

DESEMPENHO DE FILTROS DE TELA AUTO-LIMPANTES PARA PREVENÇÃO DA OBSTRUÇÃO DE GOTEJADORES DE IRRIGAÇÃO

Doutorando/beneficiário: Nicolás Duarte Cano

Pesquisador responsável: Antonio Pires de Camargo

RESUMO: Sistemas de filtragem devem ser selecionados, dimensionados e operados buscando assegurar o controle efetivo da qualidade da água de irrigação a fim de prevenir problemas de obstrução de emissores, manter a uniformidade de aplicação e evitar aumento nos custos operacionais do sistema de irrigação. Este projeto propõe avaliar características operacionais e de desempenho de filtros de tela com mecanismo auto-limpante para uso em irrigação localizada, e também, estabelecer recomendações práticas do tipo de elemento filtrante apropriado para os modelos de gotejadores que serão avaliados ao longo da pesquisa. O sistema de filtragem que será utilizado como objeto de estudo é uma tecnologia nacional desenvolvida e fabricada pela empresa Iavant, que apresenta características construtivas e operacionais distintas de outros materiais existentes no mercado. Não há informações de caráter científico sobre características operacionais e de desempenho de tais sistemas de filtragem quando utilizados para a prevenção de problemas de obstrução em sistemas de irrigação localizada. Critérios para seleção do elemento filtrante, limites operacionais e informações sobre desempenho são pouco conhecidos ou bastante empíricos e subjetivos. O projeto envolve o estudo de 5 modelos de elemento filtrante e conta com as 3 seguintes etapas: (1) ensaios em laboratório para determinação de características hidráulicas operacionais dos elementos filtrantes em condições controladas; (2) ensaios em laboratório para quantificar a eficiência de remoção de partículas inorgânicas e orgânicas e para determinar a eficácia do mecanismo auto-limpante do filtro para cada um dos elementos filtrantes; (3) experimentos em campo experimental para investigação do desempenho de elementos filtrantes na prevenção de problemas de obstrução de gotejadores. De modo amplo, o projeto proposto visa contribuir para o estabelecimento de recomendações de seleção, dimensionamento e operação de sistemas de filtragem, assim como para a prevenção de problemas de obstrução de emissores, e consequente aumento da vida útil de sistemas de irrigação localizada.

ABSTRACT: Filtration systems should be selected, sized and operated to ensure effective control of irrigation water quality in order to prevent emitters' clogging, maintain uniformity of application and avoid an increase in the operating costs of the irrigation system. This project proposes to evaluate operational and performance characteristics of screen filters equipped with a self-cleaning mechanism for use in microirrigation, as well as to establish practical recommendations of the type of filter element appropriate to the models of drippers that will be evaluated during the research. The filtration system that will be used as a study object is a national technology developed and manufactured by the company Iavant, which presents constructive and operational characteristics distinct from other materials in the market. There is no scientific information on the operational and performance characteristics of such filtering systems when used for the prevention of obstruction problems in microirrigation systems. Criteria for filter element selection, operational limits, and performance information are not well defined or quite empirical and subjective. The project involves the study of 5 filter element models and has the following 3 steps: (1) laboratory tests to determine the hydraulic characteristics of the filter elements under controlled conditions; (2) laboratory tests to quantify the removal efficiency of inorganic and organic particles and to determine the effectiveness of the self-cleaning filter mechanism for each of the filter elements; (3) Experimental field experiments to investigate the performance of filter elements in the prevention of drippers' obstruction problems. Broadly speaking, the proposed project aims to contribute to the establishment of recommendations for the selection, design, and operation of filtration systems, as well as for the prevention of emitter obstruction problems, and consequently, for the increase in the lifespan of microirrigation systems.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação da proposta

Esta proposta contempla e estende objetivos de pesquisa estabelecidos no projeto FAPESP 2018/20099-5 (aprovado, com vigência de 01/04/19 a 31/03/21). O projeto FAPESP aborda estudos para a compreensão de processos de obstrução de emissores devido as interações entre precipitados de carbonato de cálcio e partículas sólidas de pequena granulometria que, normalmente, não são retidas por sistemas de filtragem empregados em microirrigação. O referido projeto abrange um conjunto de pesquisas em laboratório e em campo, envolvendo alunos de iniciação científica e de pós-graduação.

Em sua essência, o projeto apresentado na sequência visa obter resultados que contribuam para o estabelecimento de recomendações de filtragem, redução de problemas de obstrução de emissores, e consequente aumento da vida útil de sistemas de irrigação localizada. Este projeto propõe avaliar características operacionais e de desempenho de filtros de tela com mecanismo auto-limpante para uso em irrigação localizada, e também, estabelecer recomendações práticas do tipo de elemento filtrante apropriado para cada modelo de gotejador que será avaliado ao longo da pesquisa. No âmbito do Projeto FAPESP 2018/20099-5, os resultados envolvendo elementos filtrantes e gotejadores também devem contribuir para verificar o quanto as metodologias de ensaio de obstrução de gotejadores utilizadas em laboratório (ISO/DTR 21540) são capazes de produzir resultados de desempenho que representam condições adversas de campo.

O sistema de filtragem que será utilizado como objeto de estudo é uma tecnologia nacional desenvolvida e fabricada pela empresa Iavant Equipamentos Industriais e Agrícolas Ltda., a qual declarou interesse na pesquisa proposta e já forneceu ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação da FEAGRI uma unidade do sistema de filtragem e 5 modelos de elemento filtrante. O sistema de filtragem da empresa Iavant apresenta características construtivas e operacionais distintas de outros materiais existentes no mercado. Não há informações de caráter científico sobre o desempenho de tais sistemas de filtragem quando utilizados para a prevenção de problemas de obstrução em sistemas de irrigação localizada. Do mesmo modo, características operacionais, limites de operação, informações sobre desempenho de filtragem e auto-limpeza, e critérios para seleção do elemento filtrante são pouco conhecidos ou bastante empíricos e subjetivos.

Por fim, esta proposta dá prosseguimento a estudos anteriores sobre processos de filtragem desenvolvidos na FEAGRI através do Projeto FAPESP 11/21380-0.

1.2 Enunciado do problema

A qualidade da água é um aspecto crítico em sistemas de irrigação localizada pois contaminantes físicos, químicos e/ou biológicos podem provocar a obstrução de emissores e filtros, resultando em redução na uniformidade e eficiência do sistema de irrigação. Estima-se que a obstrução total de 5 a 10% dos emissores em uma sub-unidade de irrigação proporciona coeficientes de variação de vazão de 23% a 33%, reduzindo o Coeficiente de Uniformidade Estatística para valores inaceitáveis inferiores a 75% (Frizzone et al., 2012).

Problemas causados por partículas sólidas são considerados o modo mais comum de obstrução em emissores (Adin e Alon, 1986; Nakayama e Bucks, 1991; Taylor et al., 1995; Lavanholi et al., 2018; Li et al., 2019) e por esse motivo a filtragem apropriada é crucial para prevenir tais problemas. Idealmente, todos os sólidos suspensos deveriam ser removidos pelo sistema de filtragem, porém, devido a limitações práticas e econômicas, apenas as partículas maiores são removidas e, conseqüentemente, quantidades significativas de sedimentos podem ser encontradas nas linhas laterais de irrigação (Puig-Bargués e Lamm, 2013; Li et al., 2015, 2019; Oliveira et al., 2017). De modo geral, problemas de obstrução estão associados a filtragem insuficiente, tratamento químico inadequado da água ou limpeza pouco frequente ou inapropriada das linhas de irrigação (Lamm et al., 2006).

A seleção, dimensionamento e manutenção de sistemas de filtragem devem ser apropriados para assegurar o controle efetivo da qualidade da água de irrigação, buscando prevenir problemas de obstrução, manter a uniformidade de aplicação e evitar aumento nos custos operacionais do sistema de irrigação (Testezlaf, 2008). A seleção e dimensionamento de filtros é função da qualidade da água, das características do filtro, das características operacionais e desempenho de filtragem requerido pela aplicação na qual o sistema de filtragem será empregado. Embora a literatura apresente informações para suporte à seleção e dimensionamento de filtros, há divergência nos critérios e informações (Testezlaf, 2008), sendo que em alguns casos não há critérios suficientemente claros e objetivos.

Os principais filtros utilizados em irrigação são os de areia, de tela e de discos. Filtros de meio filtrante (*media filters*), comumente chamados de filtros de areia, são caracterizados por camadas sobrepostas de material através do qual há o escoamento da água e a conseqüente retenção de sólidos. Filtros de tela (*strainer-type filters*) são dispositivos contendo um ou mais elementos filtrantes caracterizados por chapas

perfuradas, telas, malhas ou pela combinação desses, que são usados para reter materiais sólidos suspensos na água, com granulometria superior a especificação do elemento filtrante (ISO9912-1, 2004). Filtros de disco (*disc filters*) contêm um elemento filtrante composto por discos ranhurados sobrepostos, que formam um espaço poroso entre discos adjacentes responsável por propiciar a retenção de contaminantes (ISO9912-1, 2004). Em águas contendo concentrações elevadas de sólidos suspensos, há ainda tanques de sedimentação e filtros hidrociclones, que apresentam eficiência de filtração elevada para remoção de partículas maiores que 40 µm e 74 µm, respectivamente (Goyal et al., 2016). A pré-filtração da água utilizando filtros hidrociclones pode reduzir custos do sistema de filtração (Soccol e Botrel, 2004) e é recomendada quando a concentração de sólidos suspensos for superior a 100 mg L⁻¹ (Pinto et al., 2016). Além disso, elementos filtrantes de manta sintética não tecida também são uma alternativa para sistemas de filtração (Ribeiro et al., 2004, 2008). Em sistemas de irrigação localizada, é típico o emprego de duas etapas de filtração caracterizadas por filtros de areia seguidos por filtros de discos ou tela, sendo que a segunda etapa de filtração tem como objetivo reter partículas pequenas que eventualmente atravessam os filtros de areia durante o processo de filtração ou retrolavagem (Goyal et al., 2016).

Em condições nas quais é necessária elevada eficiência de filtração e a água apresenta concentrações elevadas de sólidos, determinados químicos, material orgânico, algas e/ou intensa atividade biológica, a obstrução dos filtros pode constituir um problema e demandar número excessivo de rotinas de limpeza (ISO9912-1, 2004). Filtros de tela e de discos costumam ser eficientes na retenção de partículas sólidas de pequenos diâmetros, todavia podem demandar rotinas de limpeza demasiadamente frequentes e/ou apresentar baixa eficiência de filtração quando submetidos a operação com águas contendo material orgânico e/ou algas (Zeier e Hills, 1987; Adin e Elimelech, 1989; Tajrishy et al., 1994; Puig-Bargués et al., 2005; Duran-Ros et al., 2009a; Pinto et al., 2016). Já os filtros de areia destacam-se pela capacidade de retenção de algas e outros materiais orgânicos, mas também são efetivos na retenção de sólidos em suspensão, como areias finas e partículas de silte, podendo remover quantidades significativas de sólidos suspensos com diâmetros superiores a 20 µm (Testezlaf, 2008; Goyal et al., 2016). Contudo, a proliferação de bactérias e outros microrganismos no meio poroso de filtros de areia pode ser um problema (Pinto, 2013).

Qualquer que seja o tipo de filtro, a taxa de fluxo através do elemento ou meio filtrante deve ser limitada de modo a proporcionar adequada eficiência de retenção de

partículas. Em filtros de areia, a vazão influencia a eficiência de remoção de partículas, sendo que pode haver redução da eficiência sob vazões inferiores a um dado limite devido ao surgimento de canais preferenciais de escoamento através do meio filtrante, ou ainda sob vazões excessivas, que podem provocar turbulência suficiente para movimentação indesejada do meio filtrante (Testezlaf, 2008). Além disso, qualquer que seja o tipo de filtro, idealmente a perda de carga no filtro deve retomar o valor inicial a cada rotina de limpeza ou retrolavagem, sendo que este critério permite classificar a retrolavagem como eficaz ou ineficaz (Duran-Ros et al., 2009b; Pinto et al., 2016).

Embora a literatura aponte limitações de filtros de tela para operação em águas contendo material orgânico e/ou algas, pouco se sabe sobre a eficiência de filtragem e eficácia do mecanismo de auto-limpeza de sistemas de filtragem auto-limpantes que utilizam elemento filtrante de tela. O sistema de filtragem Iavant, objeto de estudo desta pesquisa, é equipado com um motor que rotaciona o elemento filtrante durante as operações de limpeza e, ao rotacionar o elemento, este é submetido ao atrito com escovas cuja função é desprender o material sólido acumulado na superfície exterior do elemento filtrante. Na mesma região de contato com as escovas, há cavidades através das quais a água escoava com alta velocidade, succionando os sólidos a serem removidos do elemento filtrante e eliminando-os do sistema de filtragem. Além disso, há a possibilidade de escolha do tipo de elemento filtrante, que pode variar quanto as dimensões da abertura da malha de filtragem e quanto ao tipo de material utilizado para a fabricação da malha. Tendo em vista o mecanismo de auto-limpeza e a possibilidade de combinar materiais na fabricação de elementos filtrantes, é possível que as limitações descritas na literatura não se apliquem ao sistema de filtragem a ser avaliado nesta pesquisa. A constatação de adequado desempenho do sistema de filtragem auto-limpante pode contribuir para a redução de custos de investimento em sistemas de filtragem para irrigação localizada e de problemas e consequentes custos de manutenção de tais sistemas de irrigação.

2 HIPÓTESES

As hipóteses enunciadas abaixo estão relacionadas ao estudo de elementos filtrantes fabricados em aço e em polipropileno, utilizados em filtros auto-limpantes para irrigação.

- (1) Em condições de campo, o uso de filtros auto-limpantes com elemento filtrante adequadamente selecionado pode dispensar a necessidade de outros tipos de

filtros e ser suficiente para prevenir a obstrução de gotejadores por partículas orgânicas e inorgânicas;

- (2) Para uma mesma abertura da malha de filtragem, supõe-se que exista diferença nas características operacionais e no desempenho de filtragem entre elementos filtrantes fabricados em aço e em polipropileno devido a aspectos geométricos, características construtivas desses materiais e diferenças nos processos de acúmulo e desprendimento de agentes de obstrução sobre a superfície filtrante. Desse modo, tanto a eficiência de remoção de partículas, quanto a eficácia do mecanismo de retrolavagem podem variar em função do material utilizado na fabricação do elemento filtrante;
- (3) A eficiência na remoção de partículas e a eficácia do mecanismo de auto-limpeza do filtro é influenciada pela qualidade da água a ser filtrada, supondo-se que águas contendo material orgânico e algas sejam mais críticas para o desempenho dos filtros e da auto-limpeza do que águas contendo apenas material inorgânico;
- (4) Com base nas premissas que nortearam a elaboração da norma ISO/DTR 21540 para a avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas, supõe-se que modelos de gotejadores com melhor desempenho em laboratório devem apresentar melhor desempenho em condições adversas de campo.

3 OBJETIVOS

Os objetivos enunciados abaixo estão relacionados ao estudo de elementos filtrantes fabricados em aço e em polipropileno, utilizados em filtros auto-limpantes para irrigação.

- (1) Em laboratório, avaliar características hidráulicas operacionais de elementos filtrantes operados com água limpa, determinando curvas de perda de carga em função da vazão e estabelecendo recomendações práticas de limites de vazão de operação para cada elemento filtrante;
- (2) Em laboratório, quantificar a eficiência de remoção de partículas inorgânicas e orgânicas de elementos filtrantes, conforme metodologia normatizada estabelecida pela norma ASAE S539, a fim de identificar a granulometria mínima que dado elemento filtrante é capaz de remover eficientemente e então estabelecer limites práticos de operação de cada elemento;
- (3) Em laboratório, determinar a eficácia do mecanismo auto-limpante do filtro operado com água contendo partículas sólidas inorgânicas e orgânicas,

investigando cada um dos elementos filtrantes em sucessivos ciclos de retrolavagem;

- (4) Em campo, determinar a eficiência de remoção de sólidos e a eficácia do mecanismo auto-limpante do filtro (i.e., desempenho do sistema de filtragem), a fim de constatar a aptidão dos ensaios laboratoriais em representar condições adversas de operação em campo e para validar resultados de desempenho operacional obtidos em laboratório;
- (5) Em campo, submeter um conjunto de modelos de tubo-gotejadores a operação com água superficial filtrada utilizando cada um dos elementos filtrantes, monitorando características operacionais do filtro e dos emissores, a fim de estabelecer recomendações práticas do elemento filtrante apropriado para cada modelo de emissor avaliado.
- (6) Confrontar resultados de desempenho de gotejadores obtidos em laboratório e em campo, a fim de investigar o quanto as metodologias de ensaio de obstrução de gotejadores utilizadas em laboratório (ISO/DTR 21540) são capazes de produzir resultados de desempenho que representam condições adversas de campo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos serão conduzidos no Laboratório de Hidráulica e Irrigação e no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP).

4.1 Características do filtro e dos elementos filtrantes

Para a condução dos experimentos será utilizado o filtro de tela (*strainer-type filter*) com mecanismo de auto-limpeza fabricado pela empresa brasileira Iavant Equipamentos Industriais e Agrícolas Ltda. (Figura 1). O corpo do filtro é fabricado em aço carbono, com revestimento interno e externo aplicado por processo eletrostático. O fabricante dispõe de diversos modelos de elementos filtrantes cuja seleção é função da qualidade da água e do tipo de aplicação, porém subjetiva e imprecisa devido à falta de informações operacionais e de desempenho dos elementos filtrantes. O elemento filtrante apresenta formato similar aos elementos de filtros de tela típicos de irrigação. Sob operação normal de filtragem, a água escoar da região externa em direção ao interior do elemento filtrante e, portanto, partículas gradativamente se acumulam na superfície externa do elemento. O sistema de auto-limpeza é movido por um motor de 0,5 CV acoplado a um conjunto redutor integrado ao filtro, que atua rotacionando o elemento filtrante. Ao rotacionar o elemento, este é submetido ao atrito com escovas cuja função é

desprender o material sólido acumulado na superfície exterior do elemento filtrante. Na mesma região de contato com as escovas, há cavidades através das quais a água escoar com alta velocidade, succionando os sólidos a serem removidos do elemento filtrante e descarregando-os através de uma seção de descarga. O mecanismo de auto-limpeza (ou retrolavagem) é acionado sempre que a pressão diferencial no elemento filtrante atinge um valor limite, que pode ser especificado pelo usuário ajustando-se um pressostato. Opcionalmente, o intervalo entre retrolavagens pode ser baseado em tempos pré-definidos pelo usuário. Por fim, o filtro dispõe de sistema eletrônico para configurar as especificações de auto-limpeza.



Figura 1 – Filtro de tela com mecanismo auto-limpante fabricado pela empresa Iavant

Serão conduzidos experimentos avaliando 5 modelos de elemento filtrante utilizados no filtro Iavant, cujas especificações informadas pelo fabricante são apresentadas na

Os valores de vazão nominal indicados na Tabela 1 representam valores típicos das aplicações em campo e serão adotados para a condução de alguns dos experimentos descritos na sequência.

Tabela 1. O laboratório dispõe de uma unidade do filtro e de uma unidade de cada um dos elementos filtrantes listados na Tabela 1, sendo que tais materiais foram fornecidos pela empresa Iavant para a execução da referida pesquisa.

Os valores de vazão nominal indicados na Tabela 1 representam valores típicos das aplicações em campo e serão adotados para a condução de alguns dos experimentos descritos na sequência.

Tabela 1 – Especificações técnicas do fabricante sobre os elementos filtrantes a serem avaliados

Modelo	Especificação	Pressão mínima (kPa)	Pressão máxima (kPa)	Vazão mínima (m ³ h ⁻¹)	Vazão máxima (m ³ h ⁻¹)	Vazão nominal (m ³ h ⁻¹)
1	Tela de aço inox 304 tecido REPS M-30 retenção 150 mesh ou 100 µm	35	120	10	100	80
2	Tela de aço inox 304 tecido REPS M-30 retenção 150 mesh ou 100 µm	35	120	10	80	60
3	Tela de polipropileno retenção de 120 mesh ou 125 µm	35	120	10	100	80
4	Tela de polipropileno retenção de 240 mesh ou 58 µm	35	120	10	50	40
5	Membrana de polipropileno retenção de 550 mesh ou 25 µm	35	120	10	40	25

4.2 Experimentos para determinação de características hidráulicas operacionais dos elementos filtrantes em condições controladas

Serão realizados ensaios em laboratório para quantificar a perda de carga em função da vazão através dos elementos filtrantes e então estabelecer recomendações práticas de limites de vazão de operação para cada elemento filtrante. A vazão máxima através de cada elemento filtrante poderá ser analisada por critérios de perda de carga admissível, taxa de filtragem e eficiência de remoção de partículas.

Os ensaios hidráulicos serão conduzidos conforme requisitos estabelecidos na norma ASAE S539 *Media Filters for Irrigation - Testing and Performance Reporting* (ASABE, 2017). A norma especifica critérios para a avaliação de filtros de meio filtrante, isto é, caracterizados por camadas sobrepostas de material através das quais há o escoamento da água. Contudo, algumas das metodologias descritas na norma são compatíveis e apropriadas para a avaliação do material de interesse nessa pesquisa. Optou-se por seguir essa norma em função da clareza e consistência técnica com que os requisitos de ensaios são descritos.

A pressão na entrada do filtro será mantida constante em 400 kPa, sendo determinados 7 pares de valores de perda de carga em função da vazão. Os valores de vazão devem variar entre 75% da vazão mínima até 125% da vazão máxima recomendada pelo fabricante (Tabela 1). Segundo informações do fabricante, a pressão de ensaio estabelecida é típica em projetos de sistema de irrigação localizada e representa grande parte das condições nas quais os filtros são empregados. Os ensaios serão conduzidos utilizando água potável na temperatura ambiente. Elementos filtrantes novos, se necessário, serão limpos antes da execução das rotinas de ensaio.

O esquema básico da estrutura de ensaios a ser utilizada nesses experimentos é apresentado na Figura 2. O laboratório dispõe de reservatório com capacidade para 25 m³ e motobomba equipada com inversor de frequência. O conjunto motobomba apresenta as seguintes especificações: bomba KSB Meganorm 125-080-315, com rotor de 312 mm de diâmetro e rotação nominal de 1760 RPM; a vazão máxima sob pressão de 400 kPa é de aproximadamente 170 m³ h⁻¹, segundo informações do fabricante; motor elétrico trifásico 220V com potência nominal de 25 CV. A água será conduzida para o filtro através de tubulação pressurizada pela motobomba. As seguintes variáveis serão monitoradas por transmissores/medidores ao longo dos ensaios: pressão na entrada do filtro, vazão, perda de carga no elemento filtrante e temperatura da água. A pressão na entrada do filtro, além de monitorada, será continuamente ajustada por controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). O controlador PID irá monitorar a pressão na entrada do filtro e atuar sobre o inversor de frequência, a fim de manter constante a pressão de ensaio desejada. A jusante do filtro será instalada uma válvula para ajuste manual das vazões de ensaio.

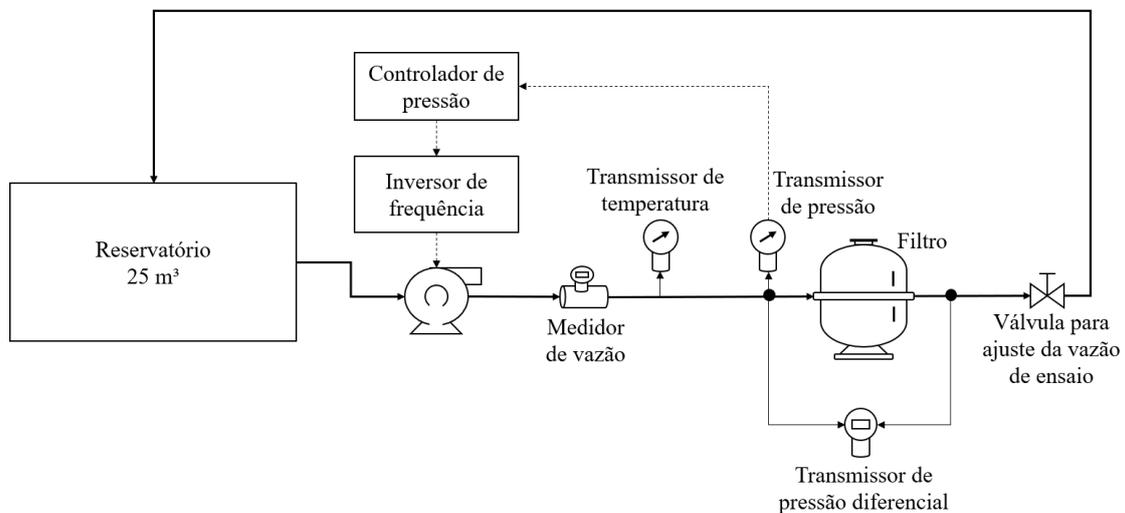


Figura 2 – Esquema da estrutura para ensaios de perda de carga utilizando água limpa

A aquisição de dados dos transmissores e medidores, assim como o controle da pressão de ensaios, serão realizados utilizando sistema eletrônico microcontrolado e aplicativo computacional já disponíveis no laboratório para aplicações diversas. Para cada vazão de ensaio, o sistema eletrônico coletará um conjunto de dados de todos os instrumentos de medição instalados na bancada de ensaios. Tais dados serão utilizados para cálculo de estatísticas indicadoras de tendência central e dispersão a fim de assegurar maior qualidade e confiabilidade aos resultados de ensaio.

As seguintes análises ou informações devem ser obtidas a partir dos experimentos utilizando água potável: (1) Curvas experimentais de perda de carga em função de vazão; (2) Regressão estatística para ajuste de funções para estimativa de perda de carga em função de vazão, para cada elemento filtrante; (3) Modelagem matemática para predição de perda de carga nos filtros avaliando Análise Dimensional/Teorema de Buckingham e algoritmos de Redes Neurais Artificiais; (4) Verificação e recomendações dos limites operacionais para uso dos filtros. Os modelos matemáticos generalizados devem ser úteis para estimativas de perda de carga em função das características geométricas dos elementos filtrantes e das condições operacionais. O uso de Análise Dimensional e de Redes Neurais Artificiais para investigações na hidráulica de sistemas de filtragem é mencionado na literatura (Yurdem et al., 2008, 2010; Duran-Ros et al., 2010; Puig-Bargués et al., 2012; Wu et al., 2014; Zong et al., 2015).

Os modelos matemáticos obtidos serão avaliados pelo erro quadrático médio (RMSE) e por análise gráfica do erro. O RMSE é comumente utilizado e representa a acurácia dos valores observados com os estimados pelos modelos matemáticos (Willmott et al., 2012; Ali e Abustan, 2014). A análise de erro por método gráfico também é útil para estimar erros de previsão ao avaliar a exatidão dos modelos porque fornece erros de previsão associados com a respectiva frequência de ocorrência (Vilaça et al., 2017). Se necessário, outras ferramentas estatísticas serão empregadas.

4.3 Experimentos para avaliação do desempenho do sistema de filtragem em condições controladas

Serão realizados ensaios em laboratório para quantificar a eficiência de remoção de partículas inorgânicas e orgânicas e para determinar a eficácia do mecanismo autolimpante do filtro equipado com os 5 modelos de elemento filtrante descritos na Tabela 1. Além disso, esses ensaios têm como propósito gerar informações que permitam: (1) identificar a granulometria mínima que dado elemento filtrante é capaz de reter para que se possa estabelecer limites práticos de operação de cada elemento filtrante; (2)

determinar se o mecanismo de auto-limpeza é eficaz para todos os elementos filtrantes e para as diferentes qualidades de água avaliadas.

Assim como justificado no item 4.2, esses ensaios serão conduzidos baseando-se em requisitos estabelecidos na norma ASAE S539 (ASABE, 2017). As normas ISO 9912-2 e ISO 9912-3 especificam ensaios mecânicos, de resistência a pressão hidrostática, de estanqueidade e outros ensaios hidráulicos utilizando apenas água limpa, aplicados a avaliação de filtros de tela, porém aspectos relacionados ao desempenho de filtragem não são parte do escopo (ISO9912-2, 2013; ISO9912-3, 2013), justificando-se a escolha da norma ASAE S539.

Os ensaios serão conduzidos em estrutura de ensaios ilustrada na Figura 3, sob pressão constante de 400 kPa na entrada do filtro e na vazão nominal declarada pelo fabricante para cada modelo de elemento filtrante (Tabela 1). A pressão na entrada do filtro será controlada continuamente por controlador PID. A vazão de ensaio será ajustada apenas no início de cada condição de ensaio por meio de uma válvula instalada a jusante do filtro sob avaliação. Ao longo do ensaio, a vazão poderá sofrer oscilações em função do grau de obstrução do elemento filtrante e de operações de retrolavagem. A jusante da válvula de ajuste da vazão será instalado sistema de filtragem secundário com capacidade para remover partículas que eventualmente atravessem o filtro sob avaliação, a fim de viabilizar a recirculação da água utilizada nos ensaios. Além disso, o laboratório dispõe de dois reservatórios independentes, um com capacidade para aproximadamente 25 m³ e o outro para 5 m³, sendo que, se necessário, um deles poderá ser utilizado para armazenamento de água limpa e outro para armazenamento de água a ser recuperada para reuso nos ensaios. Pretende-se operar os ensaios num circuito hidráulicamente fechado a fim de evitar o descarte de grandes volumes de água.

Conforme recomendações da norma ASAE S539, serão avaliadas duas concentrações de partículas: (a) 100 mg L⁻¹ de partículas inorgânicas + 5 mg L⁻¹ de material orgânico; (b) 300 mg L⁻¹ de partículas inorgânicas + 5 mg L⁻¹ de material orgânico. As partículas inorgânicas devem ser separadas por peneiras granulométricas a fim de que se obtenha a seguinte distribuição de tamanhos de partículas: (a) 60%±2% de partículas com granulometria de 0 a 200 µm; (b) 30%±2% de partículas com granulometria de 200 a 400 µm; (c) 10%±2% de partículas com granulometria de 400 a 500 µm. As frações granulométricas serão obtidas peneirando composto de areia e solo natural. O material orgânico será substrato (especificações a definir), sendo utilizada apenas a fração de partículas que atravessar a peneira de 400 µm (ASABE, 2017). A

condutividade elétrica da água na entrada do filtro deverá estar entre 0,25 e 2,0 dS m⁻¹ (ASABE, 2017).

As partículas serão adicionadas e mantidas em suspensão num tanque de mistura contendo agitador. A concentração no tanque de mistura será constante durante o período de ensaio, sendo preparada nova mistura sempre que o conteúdo do tanque for esgotado. A injeção das partículas na tubulação pressurizada será realizada utilizando bomba helicoidal de cavidades progressivas apropriada para bombeamento de fluidos viscosos com ou sem sólidos, fabricante Netzsch, modelo NEMO® NM015BY01L06B, monobloco, pressão máxima de 600 kPa com vazão de até 0,9 m³ h⁻¹, motor elétrico trifásico 220V com potência nominal de 1 CV. O laboratório já dispõe da referida bomba. Conforme manual do fabricante, a vazão injetada por essa bomba é linearmente proporcional a velocidade de rotação, sendo que um inversor de frequência será utilizado para ajustar a vazão e conseqüentemente a concentração de partículas. O ajuste da vazão de injeção será definido por meio de ensaios preliminares, avaliando velocidades de rotação do motor e determinando as respectivas concentrações de partículas na entrada do filtro. Supõe-se que a metodologia descrita deve assegurar que a concentração de partículas na entrada do filtro se mantenha constante ao longo dos ensaios.

Na entrada e na saída do filtro haverá válvulas para coleta manual de amostras de água antes e após a filtração. Essas amostras serão analisadas para determinar a concentração de partículas, a distribuição granulométrica, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (COT). A concentração de sólidos suspensos e/ou turbidez são os principais indicadores para avaliação do desempenho de sistemas de filtração, sendo que determinações de turbidez são comumente utilizadas em tratamento de água para quantificação da eficiência de filtração, dada a facilidade e rapidez para a obtenção de resultados (Adin e Elimelech, 1989). Para avaliar a turbidez da água será utilizada a metodologia apresentada no *Standard Methods for Examination Water and Wastewater* (APHA, 2017). Os ensaios de turbidez serão realizados no Laboratório de Meio Ambiente e Saneamento (LABSAN-FEAGRI) utilizando Turbidímetro HACH 2100AN. As análises de sólidos suspensos totais serão realizadas conforme norma ISO11923 (1997), utilizando filtros de fibra de vidro. As análises para determinação da distribuição de tamanho de partículas serão realizadas no utilizando o equipamento Malvern Mastersizer® disponível na FEA/UNICAMP. As análises de DQO e COT serão realizadas com a finalidade de quantificar o material orgânico existente nas amostras de água. Estas análises serão realizadas no LABSAN-FEAGRI.

Para cada condição de ensaio, o teste terá duração mínima correspondente a 20 ciclos de retrolavagem (ASABE, 2017), que serão operados em turnos de trabalho de 8 h por dia até que o requisito seja atendido. A duração total de cada condição de ensaio irá variar conforme o elemento filtrante sob ensaio e conforme a qualidade da água correspondente a condição de ensaio. A coleta de amostras de água na entrada e na saída do filtro será efetuada em intervalos regulares, a serem definidos.

Na seção de descarga da retrolavagem, será instalado totalizador de vazão para determinação dos volumes descartados a cada rotina. As determinações de volume e de duração das rotinas serão realizadas por sistema eletrônico acoplado ao filtro. A mistura descartada em cada rotina de retrolavagem será coletada para determinações de concentração e distribuição de tamanho de partículas, a fim de obter informações para identificar possíveis limitações no mecanismo de auto-limpeza do filtro. Em especial, há preocupações de que o mecanismo de auto-limpeza possa apresentar limitações para remoção e eliminação de material orgânico.

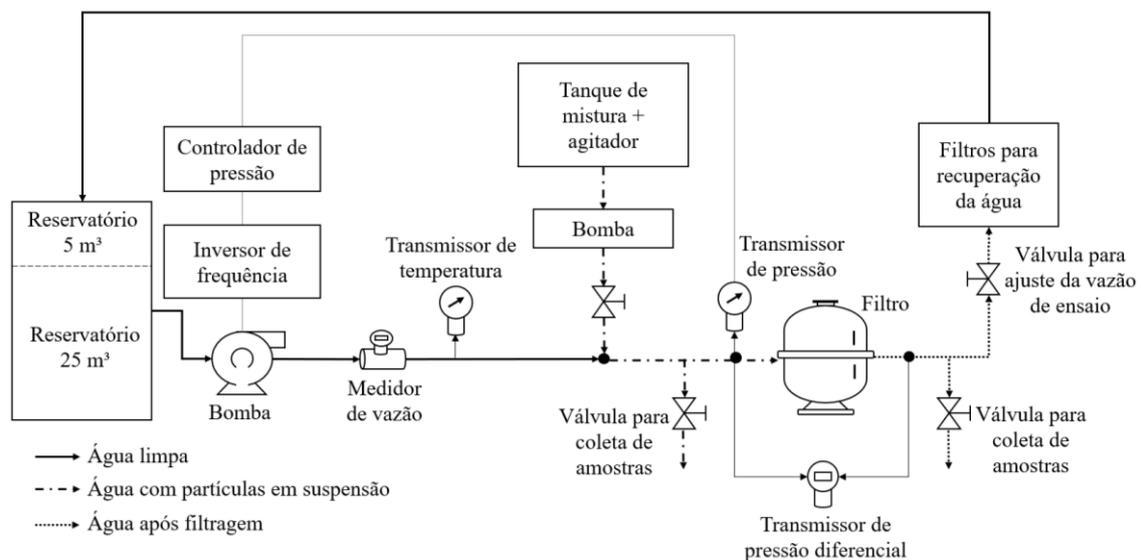


Figura 3 – Esquema básico da estrutura para ensaios de desempenho de filtragem

Para cada elemento filtrante serão propostos modelos ou nomogramas para a estimativa do intervalo entre limpezas/retrolavagens, considerando uma perda de carga admissível, a concentração e granulometria das partículas presentes na água. Tais modelos são úteis para a seleção de elementos filtrantes em função da qualidade da água e para antecipar se o número de retrolavagens não será excessivo e limitante sob dadas condições operacionais (Zeier e Hills, 1987). Além disso, gráficos de eficiência de remoção de partículas em função do diâmetro médio de partículas permitirão identificar a granulometria mínima que dado elemento filtrante é capaz de remover eficientemente

(Adin e Elimelech, 1989). Para a elaboração de tais gráficos serão necessárias determinações de distribuição de tamanho de partículas, a partir da análise de amostras de água adquiridas na entrada e na saída do filtro.

4.4 Experimentos em campo para investigação do desempenho de elementos filtrantes na prevenção de problemas de obstrução de gotejadores

Serão realizados experimentos em campo submetendo um conjunto de modelos de tubo-gotejadores a operação com água superficial filtrada utilizando cada um dos elementos filtrantes listados na Tabela 1. Serão monitoradas características operacionais do filtro e dos emissores, sendo que os ensaios de campo tem como propósitos: (1) investigar se o desempenho de filtragem dos elementos filtrantes se mantém sob operação com água de superfície que oferece risco de obstrução especialmente devido à agentes químicos e biológicos; (2) verificar se as recomendações de limites práticos de operação estabelecidas com base nos resultados de laboratório proporcionam operação apropriada dos filtros em condições de campo; (3) determinar se o mecanismo de auto-limpeza é eficaz para todos os elementos filtrantes quando operados em condições adversas de campo; (4) estabelecer recomendações práticas do elemento filtrante apropriado para cada modelo de tubo-gotejador avaliado.

Os ensaios serão conduzidos no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP utilizando água superficial proveniente de um lago com volume de aproximadamente 2500 m³, que é abastecido pelo bombeamento de água de uma pequena represa, na qual ocorre a contribuição hídrica de nascentes próximas. No referido lago, atualmente há a criação de peixes o que favorece maior quantidade de material orgânico na água, assim como de microrganismos. Informações levantadas por Ribeiro et al. (2008), sobre a qualidade da água no lago, indicam concentrações elevadas de ferro total (até 1,7 mg L⁻¹) e de H₂S (até 16 mg L⁻¹), valores de pH variando de 6,4 a 8,1 e baixos valores de sólidos suspensos (até 23,5 mg L⁻¹). O H₂S é um dos parâmetros cuja faixa de valores indica risco de obstrução moderado a alto (Goyal et al., 2016), sendo que valores elevados desse parâmetro além de apresentar riscos de corrosão a componentes metálicos do sistema de irrigação, podem favorecer o desenvolvimento de bactérias sulfurosas (e.g., *Thiothrix nivea*) que promovem a formação de uma massa gelatinosa capaz de obstruir filtros e emissores de irrigação. A presença de ferro em concentrações elevadas na água também oferece risco de obstrução de emissores e filtros utilizados em irrigação localizada. O ferro reduzido (Fe²⁺) é solúvel, porém pode oxidar-se nos componentes do sistema de irrigação, tornando-se insolúvel (Fe³⁺) e conseqüentemente favorecendo problemas de

obstrução. A presença de ferro e H₂S na água de irrigação pode contribuir para o desenvolvimento de lodo dentro das tubulações, ajudando a criar as condições ótimas para um entupimento por agentes biológicos. A presença de material biológico cria uma espécie de matriz gelatinosa na qual serão aderidos precipitados químicos e material particulado (Lamm et al., 2006). Portanto, é esperado que a água a ser utilizada nos ensaios de campo proporcione condições adversas para o sistema de filtragem e para os gotejadores, dada a combinação de fatores de risco de obstrução associados a elevada concentração de Fe, H₂S, matéria orgânica, bactérias e algas, assim como a possibilidade de valores de pH elevados.

As especificações técnicas dos modelos de tubo-gotejadores a serem avaliados são apresentadas na Tabela 2. Todos os modelos são fabricados pela empresa NaanDanJain e foram selecionados porque já estão sendo avaliados em outra pesquisa parte do Projeto FAPESP 2018/20099-5. Os tubo-gotejadores estão sendo submetidos a ensaios laboratoriais para avaliação da sensibilidade dos gotejadores a obstrução causada por partículas sólidas conforme metodologia descrita por Lavanholi et al. (2018), que contempla parte dos requisitos da norma ISO/DTR 21540 (em desenvolvimento). Presume-se que os modelos de gotejadores mais sensíveis à obstrução em condições de laboratório demandarão maior desempenho do sistema de filtragem para que haja operação adequada. Como aspecto secundário, será verificado o quanto os resultados de desempenho dos emissores avaliados em condições de laboratório são úteis para antecipar o desempenho dos mesmos operados em condições adversas de campo.

Tabela 2 - Especificações técnicas dos modelos de tubo-gotejadores a serem avaliados nos experimentos de campo

Modelo	Diâmetro nominal (mm)	Vazão nominal (L h ⁻¹)	Espaçamento entre emissores (m)	Auto-compensante?
AmnonDrip PC	17	1,1	0,50	Sim
TalDrip	17	0,55	0,30	Não
TopDrip	16	1,6	0,50	Sim
TurboExcel	17	1,6	0,30	Não
TopDrip	16	1,0	0,30	Sim
AmnonDrip PC	17	1,6	0,55	Sim
NaanTif	16	1,0	0,50	Não
NaanPC	16	1,8	0,50	Sim

Para favorecer a comparação de resultados de laboratório e de campo, relacionados à obstrução de gotejadores, as rotinas de experimento em campo serão

executadas de modo similar aos ensaios de laboratório, conforme metodologia descrita por Lavanholi et al. (2018). O sistema de irrigação operará 8 h por dia, 5 dias por semana, durante 4 semanas, totalizando 160 horas de ensaio dos tubo-gotejadores e do sistema de filtragem.

Serão conduzidos experimentos avaliando cada elemento filtrante fornecendo água para 8 linhas laterais correspondentes aos 8 modelos de tubo-gotejadores. As linhas laterais terão comprimento fixado em 80 m, que corresponde a um valor compatível com o espaço disponível na área experimental e suficientemente longo para representar condições de campo em que os emissores operam. Serão instalados tubo-gotejadores novos para os experimentos com cada um dos elementos filtrantes, e portanto, serão executados 5 experimentos, cada um com duração de 1 mês. As linhas laterais serão acopladas em uma linha de derivação com bifurcações simétricas a fim de evitar caminhos preferenciais de sólidos mais densos e tentar submeter todos os modelos de gotejadores ao mesmo risco de obstrução (Perboni, 2016; Lavanholi, 2017; Oliveira, 2017; Talamini Junior, 2018). Na entrada de cada linha lateral será instalado um hidrômetro para totalizar volumes de água ao longo dos experimentos. A cada 40 h de operação, será determinada a vazão de 30 gotejadores de cada linha lateral por meio de medições de massa de água coletadas num dado intervalo de tempo. As determinações serão realizadas sistematicamente, em grupos de 10 gotejadores localizados no início, meio e fim de cada linha lateral. Ao final dos experimentos com um dado modelo de elemento filtrante, os labirintos de gotejadores serão abertos manualmente a fim de diagnosticar causas de eventual obstrução.

Os ensaios serão conduzidos em estrutura de ensaios ilustrada na Figura 4. A pressão na entrada do filtro será ajustada em 400 kPa e a vazão em aproximadamente $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sendo que este valor corresponde a um valor um pouco superior a vazão mínima recomendada pelo fabricante do filtro (Tabela 1). Tanto a pressão quanto a vazão na entrada do filtro serão ajustadas manualmente por meio de válvulas, visto que os conjuntos motobomba disponíveis na área experimental não dispõem de inversor de frequência. Ao longo dos experimentos, tanto a vazão quanto a pressão podem sofrer oscilações em função do grau de obstrução do elemento filtrante e de operações de retrolavagem. Na entrada e na saída do filtro haverá válvulas para coleta manual de amostras de água antes e após a filtragem, sendo que essas amostras serão analisadas. A coleta de amostras de água na entrada e na saída do filtro será efetuada em intervalos regulares a serem definidos com base em ensaios preliminares.

Na seção de descarga da retrolavagem, será instalado um totalizador de vazão para determinação dos volumes descartados a cada rotina. As determinações de volume e de duração das rotinas serão realizadas por sistema eletrônico acoplado ao filtro. A mistura descartada em cada rotina de retrolavagem será coletada periodicamente para determinações que possibilitem identificar possíveis limitações no mecanismo de auto-limpeza do filtro. Há preocupações de que o mecanismo de auto-limpeza possa apresentar limitações para a remoção e eliminação de material orgânico e algas.

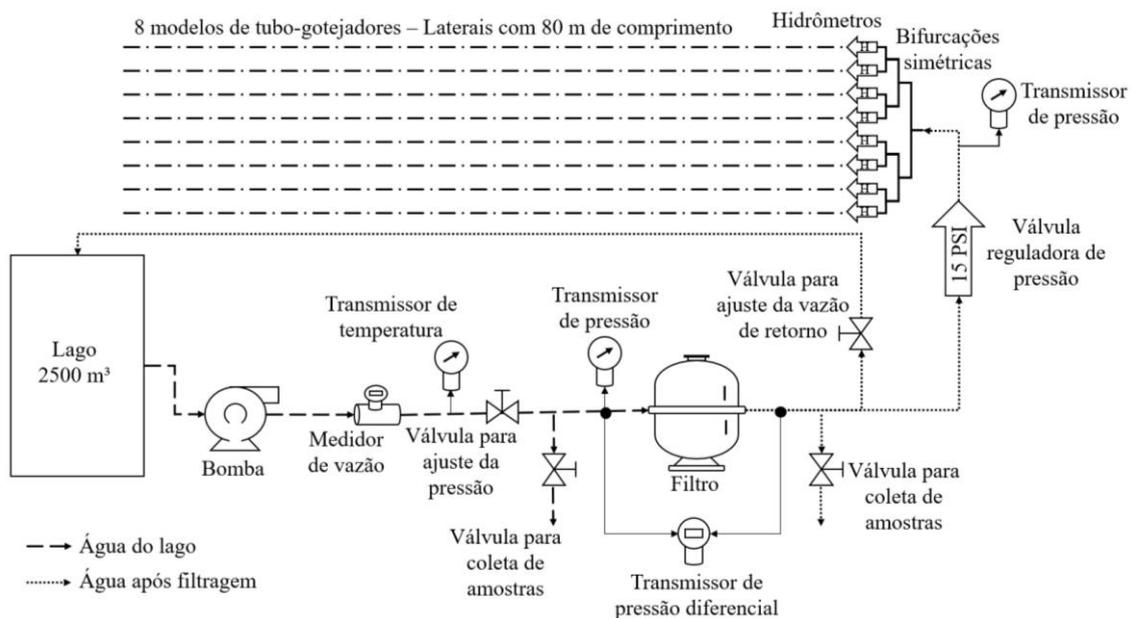


Figura 4 – Esquema básico da estrutura para condução de experimentos em campo

As análises de qualidade de água referentes aos experimentos de campo devem incluir as principais variáveis intervenientes nos processos de obstrução de emissores utilizados em irrigação localizada, destacando-se: pH, sólidos em suspensão, turbidez, sólidos dissolvidos, ferro, sulfeto de hidrogênio, manganês, dureza, alcalinidade, oxigênio dissolvido, concentração de algas e bactérias. As análises serão realizadas conforme *Standard Methods for Examination Water and Wastewater* (APHA, 2017).

5 RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados dessa pesquisa devem conter informações técnicas suficientes para a caracterização operacional e de desempenho dos elementos filtrantes de filtros de tela com mecanismo auto-limpante, assim como para definição de critérios sobre limites de operação e recomendações de dimensionamento e seleção.

Também é desejado que se obtenham recomendações práticas para a seleção do elemento filtrante apropriado para os modelos de gotejadores que serão avaliados. Do mesmo modo, deverá haver evidências suficientes para afirmar se outras estratégias de filtragem e/ou tratamento de água seriam recomendadas para as condições de campo avaliadas durante a pesquisa.

De modo amplo, o projeto proposto deve contribuir para o estabelecimento de recomendações de seleção, dimensionamento e operação de sistemas de filtragem, assim como para a prevenção de problemas de obstrução de emissores, e consequente aumento da vida útil de sistemas de irrigação localizada.

6 PLANO DE TRABALHO E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Metas/Atividades	2018	2019		2020		2021		2022
	2º Sem.	1º Sem.						
Disciplinas	x	x						
Revisão bibliográfica	x	x	x	x	x	x	x	
Submissão de projeto para solicitação de recursos	x	x						
Exame de qualificação			x					
Montagem da bancada de ensaio e testes preliminares		x						
Ensaio em laboratório para caracterização hidráulica dos elementos filtrantes		x	x					
Ensaio em laboratório para avaliação do desempenho de filtragem			x	x	x			
Ensaio no campo experimental					x	x	x	
Relatórios anuais			x		x		x	
Elaboração e submissão de artigos para publicação				x		x	x	x
Elaboração da tese			x	x	x	x	x	x
Defesa da tese								x

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adin A, Elimelech M. Particle Filtration for Wastewater Irrigation. J Irrig Drain Eng. American Society of Civil Engineers; 1989;115:474–487.
- Adin BA, Alon G. Mechanisms and process parameters of filter screens. J Irrig Drain

- Eng. 1986;112:293–304.
- Ali MH, Abustan I. A new novel index for evaluating model performance. *J Nat Resour Dev.* 2014;4:1–9.
- APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23^o ed. Washington: American Public Health Association; 2017.
- ASABE. Media filters for irrigation - Testing and performance reporting - ASAE S539 (R2017). American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2017. p. 13.
- Duran-Ros M, Arbat G, Barragán J, Ramírez de Cartagena F, Puig-Bargués J. Assessment of head loss equations developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents. *Biosyst Eng.* 2010;106:521–526.
- Duran-Ros M, Puig-Bargués J, Arbat G, Barragán J, Cartagena FR de. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agric Water Manag.* 2009a;96:67–79.
- Duran-Ros M, Puig-Bargués J, Arbat G, Barragán J, Ramírez de Cartagena F. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems. *Biosyst Eng. Academic Press;* 2009b;103:35–42.
- Frizzone JA, Freitas PSL, Rezende R, Faria MA. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. 1^o ed. Maringá: Eduem; 2012.
- Goyal MR, Chavan VK, Tripathi VK. Principles and management of clogging in micro irrigation. Boca Raton: Apple Academic Press; 2016.
- ISO1923. Water quality - Determination of suspended solids by filtration through glass-fibre filters. 1997. p. 6.
- ISO9912-1. Agricultural irrigation equipment — Filters for micro-irrigation — Part 1: Terms, definitions and classification. 2004. p. 8.
- ISO9912-2. Agricultural irrigation equipment - Filters for microirrigation - Part 2: Strainer-type filters and disc filters. 2013. p. 10.
- ISO9912-3. Agricultural irrigation equipment — Filters for microirrigation — Parte 3: Automatic flushing strainer-type filters and disc filters. 2013. p. 8.
- Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS. Microirrigation for crop production: design, operation and management. Elsevier; 2006.
- Lavanholi R. Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas. Dissertação de mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP); 2017.
- Lavanholi R, Oliveira FC, Camargo AP De, Frizzone JA, Molle B, Ait-Mouheb N, Tomas S. Methodology to Evaluate Dripper Sensitivity to Clogging due to Solid Particles: An Assessment. *Sci World J.* 2018;2018:1–9.
- Li Q, Song P, Zhou B, Xiao Y, Muhammad T, Liu Z, Zhou H, Li Y. Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water. *Agric Water Manag.* Elsevier; 2019;215:16–24.
- Li Y, Song P, Pei Y, Feng J. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. *Irrig Sci.* 2015;33:235–245.
- Nakayama FS, Bucks DA. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrig Sci.* 1991;12:187–192.
- Oliveira FC de. Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão. Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP); 2017.
- Oliveira FC, Lavanholi R, Camargo AP, Frizzone JA, Ait-Mouheb N, Tomas S, Molle B. Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging. *Irrig Drain*

- Syst Eng. 2017;06:1–5.
- Perboni A. Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia. Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP); 2016.
- Pinto MF. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem com reversão de fluxo de alta frequência. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP; 2013.
- Pinto MF, Alves DG, Saretta E, Camargo AP de, Botrel TA. Development of a filtration system with high-frequency flow reversal. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient.* 2016;20:295–301.
- Puig-Bargués J, Arbat G, Barragán J, Ramírez de Cartagena F. Effluent particle removal in microirrigation system filters. *Spanish J Agric Res.* 2005;3:182–191.
- Puig-Bargués J, Duran-Ros M, Arbat G, Barragán J, Ramírez de Cartagena F. Prediction by neural networks of filtered volume and outlet parameters in micro-irrigation sand filters using effluents. *Biosyst Eng. Academic Press;* 2012;111:126–132.
- Puig-Bargués J, Lamm F. Effect of Flushing Velocity and Flushing Duration on Sediment Transport in Microirrigation Driplines. *Trans ASABE.* 2013;56:1821–1828.
- Ribeiro TAP, Paterniani JES, Airoidi RPS, Silva MJM. Performance of non woven synthetic fabric and disc filters for fertirrigation water treatment. *Sci Agric.* 2004;61:127–133.
- Ribeiro TAP, Paterniani JES, Airoidi RPS, Silva MJM. Comparison between disc and non-woven synthetic fabric filter media to prevent emitter clogging. *Trans ASABE.* 2008;51:441–453.
- Soccol OJ, Botrel TA. Hydrocyclone for pre-filtering of irrigation water. *Sci Agric.* 2004;61:134–140.
- Tajrishy MA, Hills DJ, Tchobanoglous G. Pretreatment of Secondary Effluent for Drip Irrigation. *J Irrig Drain Eng.* 1994;120:716–731.
- Talamini Junior MV. Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP); 2018.
- Taylor H, Bastos R, Pearson H, Mara D. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: Solving the problem of emitter fouling. *Water Sci Technol.* 1995;31:417–424.
- Testezlaf R. Filtros de Areia Aplicados à Irrigação Localizada: Teoria e Prática. *Eng Agrícola.* 2008;28:604–613.
- Vilaça FN, de Camargo AP, Frizzone JA, Mateos L, Koech R. Minor losses in start connectors of microirrigation laterals. *Irrig Sci.* 2017;35.
- Willmott CJ, Robeson SM, Matsuura K. A refined index of model performance. *Int J Climatol.* 2012;32:2088–2094.
- Wu W, Chen WEI, Liu H, Yin S, Niu Y. A new model for head loss assessment of screen filters developed with dimensional analysis in drip irrigation systems. *Irrig Drain.* 2014;63:523–531.
- Yurdem H, Demir V, Degirmencioglu A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosyst Eng.* 2008;100:14–23.
- Yurdem H, Demir V, Degirmencioglu A. Development of a mathematical model to predict clean water head losses in hydrocyclone filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosyst Eng.* 2010;105:495–506.
- Zeier KR, Hills DJ. Trickle irrigation screen filter performance as affected by sand size and concentration. *Trans ASAE.* 1987;30:735–739.
- Zong Q, Zheng T, Liu H, Li C. Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosyst Eng.*

Academic Press; 2015;133:116–127.