}{nk}\right)^{\frac{1}{x}} = aQ^2 + bQ + c$$
 (27)

Então:

$$h'_{f} = aQ^{2} + bQ + c - \left(H_{G} + KQ^{m} + \left(\frac{Q}{nk}\right)^{\frac{1}{x}}\right)$$
 (28)

A representação gráfica deste processo está apresentada na Figura 26, em que se considera uma condição inicial com o sistema de filtragem limpo (curva do sistema inicial) e aquela após um incremento de perda de carga devido à obstrução dos poros dos filtros (curva do sistema).

Então para ambos os casos a redução percentual de vazão (r) é dada pela Equação 29.

$$r = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \tag{29}$$

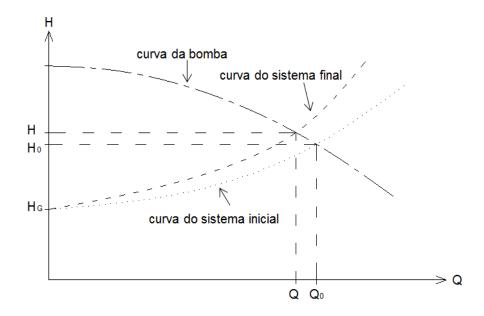


Figura 26 – Representação gráfica do comportamento da variação de vazão em função do aumento da perda de carga, considerando-se a altura manométrica variável

Sendo que:

$$r = r \left(\frac{h_f - h_f'}{h_f} \right) \tag{30}$$

ou

$$r = r(1 - \varepsilon) \tag{31}$$

3.8 Aplicação da modelagem da redução de vazão na limpeza automática do sistema de filtragem

A limpeza do sistema de filtragem é realizada mediante duas situações: uma considerando a redução de vazão e outra o incremento da perda de carga. Para o caso da redução de vazão, a limpeza será realizada quando o incremento da perda de carga proporcione uma redução de vazão de 10% em relação à vazão do sistema de irrigação, tendo-se como base as variáveis e parâmetros apresentados no item 3.7. Dessa forma, aplicando-se a Equação 28 a esta condição, tem-se que a perda de carga é:

$$h'_{fc} = 0.81aQ_0^2 + 0.9bQ_0 + c - \left(H_G + K(0.9Q_0)^m + \left(\frac{(0.9Q_0)}{nk}\right)^{\frac{1}{x}}\right)$$
(32)

em que:

 ${\bf h}_{\rm fc}'$: perda de carga crítica, ou seja, indica o momento da limpeza do sistema de filtragem.

Ou para uma redução de vazão qualquer:

$$h'_{fc} = a[(1-r)Q_0]^2 + b(1-r)Q_0 + c - \left(H_G + K[(1-r)Q_0]^m + \left(\frac{(1-r)Q_0}{nk}\right)^{\frac{1}{x}}\right)$$
 (33)

Note-se que estas equações podem ser aplicadas para ambos os casos citados no item anterior, sendo que quando a altura manométrica for constante, assume-se que $c=H_0$ e a=b=0, de modo que as Equações 32 e 33 se tornam equivalentes à Equação 26.

Observa-se que é evidente a necessidade da entrada para o controlador do sistema de filtragem, das variáveis particulares a cada situação, de modo que o mesmo atue na limpeza do sistema, no momento que atingir a condição crítica.

Para o caso em se desejar trabalhar sem o modo variação de vazão o usuário tem a possibilidade de escolher o modo variação de perda de carga em relação à perda de carga nominal h_{fN} , ou seja, aquela que ocorre quando filtro se encontra desobstruído e com a vazão nominal do filtro. Neste caso, basta informar o fator de perda de carga λ .

$$h'_{fc} = \lambda h_{fN} \tag{34}$$

Sendo assim o controlador conta com dois algoritmos de controle: "variação de vazão" e "variação de perda de carga". A interface do sistema está apresentada na Figura 27.

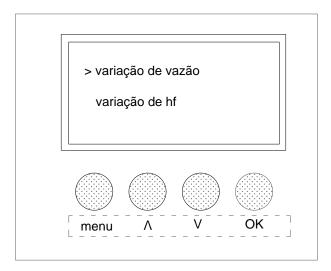


Figura 27 – Esquema da interface do controlador com o usuário

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva vazão x perda de carga sob água sem adição de sólidos

Na Figura 28 está apresentada a curva característica de perda de carga em função da vazão de entrada do sistema de filtragem, com elemento filtrante de tela, para as três condições de funcionamento, ou seja, com os filtros F1, F2 e F3, em reversão. Pode-se observar que a perda de carga em função da vazão tem um comportamento potencial conforme sugere Oliveira (2005) e Testezlaf e Ramos (1995). Mesmo considerando-se os três sentidos de fluxo o modelo potencial se ajustou bem aos dados, apresentando um coeficiente de determinação de 0,9986.

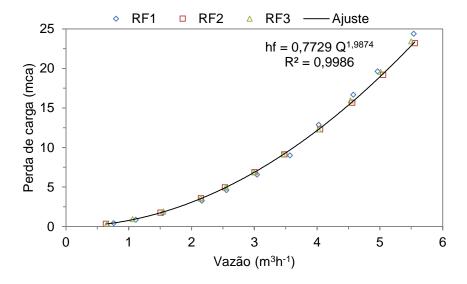


Figura 28 – Curva característica de perda de carga em função da vazão de entrada do sistema de filtragem. RF1, RF2 e RF3: Filtros F1, F2 e F3 em reversão, respectivamente.

Apesar da vazão nominal dos filtros ser de 7 m³ h⁻¹, percebe-se que para uma vazão de 5 m³ h⁻¹, a perda de carga é de aproximadamente 20 mca, enquanto que a perda de carga declarada pelo fabricante seria de 2 mca (Figura 13). Então, para os três filtros a perda de carga seria de aproximadamente 6 mca. Isto evidencia que outros componentes do sistema contribuem de forma significativa para a perda de carga, principalmente as válvulas de controle, cujo princípio de funcionamento é por diafragma e que apresentam uma elevada perda de carga, quando comparada com outros tipos de válvula. Pode-se perceber por meio da Figura 13 que a perda de carga em uma única válvula hidráulica é sempre superior à perda de carga do filtro, para

qualquer vazão.

Para diminuir a perda de carga no sistema seria necessário o uso de válvulas de ação direta, porém, estas apresentam um custo relativamente elevado quando comparado com as válvulas hidráulicas de ação indireta. Caso se encontre válvulas de ação direta com características técnicas compatíveis com o sistema de filtragem, seria a opção mais viável.

4.2 Volume de água despendido durante uma limpeza, em função do tempo de abertura das válvulas VL

Na Figura 29 está apresenta a curva de volume de água em função do tempo de acionamento da válvula de limpeza, para a pressão de entrada do sistema de filtragem de 20 mca e funcionando com água limpa. Pode-se observar que para tempos superiores a 0,75 s, o volume de água é diretamente proporcional ao tempo, porém para valores de tempo inferiores a 0,75 segundos, esta proporção não foi mantida. Possivelmente, isto ocorre porque a válvula passa a não abrir completamente neste intervalo de tempo, sendo assim, adotou-se em ensaios preliminares o tempo de 0,75 s como sendo o tempo mínimo de limpeza dos filtros.

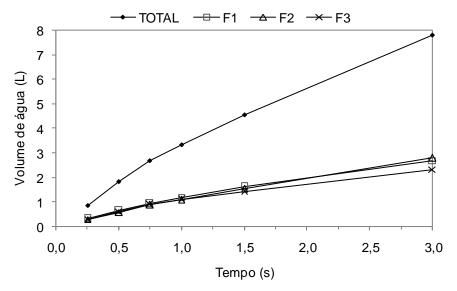


Figura 29 – Volume de água utilizado na limpeza do sistema de filtragem em função do tempo de abertura das válvulas. TOTAL: volume total de uma limpeza; F1, F2 e F3: volume de limpeza dos filtros 1, 2 e 3, respectivamente

O tempo de 0,75 s foi eficaz na limpeza dos filtros, entretanto, partículas sólidas retidas na válvula de descarga impediam o seu fechamento completo, o que aumentava o volume de água desperdiçado, uma vez que durante a filtragem a água

continuava a fluir pela válvula de drenagem. Este problema persistiu mesmo para tempos superiores a 2,5 s. Possivelmente, partículas de areia ficavam presas na válvula de limpeza, impedindo que o diafragma vedasse completamente a saída de água. Entretanto, quando a limpeza foi efetuada por meio de pulsos, dependendo da combinação de tempo e do número de pulsos a válvula de descarga funcionou adequadamente, sem vazamentos (Figura 30). Supõe-se que as partículas retidas nas válvulas de limpezas eram retiradas no último pulso, pois neste momento água no interior do filtro já se encontrava limpa, não levando mais partículas para a válvula de limpeza.

Pulso1 (ms)	Pulso2 (ms)															
	500			750		1000		1500		2000		Pulso3				
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	(ms)
								Volu	me de á	gua (L)						
250	*	*	*	*	*	*	*	1,69**	*	2,20**	2,25	1,50**	_	_	_	250
_	_	_	_	_	_	_	*	1,97	_	*	2,30	_	2,99	2,88	*	F00
500	_	_	_	_	_	_	_		1,46**	*		1,88	_	_	2,26	500

Figura 30 – Volume de água de limpeza sob diferentes combinações de tempo de abertura e número de pulsos para os filtros F1, F2 e F3

Legenda

A combinação de tempo e do número de pulsos que apresentou o menor volume de água para realização de limpeza dos filtros foi de três pulsos (pulso1= 250 ms; pulso2= 1500 ms; pulso3= 250 ms), para F1 e F3, (pulso1= 250 ms; pulso2= 1000 ms; pulso3= 250 ms) para F2, o que proporcionou volume de limpeza de 5,39 L. Outra combinação que proporcionou volume de limpeza mínimo para F3 é pulso1= 500 ms, pulso2= 1000 ms e pulso3= 500 ms, combinado com os tempos de pulso já citados. Entretanto, adotou-se como combinação de tempo e pulso o primeiro caso por apresentar os tempos de pulso 1 e 3 em comum.

Quando a limpeza foi feita por meio de dois pulsos, apenas os filtros F1 e F2 não apresentaram vazamentos nas válvulas de limpeza. Entretanto, o volume de água foi maior do que aquele em que se utilizou 3 pulsos, mesmo para a situação em que o tempo total de abertura das válvulas foi igual. Isto acontece porque o tempo dos pulsos 1 e 3 são inferiores ao tempo de abertura total da válvula que é de 0,75 s, sendo que nesta faixa, como a válvula está abrindo, a vazão vai aumentando até

^{*}apresentou vazamento na válvula de limpeza

^{ensaio não realizado}

^{**}volume mínimo de água de limpeza

atingir um valor estável (válvula totalmente aberta), de modo que, mesmo se o tempo total em que válvula permaneça aberta seja igual, tem-se que a vazão é maior para tempos de abertura maior e, consequentemente maior volume de água.

4.3 Caracterização do perfil de perda de carga mediante a mudança de direção de fluxo

As reversões de fluxo nos filtros causam perturbações instantâneas na pressão e consequentemente na perda de carga, uma vez que esta reversão é feita por meio da abertura e fechamento de válvulas. Como a ação das válvulas se dá de forma brusca, ocorrem variações também bruscas na pressão de saída do sistema de filtragem.

Na Figura 31 está apresentado o perfil de perda de carga do sistema de filtragem em função do tempo, sendo indicado o momento da mudança de direção de fluxo (MDF). Pode-se observar uma queda brusca na perda de carga, toda vez que ocorrem essas mudanças, sendo que a partir de 10 s a perda de carga já está estabilizada. Então este é o momento ideal para determiná-la.

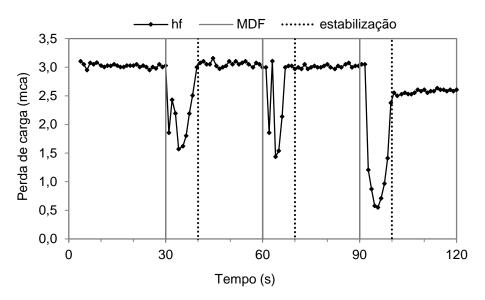


Figura 31 – Perfil de perda de carga mediante a mudança de direção de fluxo. hf: perda de carga; estabilização: intervalo de tempo de estabilização da perda de carga após uma mudança de direção de fluxo; e MDF: mudança de direção de fluxo

Caso a perda de carga seja determinada em um intervalo de tempo inferior a 10 s, tem-se que a perda de carga medida será subestimada e consequentemente as decisões do controlador serão prejudicadas. Sendo assim, adotou-se um tempo de 12 s, limitando-se o tempo mínimo de reversão de fluxo a 15 s.

4.4 Evolução da perda de carga em função do volume filtrado (tempo de funcionamento)

Para o sistema de filtragem proposto, com o arranjo inicialmente concedido (Protótipo 2), verificou-se que o aumento da perda de carga ocorreu de forma lenta, mesmo depois de se aplicar uma quantidade de sólidos considerável, como pode ser observado na Figura 32 (SVR – variação da perda de carga sem a válvula de retenção de partículas). O aumento da perda de carga ultrapassou 10% apenas após a aplicação de uma massa de sólidos de aproximadamente 700 g. Isto não está de acordo com a lei de Boucher (Equação 8) que estabelece que a evolução da perda de carga em filtros de tela se dá de forma exponencial.

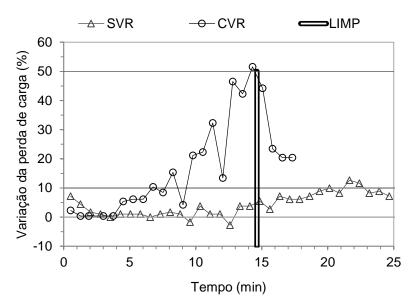


Figura 32 – Variação da perda de carga em função do tempo de injeção de sólidos a taxa constante: SVR: Sem a válvula de retenção dos sólidos; CVR: Com a válvula de retenção dos sólidos. LIMP: limpeza dos filtros

Este aumento lento da perda de carga proporcionou problemas de controle do sistema proposto, pois o controlador aciona limpezas automáticas toda vez que a perda carga atingir um nível preestabelecido pelo o usuário. Quando o controlador detectava um pequeno incremento da perda de carga, da ordem de 10%, o tubo de descarga se encontrava obstruído pelos sólidos, o que impossibilitava a limpeza dos filtros. Isto se deve ao fato de se ter na parte inferior dos filtros um "reservatório", composto pela tubulação de descarga (espaço entre o filtro e a válvula de descarga), onde os sólidos ficavam acumulados, ou seja, a perda de carga só aumentava depois que o tubo de descarga era preenchido.

Entretanto, para o Protótipo 3, em que se adicionou a válvula "antientupimento", pode-se observar um comportamento diferente da evolução da perda de carga (Figura 32, CVR – variação da perda de carga com a válvula de retenção de partículas), mesmo o ensaio tendo sido realizado sob as mesmas condições de vazão e taxa de injeção de sólidos que o do Protótipo 2 (sem a válvula de retenção de sólidos). Pode-se observar que a perda de carga atingiu uma variação de 50% em apenas 15 minutos, enquanto que, nos ensaios realizados sem a válvula de retenção de sólidos, a variação da perda de carga atingiu apenas 10% em 20 minutos de ensaio. Além disso, a limpeza dos filtros se deu de forma eficaz, enquanto que, sem a válvula de retenção de sólidos o tubo e a válvula de descarga foram totalmente obstruídos.

Nas Figuras 33A e 33B estão apresentados os gráficos de evolução da perda de carga em função do tempo de ensaio e da massa de sólidos injetados nos filtros sob concentração de 1000 mg L⁻¹, para o sistema de filtragem com a válvula de retenção de sólidos (Protótipo 3). Além disso, pode-se observar que para ambas as variáveis os dados se ajustaram ao modelo exponencial, apresentando valores de coeficiente de determinação superior a 96%. Observa-se ainda que para um tempo aproximado de 20 minutos, ou massa total de sólidos injetados de aproximadamente 550 g, a variação da perda de carga atingiu valores acima de 80%, enquanto que, o sistema sem a válvula o incremento de perda de carga foi de apenas 10%.

Segundo Zeier e Hills (1987) a evolução da perda de carga dos filtros de tela em função da massa acumulada na tela é influenciada pela concentração e pelo tamanho das partículas de areia. Para a mesma perda de carga a massa de areia acumulada nos filtros aumenta com a concentração e com tamanho das partículas. Segundo os mesmo autores as partículas menores obstruem os poros da tela, enquanto que as maiores se depositam na parte inferior do filtro.

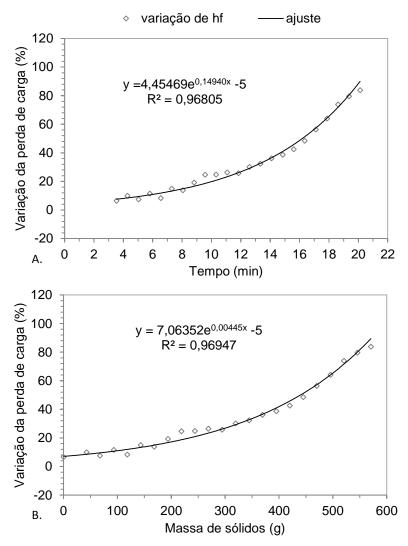


Figura 33 – Evolução da perda de carga: A. em função do tempo de ensaio e; B. massa de sólidos injetada

4.5 Eficiência energética (coeficiente ηf)

As curvas de eficiência energética para as pressões de entrada do sistema de filtragem de 15, 20, 30 e 40 mca, estão apresentadas nas Figuras 34A e 34B, em função da vazão e da perda de carga, respectivamente. Note-se que para vazões inferiores a 2 m³ h⁻¹, têm-se coeficientes ηf superiores a 80% para todas as pressões de entrada. Este valor foi tomado para definir a vazão nominal do sistema de filtragem. Além disso, a eficiência energética é inversamente proporcional à pressão de entrada e a vazão.

Quando se expressou em função da perda de carga, o coeficiente ηf teve uma relação linear, como pode ser visualizado na Figura 34B.

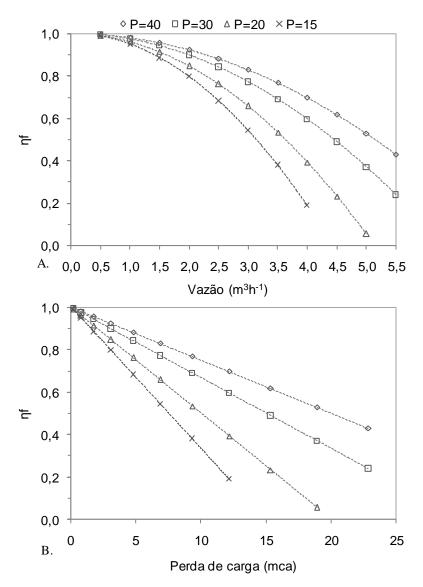


Figura 34 – Curvas do coeficiente ηf para pressões de entrada (P: 40, 30, 20 e 15 mca) do sistema de filtragem: A: em função da vazão; e B: em função da perda de carga

4.6 Eficiência de retenção e volume de água de limpeza por volume de água filtrada

Os dados de eficiência de retenção de sólidos totais e de sólidos com diâmetro maior que 50 µm obtidos dos ensaios de desempenho estão apresentados nos APÊNDICES A e B, respectivamente. Estes dados foram utilizados na análise de variância.

Dos fatores analisados, apenas a concentração apresentou diferença significativa a 1%, sendo que nenhuma interação entre os fatores foi significante (Tabela 13). Sendo assim, pode-se analisar o efeito da concentração de sólidos conjuntamente, obtendo-se eficiências de 0,717 e 0,783 para as concentrações de

500 e 1000 mg L⁻¹, respectivamente.

O fato do tratamento de maior concentração apresentar maior eficiência de retenção de sólidos pode estar relacionado com a influência relativa dos sólidos com diâmetro menor que 50 µm. Estes sólidos não são retidos pelo filtro uma vez que apresentam diâmetro menor que a malha da tela, então, a eficiência de retenção de sólidos totais é reduzida quando comparada com a concentração de 1000 mg L⁻¹. A concentração média de sólidos com diâmetro menor que 50 µm foi de 222 mg L⁻¹, o que representa 22,2% da concentração de 1000 mg L⁻¹ e 44,4% da concentração de 500 mg L⁻¹.

Tabela 13 – Quadro de análise de variância da eficiência de retenção de sólidos totais

F.V.	G.L.	SQ	QM	F	P (F>Fc, %)
TRAT	7	0,052436	0,007491	4,197578	0,832086
С	1	0,026243	0,026243	14,705238	0,146160
Т	1	0,007541	0,007541	4,225492	5,651985
Н	1	0,008162	0,008162	4,573822	4,823368
CxT	1	0,002582	0,002582	1,446864	24,652996
СхН	1	0,001555	0,001555	0,871418	36,443777
ΤxΗ	1	0,000439	0,000439	0,246109	62,657391
$C \times T \times H$	1	0,005914	0,005914	3,314103	8,744379
RESÍDUO	16	0,028553	0,001785		
TOTAL	23	0,080989			

Por outro lado, quando se considerou a eficiência de retenção de sólidos com diâmetros maiores que 50 µm não se verificou nenhuma interação com diferença significativa a 1% (Tabela 14), tendo apresentado uma Ed>50 de 98,6±0,7%.O nível de significância do fator concentração foi de 94,39%, enquanto que, para a eficiência de retenção (Er) o nível de significância da concentração foi de 0,15%, provando que o aumento da Er com a concentração de sólidos foi influenciada pela concentração de sólidos com diâmetro inferior a 50 µm.

O volume médio de água despendido durante as limpezas em cada ensaio de desempenho foi de 5,39 L por limpeza. Este valor representou um volume de água de limpeza por volume de água filtrada de 8,0 e 12,6 L m⁻³, para as concentrações de 500 e 1000 mg L⁻¹, respectivamente. Isto acontece porque para água com menor concentração de sólidos (500 mg L⁻¹), a evolução da perda de carga se dá de forma mais lenta e consequentemente, o número de retrolavagens por volume de água

filtrada é menor. Segundo Ribeiro et al. (2004b) e Ribeiro et al. (2005b) as variações da qualidade da água de irrigação influenciam a evolução da perda de carga dos sistemas de filtragem, interferindo nos intervalos das retrolavagens, dependendo do tipo de elemento filtrante.

Tabela 14 – Quadro de análise de variância da eficiência de retenção de sólidos com diâmetro maior

F.V.	G.L.	SQ	QM	F	P (F>Fc, %)
TRAT	7	0,0004758	0,0000680	1,37963	27,93832
С	1	0,0000003	0,0000003	0,00510	94,39399
Т	1	0,0000033	0,0000033	0,06641	79,99185
Н	1	0,0002716	0,0002716	5,51344	3,20578
CxT	1	0,0000039	0,0000039	0,07860	78,27963
СхН	1	0,0000907	0,0000907	1,84094	19,36764
ΤxΗ	1	0,0000794	0,0000794	1,61125	22,24704
$C \times T \times H$	1	0,0000267	0,0000267	0,54168	47,23921
RESÍDUO	16	0,0007882	0,0000493		
TOTAL	23	0,0012640			

Entretanto, apesar do menor nível de concentração ser metade do maior nível, o volume médio de água por limpeza não tem a mesma relação, sendo que a menor concentração representou 63,5% da maior concentração. Isto acontece porque para as concentrações menores, a quantidade de areia necessária para provocar um determinado aumento de perda de carga é menor (ZEIER; HILLS, 1987), então o volume filtrado até a perda de carga atingir o valor crítico não segue uma relação linear com a concentração, sendo que o volume por limpeza é, em média, o mesmo.

4.7 Eficiência da retrolavagem e da inversão de fluxo na limpeza dos filtros (retomada da perda de carga inicial)

Na Figura 35 está apresentado o perfil de perda de carga em função do tempo de filtragem com o sistema de filtragem funcionando com inversão de fluxo (tempo de inversão de 15 s), para variação de perda de carga crítica de 35% e água com concentração de sólidos de 1000 mg L⁻¹. Por meio deste gráfico é possível analisar a eficácia de retrolavagem na retomada da perda de carga, logo após uma limpeza. Isto pode ser constatado tanto por meio do tempo entre as retrolavagens quanto pela perda de carga depois de uma retrolavagem. Fica evidente que o tempo entre

retrolavagens diminui à medida que o tempo de ensaio aumenta, evidenciando-se que as limpezas não foram totalmente eficazes. Além disso, pode-se perceber que logo após a primeira retrolavagem a perda de carga não retomou o seu valor inicial, ficando aproximadamente 15% superior, com uma tendência de aumento para as retrolavagens seguintes, como pode ser claramente percebido pela linha tracejada. Segundo Frizzone et al. (2012) o filtro ideal é aquele em que a perda de carga inicial é retomada após um retrolavagem. Segundo os mesmos autores, o excesso de perda de carga após uma retrolavagem pode ser causado por partículas presas na tela ou disco que precisam ser removidas manualmente. Entretanto, se o diferencial de pressão é constantemente muito pequeno, então pode ser que o elemento filtrante esteja com defeito.

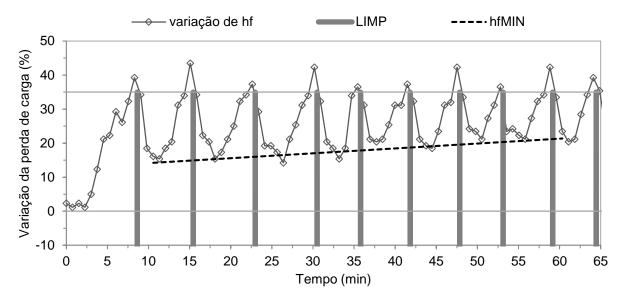


Figura 35 – Perfil do incremento da perda de carga em função do número de retrolavagens do sistema de filtragem com inversão de fluxo. LIMP: limpeza; hfMIN: perda de carga mínima depois de ser realizada uma retrolavagem

Caso essa tendência de aumento da perda de carga se mantenha para tempos de filtragem maiores, tem-se que em 2,6 horas o incremento da perda de carga logo após uma limpeza seria de 35%, saturando o controle, ou seja, as limpezas não surtiriam efeito sobre a perda de carga nos filtros.

Possivelmente esta ineficácia está associada às partículas sólidas que estavam presas na tela dos filtros e, que não eram retiradas nem na inversão de fluxo nem nas limpezas, uma vez que no final dos testes não se percebia partículas sólidas no interior dos filtros. A magnitude com que isso ocorre depende do diâmetro das partículas, sendo partículas menores obstruem os poros da tela com maior facilidade que as

partículas maiores (ZEIER; HILLS, 1987).Quando as telas eram limpas mecanicamente por meio de uma escova, a perda de carga era retomada ao valor inicial, o que indica que as limpezas automáticas não estavam sendo efetivas na retirada das partículas presas na tela. Sendo assim, o sistema proposto funcionará com restrições, necessitando manutenções quando o sistema de controle saturar. É claro que quando a concentração de sólidos for muito severa, como foi o caso analisado neste trabalho estas manutenções terão que ser mais frequentes, o que pode inviabilizar o seu uso. Segundo Pitts, Haman e Smajstrla (2007), a quantidade de sólidos suspensos na água de irrigação podem atingir valores de concentração superiores a 1000 mg L-1, valor este adotado como um dos níveis de concentração usados na avaliação de desempenho do sistema proposto.

A evolução da perda de carga foi afetada pelas inversões de fluxo nos filtros. Isto fica evidente quando se compara o perfil de evolução da perda de carga do sistema de filtragem funcionando com inversão de fluxo (Figura 35) com o mesmo sistema sem inversão de fluxo (Figura 36). Em ambos os perfis o número de retrolavagens foi igual (10 retrolavagens), porém, o tempo de filtragem foi de 35 e 65 minutos, para o sistema sem e com inversão de fluxo, respectivamente, sendo que as condições de ensaio foram as mesmas.

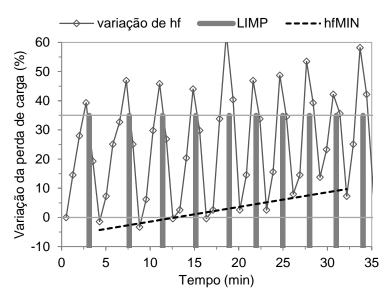


Figura 36 – Perfil de perda de carga em função do número de retrolagem do sistema de filtragem sem inversão de fluxo. LIMP: limpeza; hfMIN: perda de carga mínima depois de ser realizada uma retrolavagem

Outra questão que se torna evidente entre as formas de controle é a retomada da perda de carga logo após uma retrolavagem. Pode-se observar na Figura 36 que

até a quarta limpeza a perda de carga retornou ao valor inicial (tempo aproximado de 15 minutos), enquanto que com a inversão de fluxo já na primeira retrolavagem a perda de carga ficou 15% superior. Entretanto, percebe-se uma tendência de aumento com o tempo como está destacado pela linha tracejada, sendo que a taxa de aumento foi superior a apresentada pelo sistema com inversão de fluxo, de tal forma que a saturação do sistema ocorreria em um tempo inferior (aproximadamente 1,4 horas), caso a taxa de aumento se mantivesse constante.

Quando o sistema não foi submetido à inversão de fluxo, verificou-se a evolução mais rápida da perda de carga e também que esta retornou ao valor inicial nas primeiras retrolavagens, sendo esta provavelmente explicada pela baixa quantidade de sólidos retida na tela durante as primeiras retrolavagens. Depois de um tempo de funcionamento, as partículas que ficam presas na tela dos filtros começam a provocar o aumento da perda de carga em uma taxa maior que aquela para o sistema funcionando com reversão de fluxo. Supõe-se que a inversão de fluxo contribui para a retirada de algumas dessas partículas. Esta hipótese precisa ser investigada com maior critério em pesquisas futuras, para que se possa melhorar a eficácia da limpeza dos filtros.

4.8 Simulação da variação de vazão em função do incremento da perda de carga do sistema de filtragem

A maioria das recomendações relativas à identificação do momento adequado para realização da limpeza dos filtros está relacionada com uma perda de carga limite, normalmente de 6 mca (BERNARDO et al., 2006; PIZARRO CABELLO, 1996; LÓPEZ et al., 1997), independentemente da vazão. Entretanto, um aspecto importante a se considerar é a influência do aumento da perda de carga na vazão do sistema de irrigação, ou seja, é necessário estabelecer um limite de perda de carga de tal modo a não comprometer a desempenho do sistema de filtragem e outro relativo à variação de vazão aceitável, sendo utilizado aquele mais restritivo.

A influência da perda de carga nos filtros sobre a vazão de um sistema de irrigação pode ser visualizada nas Figuras 37 a 40. Sendo considerando duas situações: altura manométrica total constante, quando se dispõe de controladores como inversor de freqüência (Figuras 37 e 38); e altura manométrica total variável (Figuras 39 e 40).

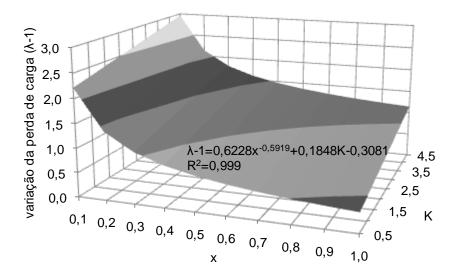


Figura 37 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do expoente de vazão (x) e das características do sistema de irrigação (K) para altura manométrica total constante e vazão inicial de 2 m³ h-1

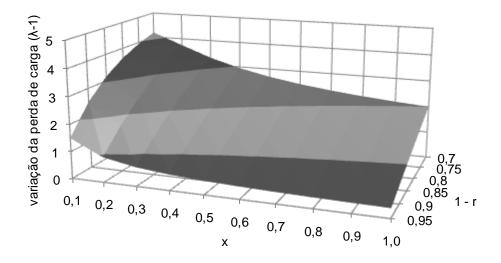


Figura 38 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do expoente de vazão (x) e da variação de vazão (1 - r) para altura manométrica total constante e vazão inicial de 2 m³ h-1

Estes gráficos foram construídos considerando-se a curva de perda de carga em função da vazão do sistema de filtragem desenvolvido neste trabalho, simulando-se diferentes emissores, perda de carga na linha principal (K) e redução da vazão (1 – r). Apesar de ser uma situação hipotética e específica para o sistema de filtragem desenvolvido, tem-se que a restrição de variação de vazão pode ser mais restritiva do que a perda de carga, que considera apenas o desempenho de retenção de partículas. Como a perda de carga para a vazão de 2 m3 h-1 foi de 3 mca, tem-se que o critério

de variação de vazão torna-se mais restritivo que o de perda de carga para valores λ 1 inferiores a 1, pois para λ -1 igual ou superior a 1 a perda de carga admissível se
torna igual a 6 mca, que é o critério de perda de carga.

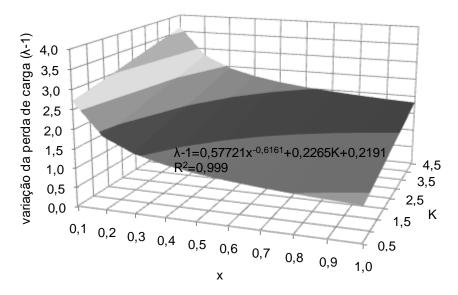


Figura 39 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do expoente de vazão (x) e das características do sistema de irrigação (K) para altura manométrica total variável e vazão inicial de 2 m³ h-1

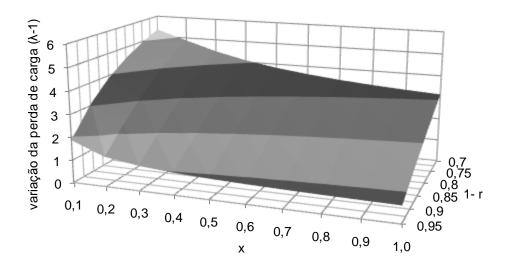


Figura 40 – Superfície da variação da perda de carga admissível (λ-1) em função do expoente de vazão (x) e da variação de vazão (1 - r) para altura manométrica total variável e vazão inicial de 2 m³ h-1

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, podem-se chegar às seguintes conclusões:

- a. O sistema de filtragem apresentou boa eficiência na retenção de partículas, seja em relação à eficiência de retenção total, seja em relação a eficiência de retenção de partículas maiores que 50 μm;
- b. A inversão de fluxo com alta frequência influenciou na evolução da perda de carga do sistema de filtragem, tornando-a mais lenta que a evolução para o sistema funcionando sem inversão de fluxo:
- c. A lógica de limpeza dos filtros por pulsos proporcionou volume mínimo de água de limpeza, além de apresentar bom desempenho hidráulico;
- d. As limpezas do sistema de filtragem não foram totalmente eficazes na retomada da perda de carga, com tendência de aumento com o tempo; e,
- e. O sistema de filtragem desenvolvido apresenta potencial para filtragem de água de irrigação com baixa qualidade, porém necessita de manutenções periódicas para limpeza manual do elemento filtrante.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para pesquisa futuras, sugere-se que outros tipos de partículas sejam testadas, sejam inorgânicas ou orgânicas. Uma aplicação interessante para avaliar o potencial do sistema de filtragem é o tratamento de água residuária.

A concentração de partículas sólidas com base em massa por volume de água não representa adequadamente a carga de sólidos, uma vez que, para uma mesma concentração e mesma distribuição de partículas, as partículas de baixa massa específica representam uma carga muito superior às partículas de alta massa específica e provavelmente contribuirão de forma mais agressiva para a evolução da perda de carga nos filtros.

A definição da perda de carga admissível, na qual a limpeza dos filtros será executada, deve levar em consideração tanto o critério de perda de carga máxima quanto o critério de variação de vazão do sistema de irrigação. Recomenda-se adotar o valor de perda de carga mais restritivo entre esses dois critérios.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, J.S. La obstrucción de los emisores de goteo. Sus causas y medidas preventivas. **Revista Riegos y Drenajes**, Barcelona, v. 12, p. 23-32, 1987.

ADIN, A.; ALON, G. Mechanisms and process parameters of filter screens. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Jerusalem, v. 112, n. 4, p. 293-304, 1986.

ADIN, A.; ELIMELECH, M. Particle filtration for wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Jerusalem, v. 115, n. 3, p. 474-487, 1989.

AIROLDI, R.P.S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. 2007. 139p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ALMEIDA, O.A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 227p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASAE S 539**. Media filters for irrigation - Testing and performance. Joseph, 2008. 7p.

AMIAD. Disponível em:

http://www.amiad.com/files/Plastic_Product%20Page_NP.00942_EN_11-2011.pdf. Acesso em: 19 abril 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6291**: **2006**. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. São Paulo, 2006. 17p.

AYERS, J.E.; BUCKS, D.A.; LAMN, F.R.; NAKAYAMA.; F.S. Introduction. In: LAMN, F.R.; AYARS, J.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**: Design, Operation, and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2007. Chap. 1, p. 1-26.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1999.153p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29, revisado 1).

BARBOSA, E.A.; VIEIRA, L.G.M.; ALMEIDA, C.A.K.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Differences of behavior between filtering hydrocyclones with Bradley and Rietma geometries. **Materials Science Forum**, Switzeland, v. 416, p. 317-322, 2003.

BATISTA, R.O.; SOARES, A.A.; OKANO, W.Y.; MATOS, A.T.; MANTOVANI, E.C. Avaliação do potencial de entupimento de filtro de discos por esgoto sanitário tratado. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14., 2004, Porto Alegre. **Anais** ... Porto Alegre, 2004. p. 1-6.

BATISTA, R.O.; SOUZA, J.A.R.; FERREIRA, D.C. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.1, p. 18-22, 2010.

BERMAD. Disponível em:

http://www.bermad.com/Data/Uploads/PC2AE11%20IR%20200%20Series%20Catgalogue%20ENG%20FINAL.pdf. Acesso em: 19 abril 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**, Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986, Chap. 3, p. 216-240.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Managemment**, Amsterdam, v. 68, p. 135-149, 2004.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973. v. 1, 242p.

CRUZ, O.C.; ZANINI, J.R. Eficiência de um hidrociclone de geometria "rietema" para pré-filtragem de água para irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.4, p.637-645, 2010.

DIAS, N.S.; OLIVEIRA, M.V.A.M.; COELHO, R.D. Resistência de diferentes tipos de tubos gotejadores ao entupimento por precipitação química de cálcio. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 115-125, 2004.

DUTTA, D.P. Characterization of drip emitters and computing distribution uniformity in a drip irrigation system at low pressure under uniform land slopes. 2008. 109p. Thesis (Master of Science – Biological and Agricultural Engineering) –Texas A&M University, College Station, 2008.

FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; FARIA, M.A. **Microirrigação**: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012. 356p.

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Emitter clogging. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986, chap. 3, p. 142-163.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing:** Soil classification and compaction tests. London: ELE international, 1984. v. 1, 339p.

HUBEL. Disponível

em:http://www.hubel.pt/catalogo/detalhes_produto.php?id=202&empresa=23>. Acesso em: 19 abril 2013.

- JAMES, L.G.; SHANNON, W.M. Flow measurement and system maintenance. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. chap. 3, p. 280-316.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.
- LÓPEZ, J.R.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F. **Riego localizado**. Madrid: Iryda, 1997. 405p.
- MARQUES JÚNIOR, S. Índice indicador da eficiência de filtragem eletrostática da água para irrigação. 1998. 103p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1998.
- MEDINA SAN JUAN, J.A. **Riego por goteo**: Teoría y prática. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2000. 302p.
- MENDONÇA, F. C. **Modelo descritivo da operação de conjuntos injetor-bomba centrífuga utilizados em poços**. 1999. 101 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- MORAIS, E.R.C.; MAIA, C.E.; OLIVEIRA, M. Qualidade da água para irrigação em amostras analíticas do banco de dados do departamento de solos e geologia da Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró-RN. **Caatinga**, Mossoró, v.11, p. 75-83, 1998.
- NAKAYAMA, F.S. Water treatment. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**: design, operation and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. chap. 3, p. 164-187.
- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 4, p. 77-80, 1981.
- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation science**, New York, v. 12, 187-192, 1991.
- NAKAYAMA, F.S.; BOMAN, B.J.; PITTS, D.J. Maintenance. In: LAMN, F.R.; AYARS, J.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**: Design, Operation, and management. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2007. chap. 11, p. 389-430.
- NUNES, W.A.G. A.; KER, J.C.; NEVES, C.L.; RUIZ, H.A.; FREITAS, G. A.; BEIRIGO, R.M. Qualidade da água de irrigação de poços tubulares e do Rio Gorutuba na região de Janaúba-MG. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 4, p. 403-410, 2005.
- OLIVEIRA, C.F. Filtração de água com diferentes concentrações de argila e silte em filtros de discos para irrigação localizada. 2010. 147p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz",

- Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- OLIVEIRA, C.F. **Perda de carga em filtros de tela e disco utilizados na irrigação localizada.** 2005. 57p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- OLIVEIRA, M.; MAIA, C.E. Qualidade físico-química da água para irrigação em diferentes aqüíferos na área sedimentar do estado do rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 2, p.17-21, 1998.
- PATERNIANI, J.E.S.; MATSURA, E.E.; ROSTON, D.M.; PAULA Jr., D.R.; TESTEZLAF, R.; RIBEIRO, T.A.P. Diagnóstico da qualidade da água de irrigação em propriedades produtoras de hortaliças da região de Campinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994. Campinas. **Anais**... Campinas: SBEA, 1994. p.20.
- PEREIRA, P.A.; FEITOSA FILHO, J.C.; ARAÚJO, M.S.M. Aeração artificial no tratamento de ferro e de manganês dissolvido em água de irrigação. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2005.
- PERES, J.G. **Hidráulica agrícola**. Araras: Universidade Federal de São Carlos, 2008. 377p.
- PHILLIPS, K.P. Long-term operation of microirrigation filtration systems: successes, failures and operational solutions. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 15., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 579-585.
- PINTO, C.S. **Curso Básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 355p.
- PITTS, D.J.; HAMAN, D.Z.; SMAJSTRLA, A.G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems.** Florida: University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, 2003. 12p. (Bulletin, 258).
- PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia.** Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 511p.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of clogging in drip irrigation with stored reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 13, p. 129-139, 1992.
- RESENDE, R.S.; COELHO, R.D.; PIEDADE, S.M.S. Eficiência da cloração da água de irrigação no tratamento de gotejadores com entupimento de causa biológica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 382-389, 2000.
- RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada.

- Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 1-6, 2005b.
- RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v.9, n.4, p.450-456, 2005a.
- RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P.S.; SILVA, M.J M. Performance of non woven synthetic Fabric and disc filters for fertirrigation water treatment. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 2, p. 127-133, 2004a.
- RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P.S.; SILVA, M.J.M. Water quality and head loss in irrigation filters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 563-572, 2004b.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 297-300, 2005.
- SCATOLINI, M.E.; PATERNIANI, J.E.S. Remoção de sólidos suspensos na água de irrigação utilizando mantas sintéticas não tecidas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p.382-385, 2001.
- SILVA, L.G.F.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. Irrigação localizada. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: SBEA, 2003. v. 2, cap. 12, p. 259-309. (Série Engenharia Agrícola)
- 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.
- SOCCOL, O.J. Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem de água para irrigação. 2003. 89p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- SOCCOL, O.J.; BOTREL, T.A.; GERVÁSIO, E.S.; ULLMANN, M.N. Avaliação de um hidrociclone de "Rietema" para remoção de areia da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 464-468, 2005.
- SOUZA, F. J.; VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Analysis of the influence of the filtering medium on the behavior of the filtering hydrocyclones. **Power Technology**, Lausanne, v. 107, n. 3, p. 259-267, 2000.
- SOUZA, W.J. **Escoamento em regime turbulento aplicado à Irrigação localizada com microtubos**. 2008. 139p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 604-613, 2008.

TESTEZLAF, R.; RAMOS, J.P.S. Sistema automatizado para determinação de perda de carga em filtros de tela e disco usados na irrigação localizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 8, p. 1079-1088, 1995.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Tradução de GHEYI, H.R.; DAMASCENO, F.A.V.; SILVA Jr., L.G.A.; MEDEIROS, J.F.; Campina Grande: UFPB, 1997.184p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).

VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. **Chemical Engineering and Processing**, Amsterdam, v. 49, p. 460-467, 2010.

ZEIER, K.R.; HILLS, D.J. Trickle irrigation screen filter performance as affected by sand size and concentration. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v. 30, n. 3, p. 735-739, 1987.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Eficiência de retenção de sólidos totais, considerando os fatores contração de sólidos, tempo de reversão de fluxo e incremento da perda de carga

		Incremento da — perda de carga (%) —	Repetição			
Concentração (mg L ⁻¹)	Tempo (s)		R1	R2	R3	
(9 =)			Eficiência de retenção (g g-1)			
500	15	25	0,6748	0,7568	0,6908	
500	15	50	0,7700	0,7768	0,8031	
500	30	25	0,6592	0,6567	0,7065	
500	30	50	0,7308	0,7072	0,6749	
1000	15	25	0,8808	0,8065	0,7139	
1000	15	50	0,7965	0,7384	0,8087	
1000	30	25	0,7530	0,7532	0,7309	
1000	30	50	0,8542	0,7675	0,7976	

APÊNDICE B – Eficiência de retenção de sólidos com diâmetro maior que 50 μm, considerando os fatores contração de sólidos, tempo de reversão de fluxo e incremento da perda de carga

			Repetição			
Concentração (mg L ⁻¹)	Tempo (s)	Incremento da — perda de carga (%) —	R1			
(9 =)			Eficiência de retenção (g g ⁻¹)			
500	15	25	0,9901	0,9940	0,9805	
500	15	50	0,9885	0,9837	0,9837	
500	30	25	0,9786	0,9831	0,9810	
500	30	50	0,9833	0,9895	0,9841	
1000	15	25	0,9880	0,9753	0,9803	
1000	15	50	0,9890	0,9880	0,9939	
1000	30	25	0,9651	0,9829	0,9912	
1000	30	50	0,9902	0,9935	0,9918	