

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Laura Dias Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A
DETERMINAÇÃO DA VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
DE ÁGUA**

Santa Maria, RS
2020

Laura Dias Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA
VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS
2020

Ferreira, Laura Dias
Análise comparativa de metodologias para a
determinação da vazão em sistemas de bombeamento de água
/ Laura Dias Ferreira.- 2020.
41 p.; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Coorientadora: Marcia Xavier Peiter
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2020

1. Eficiência da irrigação 2. Instrumentos de medição
3. Medida indireta 4. Monitoramento permanente I. Dias
Robaina, Adroaldo II. Xavier Peiter, Marcia III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

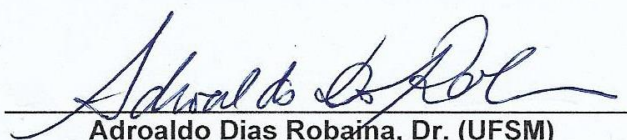
Declaro, LAURA DIAS FERREIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Laura Dias Ferreira

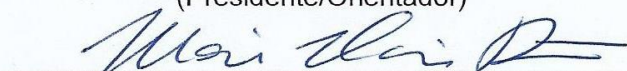
**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA
VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

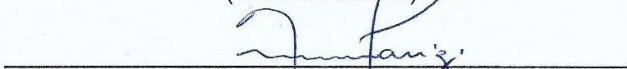
Aprovado em 28 de fevereiro de 2020:



Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Marcia Xavier Peiter, Dra. (UFSM)
(Coorientadora)



Ana Rita Costenaro Parizi, Dra. (IFFar)



Ricardo Luis Schons, Dr. (IFFar)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho em especial aos meus pais, Tânia e Nei, que me encorajaram a buscar os meus sonhos, dando-me a oportunidade de realizá-los”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida e pelo privilégio de ter tido a oportunidade de seguir meus estudos.

Ao meu professor orientador Dr. Adroaldo Dias Robaina, pela oportunidade, paciência, amizade, incentivo, ensinamentos e confiança na construção deste trabalho.

À professora coorientadora, Dr^a. Marcia Xavier Peiter, pela amizade, aprendizado neste período e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe Tânia Dias por ser meu alicerce, base e motivação aos meus estudos, por ser grande companheira nesta trajetória e a maior apoiadora para estar hoje aqui, realizando meus sonhos, dando-me todo o suporte necessário.

Agradeço também, ao meu pai Nei Ferreira e irmão Maikel Ferreira, pelo carinho e incentivo. Por me motivarem a seguir meus estudos, pelas palavras de consolo nos momentos difíceis, por me mostrarem que momentos ruins são passageiros e que devemos sempre enfrentá-los, bem como ao meu amigo Marco Antônio Vilaverde.

Ao meu namorado Maicon pelo apoio, carinho, companheirismo e paciência durante esta etapa.

Tenho imensa gratidão e orgulho por fazer parte da Universidade Federal de Santa Maria, por ser uma universidade pública, com um ensino de qualidade.

Agradeço ao CNPq o apoio através da bolsa de estudos concedida.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de seguir os estudos na minha área de formação.

Agradeço também os meus colegas do Laboratório de Engenharia de Irrigação (LEI), pelo companheirismo durante todo este período, pelas risadas e até mesmo os momentos mais difíceis e, principalmente aqueles que com toda a paciência me ajudaram nos momentos necessários quando precisei, auxiliando-me na construção deste trabalho.

Muito obrigada!

É exatamente disso que a vida é feita, de momentos. Momentos que temos que passar, sendo bons ou ruins, para o nosso próprio aprendizado. Nunca esquecendo do mais importante: Nada nessa vida é por acaso. Absolutamente nada. Por isso, temos que nos preocupar em fazer a nossa parte, da melhor forma possível. A vida nem sempre segue a nossa vontade, mas ela é perfeita naquilo que tem que ser”.

(Chico Xavier).

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

AUTORA: Laura Dias Ferreira
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

Na busca pela maior precisão nos dados referentes a escoamento de um fluido e sua determinação à campo, são imprescindíveis o uso de metodologias que minimizem possíveis erros e que apresentem precisão, englobando diferentes meios, fácil instalação e baixo custo. As medidas de vazão são consideradas importantes para o melhor controle da prática de irrigação. Desta forma, torna-se essencial obter essa variável, utilizando métodos alternativos, que se caracterizam pela estimativa indireta. Estes métodos irão permitir determinar a vazão, a partir de informações facilmente mensuradas ou prontamente disponíveis. Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo, realizar uma análise comparativa entre diferentes metodologias para determinar a vazão disponível em sistemas de bombeamento de água. O estudo foi realizado em sistema de bombeamento de água, localizado no Laboratório de Hidráulica do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria. Utilizou-se sete diferentes metodologias baseadas em parâmetros hidráulicos, de pressão e de nível. Foram testados diferentes pontos de abertura no registro de gaveta para controle e variação da vazão. Executou-se treze sequências de ensaios, três para ajuste e dez para testar as equações, divididos através de um sorteio. Adotou-se como vazão observada valores obtidos por um hidrômetro e vazão estimada valores obtidos pelas metodologias. Foi verificado se existe correlação entre a vazão observada e os parâmetros em estudo. O comportamento dos resultados foi analisado através dos valores do coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular e linear. Para analisar e comparar os resultados foram utilizados diferentes indicadores estatísticos (I_p , I_c , I_d , RMSD e NSE). Foi realizado um levantamento de custo para cada instrumento utilizado no estudo. Após as análises dos resultados, confirmou-se que a vazão pode ser determinada através das metodologias empregadas. O controle permanente da vazão pode ser realizado monitorando a variação da medida de pressão, tanto na entrada quanto na saída do sistema. Dentre os parâmetros testados, o de pressão demonstrou melhor desempenho comparado aos demais, com os melhores resultados conforme os indicadores estatísticos. O Tensiômetro, Vacuômetro de Bourdon e o Vacuômetro de tubo em "U" foram as metodologias que apresentaram o melhor desempenho geral na determinação da vazão. Os valores para aquisição destes equipamentos variaram de R\$120,00 a R\$750,00, considerados de baixo custo, em relação aos demais para a determinação da vazão.

Palavras-chave: Eficiência da Irrigação. Instrumentos de medição. Medida indireta. Monitoramento permanente.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR DETERMINING FLOW RATE IN WATER PUMPING SYSTEMS

AUTHOR: Laura Dias Ferreira
ADVISOR: Adroaldo Dias Robaina

In the search for greater precision in the data related to the flow of a fluid and its determination in the field, it is essential to use methods that minimize possible errors and present errors, including different means, easy installation and low cost. Flow rate measurements are considered important for better control of irrigation practice. Thus, it is essential to obtain this variable, using alternative methods, which are characterized by indirect estimation. These methods will allow to determine the flow rate, from information easily measured or readily available. Given the above, the present study aims to perform a comparative analysis between different methodologies to determine the flow rate available in water pumping systems. The study was carried out in a water pumping system, located in the Hydraulics Laboratory of the Rural Sciences Center of the Federal University of Santa Maria. Seven different methodologies were used based on hydraulic, pressure and level parameters. Different opening points were tested in the drawer register to control and vary the flow rate. Thirteen test sequences were performed, three for adjustment and ten for testing the equations, divided through a draw. Values obtained by a hydrometer were adopted as the observed flow rate, and estimated values obtained by the methodologies. It was verified if there is a correlation between the observed flow rate and the parameters under study. The behavior of the results was analyzed using the values of the coefficients of determination (R^2), angular and linear coefficient. To analyze and compare the results, different statistical indicators were used (I_p , I_c , I_d , RMSD and NSE). A cost survey was carried out for each instrument used in the study. After analyzing the results, it was confirmed that the flow rate can be determined using the methodologies employed. The permanent flow rate control can be performed by monitoring the variation of the pressure measurement, both at the entrance and at the exit of the system. Among the tested parameters, the pressure one showed better performance compared to the others, with the best results according to the statistical indicators. The Tensiometer, Bourdon Vacuumeter and the "U" tube vacuum gauge were the methodologies that presented the best overall performance in determining the flow rate. The values for the acquisition of this equipment ranged from R\$ 120.00 to R\$ 750.00, considered low cost, in relation to the others for determining the flow rate.

Keywords: Irrigation efficiency. Measuring instruments. Indirect measure. Permanent monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A) Manômetro metálico eletrônico; B) Vacuômetro de Bourdon.	22
Figura 2 - A) Manômetro diferencial; B) Vacuômetro de tubo em "U"; C) Momento da medição do Vacuômetro de tubo em "U"	23
Figura 3 - A) Tensiômetro de coluna de mercúrio; B) Régua medidora para a leitura do nível do tanque (LNT); C) Tacômetro digital utilizado para medições da rotação do eixo do motor.....	24
Figura 4 - Correlação da vazão observada (hidrômetro) em função dos valores obtidos pelo Vacuômetro de Bourdon (A); Vacuômetro tubo em "U" (B); Tensiômetro (C); Manômetro metálico eletrônico (D); Manômetro diferencial (E); LNT (F) e Tacômetro (G).....	29
Figura 5 - Valores de Q_{obs} e Q_{est} para as diferentes metodologias empregadas; Vacuômetro de Bourdon (A); Vacuômetro de tubo em "U" (B); Tensiômetro (C); Manômetro metálico eletrônico (D); Manômetro diferencial (E); LNT (F) e Tacômetro (G).....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Instrumentos utilizados para a determinação da vazão.	21
Tabela 2 - Critério para interpretação do índice de concordância (Ic), índice de precisão (Ip), índice de desempenho (Id) e suas respectivas classificações.	27
Tabela 3 - Equações de ajuste e suas respectivas metodologias empregadas para determinar a vazão através do monitoramento permanente.	30
Tabela 4 - Custo para adquirir ou construir os instrumentos utilizados para a determinação da vazão.	34

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVO	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM ÁREAS IRRIGADAS.....	14
3.2	IMPORTÂNCIA DA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO	15
3.3	MÉTODOS USUAIS DE DETERMINAÇÃO DA VAZÃO	17
3.3.1	Métodos Diretos	18
3.3.2	Métodos Indiretos	19
3.3.3	Medidores Especiais	20
4.	METODOLOGIA	21
4.1	ESTUDO EXPERIMENTAL – LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS....	21
4.2	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DIRETA	25
4.3	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO INDIRETA	25
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	25
4.4.1	Coeficiente angular e linear	25
4.4.2	Índice de precisão	26
4.4.3	Índice de concordância	26
4.4.4	Índice de desempenho	26
4.4.5	Raiz quadrática do erro médio (RMSD)	27
4.4.6	Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	AJUSTAMENTO DAS EQUAÇÕES.....	29
5.2	APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES	30
6.	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A eficiência da irrigação é um indicador para projetos, gestão da água e as tecnologias utilizadas em diversas escalas, importante para qualificar o uso efetivo da água e sua racionalização (WU et al., 2019).

No que diz respeito ao manejo da água na irrigação, é comum a busca por técnicas que visam reduzir as perdas e que melhorem a eficiência nos processos de distribuição e aplicação (PIMENTA et al., 2018). O produtor necessita da viabilidade técnica e econômica na agricultura irrigada ao implantar um projeto, e o uso de alternativas com nível de qualidade aceitável e menor custo, são pontos decisivos para garantir o sucesso de determinada atividade (CAMARGO, 2009).

O conhecimento da vazão é fator essencial ao implantar projetos que visem a racionalização e o manejo eficiente da água. Realizar medições de vazão com precisão e exatidão conhecidas, são importantes para um melhor controle da prática, impedindo possíveis erros resultantes entre a vazão de projeto e a vazão real na condução e na avaliação da irrigação (SOUSA et al., 2011).

A medição de vazão de fluidos pode ser aplicada com vários propósitos, uma vez que, existe uma variedade de medidores de alta qualidade abrangendo diversas técnicas (MEDEIROS et al., 2017). Determinar a vazão em sistemas de irrigação é necessário e a metodologia empregada para tal, é de caráter determinante (LUDWIG et al., 2014).

Atualmente, há uma grande variedade de instrumentos e técnicas utilizadas para medir a vazão (VÁSQUEZ et al., 2017). Existem metodologias para estimar a vazão, cada uma com suas peculiaridades. Há uma série de métodos disponíveis, porém, necessitam de alto investimento para instalação, exigência de equipamentos, infraestrutura e mão-de-obra especializada para uso e manutenção. Estes medidores quando disponíveis apresentam custo, que muitas vezes oneram o produtor. Desta forma, para adquirir e fazer uso destes equipamentos torna-se dispendioso ao consumidor.

Quando se trata da medição de vazão de água, é desejável a existência de medidores de baixo custo e fácil instalação, na busca por vantagens tanto financeiras quanto operacionais para os consumidores finais do produto.

Existem equipamentos que medem a vazão e o consumo de água e disponibilizam essas informações de modo permanente. No entanto, o principal entrave ao uso desses instrumentos é o custo elevado. Quando disponibilizadas no meio rural, as empresas de assistência técnica utilizam equipamentos para medição de vazão, porém, não deixam uma forma de monitoramento permanente ao produtor para controle da água.

Uma alternativa que permite a medida da vazão e o consumo de água de forma indireta, é o uso de instrumentos tais como medidores de pressão (manômetros e vacuômetros), de coluna de água em condutos fechados e medidores de rotação (tacômetros). Todavia, há pouca divulgação e carência de informações para a utilização destes equipamentos que realizam a medida indireta da vazão e do consumo de água em instalações de bombeamento.

Desta forma, torna-se cada vez mais importante conhecer o valor real desta variável básica da hidrologia que é a vazão (MALDONADO et al., 2015). A agricultura irrigada necessita do controle e monitoramento do desempenho dos sistemas de irrigação, buscando a adequação para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e da demanda conforme as necessidades da planta. O uso de metodologias que correspondam a essa necessidade são imprescindíveis, e a determinação da vazão inserida neste cenário é essencial.

São necessários métodos que sejam mais convenientes e precisos para medir o fluxo da água (WANG et al, 2019). Para isso, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que forneçam tais informações, visto que, há grande preocupação para a utilização eficiente do uso da água na agricultura irrigada.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar diferentes metodologias para determinação da vazão em sistemas de bombeamento de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Serão seguidos os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Definir e testar diferentes metodologias indiretas para determinar a vazão;
- ✓ Verificar se existe correlação entre os parâmetros utilizados com a vazão medida por hidrômetro;
- ✓ Avaliar o desempenho das metodologias utilizadas para determinar a vazão;
- ✓ Identificar as vantagens e desvantagens das diferentes metodologias considerando os aspectos econômicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será descrito uma revisão com os principais temas que fundamentam este trabalho. Deste modo, será dissertado sobre a importância e determinação da vazão em sistemas para bombeamento de água e os métodos usuais de determinação.

3.1 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM ÁREAS IRRIGADAS

De acordo com Campos e Alcantara (2018) os sistemas de bombeamento utilizam diversos tipos de bomba, sendo responsáveis pelo transporte de água da fonte até a planta, importantes na prática da irrigação.

As bombas são máquinas simples, com design simples, disponibilizadas na maioria dos países em desenvolvimento (DERAKHSHAN e NOURBAKHS, 2008). Dentre os tipos de bombas, as centrífugas são bem conhecidas e utilizadas em inúmeros ambientes e aplicações (SABINI e LORENC, 2003). Além disso, seu uso é predominantemente voltado a diversas instalações domésticas e de produção (RAPUR e TIWARI, 2019), principalmente no setor agrícola, especialmente na irrigação.

Os agricultores também conhecidos como empresários, exigem previsões econômicas e financeiras de custos e receitas operacionais nas tomadas de decisões que sejam eficazes e lucrativas no projeto e gerenciamento do sistema de irrigação (ALLEN e BROCKWAY, 1984). Em geral, ao desenvolver projetos de irrigação, algumas etapas são tratadas isoladamente, sendo estas: estudo de viabilidade, planejamento, dimensionamento e construção (ALVES JÚNIOR et al., 2018).

Ao implantar um projeto de irrigação, orientações devem ser repassadas ao produtor rural, buscando máximo rendimento do sistema em uso, visto que, influencia na irrigação, lâmina aplicada e na busca pela uniformidade na aplicação da água desejável (ALVES et al., 2008). Assim, o manejo racional do sistema de irrigação visa a maximização da produtividade, os lucros e produção por unidade de água aplicada.

Canafístula et al. (2010), relatam que nos sistemas de irrigação automatizados, o controle da irrigação é realizado por meio de válvulas de controle, que operam variando a pressão e a vazão na saída do sistema. Rodrigues (2007) diz que os

sistemas de bombeamento convencionas realizam o controle da vazão através de válvula tipo globo, gaveta ou borboleta, operando conforme as necessidades operacionais de demanda.

3.2 IMPORTÂNCIA DA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO

A irrigação é necessária para as plantas quando o solo é incapaz de suprir suas necessidades de água (GREEN et al., 2006). É considerada uma técnica antiga para fornecer o aporte hídrico, no momento e na quantidade exata que a planta necessita (TAMAGI et al., 2018). Além disso, é uma operação essencial do ciclo de vida da agricultura (AL ZAYED et al., 2016; ELTAIB et al., 2012).

Atualmente, a irrigação agrícola representa cerca de 70% do uso da água doce do mundo, sendo maior ainda nos países em desenvolvimento (HE et al., 2014). Quando utilizada de forma racional, custos de água e consumo de energia podem ser economizados cerca de 20% e 30%, respectivamente (COELHO et al., 2006). Todavia, LOZOYA et al. (2014) expõem que seu uso de forma ineficiente, não só desperdiça este líquido vital, mas, pode causar uma considerável redução na produtividade da colheita.

Para que um sistema de irrigação seja eficiente é necessário apresentar uniformidade na lâmina de água aplicada, verificada por meio de avaliações periódicas da vazão e da uniformidade (CAMPÊLO et al., 2014). A agricultura irrigada se desenvolve de acordo com o uso racional dos recursos hídricos, necessitando de redução das perdas que ocorrem desde a reservação até a aplicação da água nas áreas irrigadas (AMARAL et al., 2009). Puerto et al. (2013) relata que o planejamento de irrigação de base científica e técnica visando melhorar o rendimento e a qualidade, ainda é um desafio para a agricultura irrigada.

Interligada a vários parâmetros em função do desempenho, a avaliação da operação dos sistemas de irrigação determina fatores à campo, como vazão, tempo, e uniformidade de aplicação de água, importantes nas tomadas de decisões para o diagnóstico do sistema (DE OLIVEIRA PAULINO et al., 2009). Todavia, aos produtores é considerada uma tarefa de baixa relevância pois, mesmo quando disponibilizam de tecnologia, carecem por orientação e conhecimento (SILVA e SILVA, 2005).

Quando um projeto de irrigação é instalado, é necessário averiguar se as condições iniciais se confirmam em campo (DO NASCIMENTO et al., 2009). Para isso, verificações podem ser realizadas através de avaliações do sistema e da lâmina de água aplicada. Tanto na irrigação convencional quanto na irrigação de precisão, é fundamental a medição da vazão em tempo real (ARMINDO et al., 2011).

Segundo Medeiros et al. (2017) a medição da vazão de fluidos pode ser utilizada e aplicada com diversos propósitos. Guimarães (2007) expõe que a medição da vazão é relevante nas aplicações da hidrometria pois, refere-se a medidas de profundidade, variações dos níveis de água, seções de escoamento, pressões, velocidades, vazões ou descargas. Além disso, a autora relata que as vazões são medidas com diversos propósitos, porém, com principal finalidade no ramo da engenharia agrícola, em obras de irrigação. A medição de vazão é um dos procedimentos mais críticos no gerenciamento sustentável de recursos hídricos (HEINER et al. 2011), e a eficiência da irrigação é base importante para avaliar o grau de uso efetivo e o efeito de desenvolvimento da irrigação que economiza água (WU et al., 2019).

As medições precisas e exatas de vazão são consideradas importante para um melhor controle da prática de irrigação, evitando possíveis erros resultantes entre a vazão de projeto e a vazão real na condução e na avaliação da irrigação (SOUSA et al., 2011). Todavia, o uso de sistemas mais precisos e exatos de controle e medição, ainda é considerado baixo, originados pelo custo dos sistemas e pela insipiência dos sistemas disponíveis no mercado (ARMINDO et al., 2011).

Medeiros et al. (2017) retrata que há uma ampla diversidade de aplicações, e que em geral, as medições dinâmicas apresentam propriedades diversas, auxiliando na existência de uma grande demanda de medidores. Os mesmos autores relatam que, isto é essencial para atender a variedade e condições do fluído, aspectos como exatidão, faixa de operação, custo, complexidade, facilidade de leitura, tempo de vida em serviço e, não mais importante, o princípio de medição empregado.

Ademais, Amorim et al. (2017) relatam que realizar as medições da vazão em projetos de irrigação, serve para controlar o volume de água aplicada. É importante monitorar detalhadamente o uso da água, visto que, auxilia os planejadores, autoridades e proprietários de água, determinar onde, com que frequência e em que quantidade é usada ou desperdiçada (MORRISON e FRIEDLER, 2015).

Dessa forma, quando o assunto é a medição da vazão de água, medidores não invasivos e não intrusivos, de fácil instalação e baixo custo, são necessários, tendo em vista adquirir vantagens tanto financeiras quanto operacionais. A medição do fluxo da água é discutida em diversos estudos na literatura, todavia, pesquisas discorrendo sobre instrumentos de medida indireta, em condutos fechados, ainda é pouco explorado.

3.3 MÉTODOS USUAIS DE DETERMINAÇÃO DA VAZÃO

Uma das razões do elevado custo com bombeamento de água em áreas irrigadas, é causado pelo excesso de água recalcado, em destaque a vazão, considerada um dos itens que definem o custo de produção (PÉREZ-URRESTARAZU e BURT, 2012).

Ao buscar a garantia de uma distribuição uniforme da água dentro de uma área irrigada e do manejo adequado do recurso hídrico disponível, são fundamentais uso de técnicas precisas de medição de vazão (CAMARGO, 2009). Dentre estas, destaca-se o uso de hidrômetros que são equipamentos frequentemente utilizados para a determinação da vazão em áreas irrigadas.

Há uma grande diversidade de medidores de vazão com alta qualidade e diversas técnicas para medi-la, porém, podem apresentar limitações que devem ser solucionadas (MEDEIROS et al., 2017). Existe uma série de metodologias que podem ser aplicadas no setor agrícola na determinação da vazão. Ludwig et al. (2014) destaca que estas metodologias podem apresentar vantagens tanto quanto restrições, e isso, dependerá da situação do local, disponibilidade de recursos e da exatidão desejada.

Gomes e Carvalho (2012) enfatizam que a escolha dos equipamentos e instrumentos utilizados em medições, devem atender critérios técnicos e econômicos, e corresponder quanto ao nível de frequência de medição exigida pelo diagnóstico. Atualmente, muitos sistemas possuem dispositivos e métodos de medição, mas o entrave para o gerenciamento eficaz da água é desafiado pelas medições de vazão imprecisas (HEINER et al., 2011).

Devido à importância da vazão para diversos processos que envolvem o deslocamento de fluidos, há uma série de medidores de vazão que podem ser

aplicados em diversas situações por possuírem características diferentes. Ainda assim, cada tipo ou princípio de medição é adequado para uma determinada finalidade (AZEVEDO NETTO et al., 2015).

A medição de vazão pode ser realizada em canais (condutos abertos) como também em canalizações e tubulações (condutos fechados), e existem três tipos fundamentais de medidores de vazão: os diretos, indiretos e especiais.

3.3.1 Métodos Diretos

No interior de condutos forçados, a medição da vazão pode ser realizada de diversas formas, seja por métodos diretos, estreitamento de seção, pela relação velocidade-área, ou pela diferença de pressão (FIGUEREDO JÚNIOR, et al., 2006).

Os métodos diretos de determinação da vazão, medem a vazão propriamente dita. O método volumétrico, baseia-se na medição do volume da água que preenche um recipiente de medidas conhecidas, e um determinado tempo que este leva para ser preenchido, a relação entre ambos (volume pelo tempo) permite a determinação da vazão (GUIMARÃES, 2007).

Já o método gravimétrico, se assemelha ao método anterior. Segundo Vásquez et al. (2017) o volume do líquido é determinado pela pesagem do fluido drenado e pelo conhecimento de sua densidade, em um determinado período de tempo. Ambas medições, quanto maior for o tempo de determinação e o número de repetições do ensaio, valores mais precisos de vazão serão obtidos.

Os hidrômetros conhecidos por determinar a vazão diretamente, segundo Azevedo Netto et al. (1998), medem a quantidade de água percorrida por um longo tempo e são utilizados para medição da cobrança de água em instalações prediais e industriais, e volume de água captada em estações de bombeamento de água. É utilizado em grande escala, desde a hidráulica predial até medidas de vazão em estações de bombeamento para irrigação, considerado como um bom comparativo às vazões obtidas por outros tipos de medidores (PIMENTA et al., 2018). Para Rosso et al. (2013) este equipamento é de fácil manutenção e apresenta confiabilidade nos resultados quando bem calibrado, servindo como alternativa para medir a água em sistemas de bombeamento. Todavia, o uso operacional deste equipamento pode se tornar inviável para as propriedades, visto que, é um equipamento de custo elevado.

3.3.2 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos são característicos por medirem o nível da água que após é aplicado em uma equação para conversão de nível de água em vazão (SALEMI, 2014). Dentre outras formas de medir a vazão indiretamente, é através do uso de variáveis físicas geradas pelo fluido, por exemplo, queda de pressão, velocidade, força, etc.

O método indireto é considerado simples, porém, necessita embasamento teórico para estimar a vazão, diferente por exemplo, dos métodos automáticos, onde o aparelho realiza todos os cálculos e transmite instantaneamente no monitor, não exigindo maiores conhecimentos do processo de medição (CARVALHO, 2008).

A vazão de água de uma bomba pode ser determinada utilizando diversas entradas mensuráveis de forma indireta junto às curvas características da bomba calibrada (WANG et al., 2019). Independente da tecnologia em uso, são bastante utilizados como partes integrantes de sistemas de medição conciliado a outros dispositivos, os medidores baseados na pressão diferencial (PALADINO, 2005).

Os medidores diferenciais são dispositivos que produzem uma diferença de pressão, decorrente do aumento da velocidade em função da redução da seção de uma tubulação (AZEVEDO NETTO et al., 1998). Podem ser utilizados em diversas aplicações para a medição da vazão, incluindo fluidos viscosos e contaminados, em uma faixa elevada de vazões, pressões, temperaturas e diâmetros de tubulação (FRACASSO et al., 2016).

Há disponível no mercado diversos medidores para determinar a pressão em condutos fechados e avaliar sistemas hidráulicos pressurizados como os manômetros de linha industrial e marítima, medidor de pressão mecânico e digital, e os com registro automático de dados (FIGUEREDO JÚNIOR, et al., 2006). Em diversos casos, utiliza-se manômetros metálicos (Bourdon) na verificação e controle de pressões. Estas pressões, normalmente são locais e se denominam manométricas (AZEVEDO NETTO et al., 2015). As medidas de pressões quando apresentam correlação com o fluido em estudo, podem ser utilizadas como parâmetros na determinação da vazão.

Além dos medidores de pressão, os medidores responsáveis por medir a rotação do eixo do motor (tacômetros), podem ser utilizados como alternativa quando deseja-se obter variáveis específicas. Gomes e Carvalho (2012) descrevem que é

comum a caracterização de uma bomba considerando sua velocidade específica no ponto de projeto. Sendo assim, a rotação do eixo pode ser monitorada para obter vazões específicas.

3.3.3 Medidores Especiais

Os medidores de vazão do tipo especial, são instrumentos utilizados para controle de processo e detecção de perdas dos insumos da empresa, que servem para converter recursos como tempo, dinheiro e materiais, em medidas de quanto fluido está correndo (GUIMARÃES, 2007). Dentre estes medidores especiais, temos os medidores do tipo coriólis, eletromagnetismo, vortex, calhas Parshall, e os ultrassônico, comumente mais utilizados para monitorar o fluxo em sistemas de bombeamento de água.

Pimenta et al. (2018) relatam a necessidade de buscar aparelhos que facilitem a mensuração da vazão, principalmente os portáteis, como por exemplo, os medidores de vazão que utilizam o método ultrassom e possuem elevada precisão. O princípio básico deste equipamento é estimar a velocidade do fluido por meio dos tempos de trânsito ou diferença de tempo de trânsito (TTD) dos sinais de ultra-som que viajam a montante e jusante (BO e LI, 2013). Para Stoker et al. (2012), é um medidor de vazão utilizado para medições de campo em condutos fechados, emitindo dois sinais ultrassônicos na secção transversal do tubo, um sinal viaja com a direção do fluxo e outro contra o fluxo. Sua instalação pode ser de forma fácil e simples, sem haver a necessidade de seccionar ou perfurar a tubulação. Podem ser aplicados em diversos tipos de tubulações com diâmetros de até 5.000 mm podendo variar o material (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

4. METODOLOGIA

4.1 ESTUDO EXPERIMENTAL – LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

O estudo foi realizado em um sistema de bombeamento de água, localizado no Laboratório de Hidráulica do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria.

A motobomba (MB) utilizada é da marca Schneider, modelo Centrífuga BC - 20R, vazão máxima de $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ alimentada por um motor elétrico de indução trifásico (MIT) da marca WEG conectado a uma rede de 220V com potência nominal de 3,7 kW (5 cv).

Para o fornecimento de água foi utilizado um sistema de bombeamento em circuito fechado, com tubos de Policloreto de Vinila (PVC) rígido na cor marrom, diâmetro nominal de 40 mm.

Na canalização de saída da bomba foi instalado um registro de gaveta de $1 \frac{1}{4}$ " de diâmetro que permitiu a variação da vazão e após o registro, instalado um hidrômetro para medição da vazão real da MB, tomada como vazão padrão (observada).

O hidrômetro utilizado é do tipo turbina, vazão nominal de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. O volume passou a ser quantificado a partir de uma volta e $\frac{3}{4}$ do registro, a contar do deslocamento do ponteiro. A aferição do equipamento foi realizada através do método volumétrico.

Na Tabela 1, é descrito os instrumentos utilizados nas metodologias para execução do trabalho.

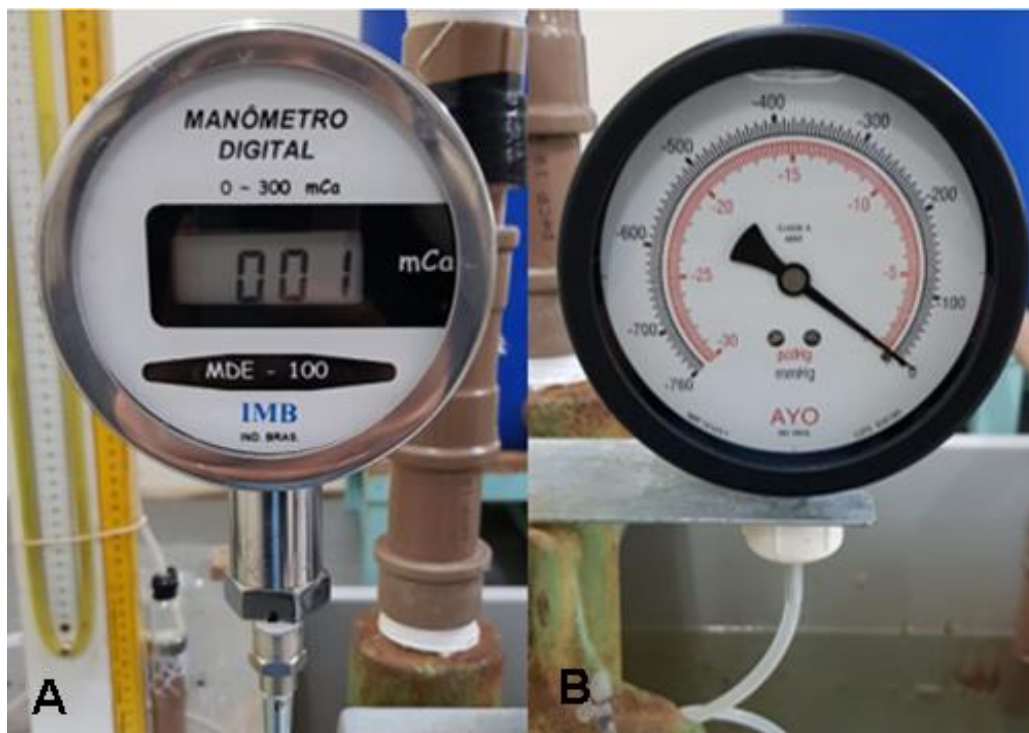
Tabela 1 - Instrumentos utilizados para a determinação da vazão.

INSTRUMENTO	UNIDADE
Vacuômetro de Bourdon	(mmHg)
Vacuômetro de tubo em "U"	(cmHg)
Tensiômetro	(cmHg)
Manômetro metálico eletrônico	(mca)
Manômetro diferencial – curva de 90°	(cmHg)
Leitura do nível do tanque (LNT)	(cm)
Tacômetro	(rpm)

Fonte: Autor.

Os instrumentos utilizados e seus respectivos pontos de instalação foram: na linha de sucção um Vacuômetro de Bourdon (mmHg), e na linha de recalque, um Manômetro metálico eletrônico (mca), conforme Figura 1.

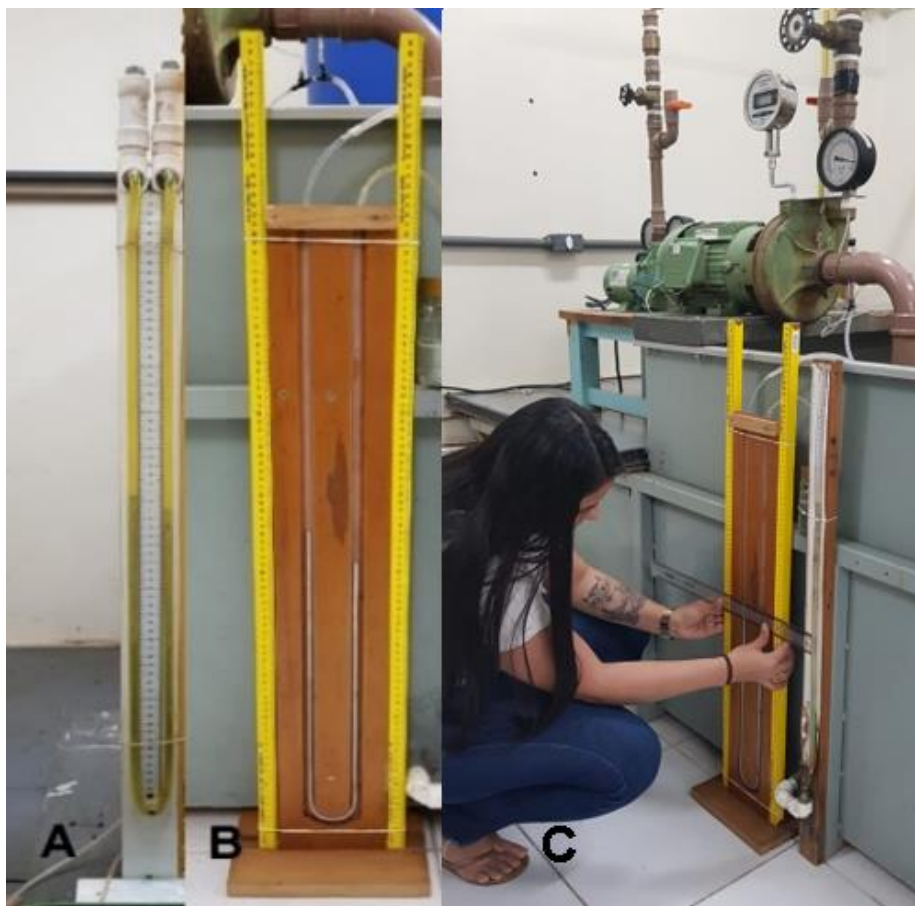
Figura 1 - A) Manômetro metálico eletrônico; B) Vacuômetro de Bourdon.



Fonte: Autor (2019).

Para a leitura do diferencial de pressão foi introduzido no sistema, um vacuômetro de tubo em “U” na linha de sucção, e um manômetro diferencial instalado na curva de 90° na linha de recalque. Ambas as leituras foram realizadas com o auxílio de régua graduada, por meio do diferencial da altura de coluna de mercúrio. Os mesmos podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 - A) Manômetro diferencial; B) Vacuômetro de tubo em "U"; C) Momento da medição do Vacuômetro de tubo em "U".



Fonte: Autor (2019).

Na linha de recalque também se instalou um tensiômetro de coluna de mercúrio para leituras de pressão. Para as leituras tomada como leitura do nível do tanque (LNT), usou-se uma mangueira de nível d'água acoplada ao tanque. Ambos equipamentos estão representados na Figura 3 A e B.

As leituras do parâmetro hidráulico foram realizadas com um tacômetro modelo MDT – 2238. As leituras da rotação do eixo do motor foram realizadas por meio da velocidade de superfície. O equipamento está representado na Figura 3 C.

Figura 3 - A) Tensiômetro de coluna de mercúrio; B) Régua medidora para a leitura do nível do tanque (LNT); C) Tacômetro digital utilizado para medições da rotação do eixo do motor.



Fonte: Autor (2019).

O experimento foi composto no total de treze sequências de ensaios para cada instrumento testado, utilizando três para ajustamento das funções e dez para testar as situações. Para a divisão dos ensaios, realizou-se um sorteio.

Foram testadas diferentes aberturas graduais no registro de gaveta, totalizando dez diferentes pontos de abertura, com cinco repetições cada. Para cada abertura ocorreram leituras simultâneas de todos os instrumentos utilizados para estimar indiretamente a vazão.

Para identificar as vantagens e desvantagens das diferentes metodologias empregadas, com relação aos aspectos econômicos, foi realizado um levantamento de custos de cada instrumento ou valores necessários de materiais para a confecção.

4.2 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DIRETA

A vazão direta foi obtida utilizando o hidrômetro tomado como padrão (Q_{obs}), para ajustar as equações e realizar a análise de regressão a fim de comparar com a vazão estimada (Q_{est}) pelos dados testados.

4.3 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO INDIRETA

Os valores de vazão obtidos através do hidrômetro (Q_{obs}), foram correlacionados com valores de leituras das variáveis dos diferentes instrumentos, ajustando-se as funções polinomiais e linear, e obtendo os valores dos coeficientes de determinação (R^2). Os gráficos dos ajustamentos foram realizados com o Software SigmaPlot 11.0.

A partir destes gráficos, são disponibilizadas as equações como alternativa para monitoramento permanente da vazão. Estes valores obtidos pelas leituras dos instrumentos, quando substituídos nas equações (valores de X), em um determinado instante, obtêm-se o valor da vazão no sistema.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos na comparação dos valores observados e estimados foram avaliados de acordo com os indicadores estatísticos:

4.4.1 Coeficiente angular e linear

Os valores de vazão observadas foram comparados com os valores estimados, verificando o grau de exatidão, prevendo o comportamento dos dados.

A regressão linear $Y = a + b.X$, foi realizada entre os valores estimados (X) e os valores observados (Y), para obter os coeficientes de determinação (R^2), linear (b) e angular (a).

4.4.2 Índice de precisão

O índice de precisão (I_p), é uma medida estatística adaptada do Coeficiente de Correlação de Pearson, que permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (LIRA e NETO, 2006), e pode ser estimado pela Equação (1):

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E) \cdot (O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}} \quad (1)$$

Em que: E_i são os valores estimados, O_i são os valores observados, E é a média dos valores estimados e O é a média dos valores observados.

Segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) quanto mais próximo de 1, maior é o grau de dependência estatística linear entre as duas variáveis, e quanto mais próximo de zero os valores, a correlação apresenta menor força.

4.4.3 Índice de concordância

Através do Índice de Concordância (I_c), proposto por Willmott et al. (1985), será medido o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas. Para verificar o desempenho, os valores reais de vazão serão comparados com os valores obtidos pelos diferentes métodos, expresso na Equação (2):

$$I_c = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (2)$$

Em que: E_i é o valor da observação estimada, O_i é o valor da observação medida e O é a média da observação medida.

Segundo Pimenta (2017) valores que apresentam nenhuma concordância variam de zero, e perfeita concordância valores próximos de um.

4.4.4. Índice de desempenho

Para a avaliação do desempenho das vazões obtidas pelos métodos indiretos, foi utilizado o Índice de desempenho (I_d), proposto por Camargo e Sentelhas (1997),

cujo valor é o produto do Índice de concordância e Índice de precisão, conforme a Equação (3):

$$I_d = I_c \cdot I_p \quad (3)$$

O critério para interpretação para o índice de precisão, índice de concordância, e índice de desempenho, foram realizados através das suas respectivas classificações apresentadas na Tabela 2, conforme adaptação de Pimenta (2017).

Tabela 2 - Critério para interpretação do índice de concordância (I_c), índice de precisão (I_p), índice de desempenho (I_d) e suas respectivas classificações.

Índice de Concordância (I_c)	Índice de Precisão (I_p)	Índice de Desempenho (I_d)	Classificação
0,95 - 1,00	0,95 - 1,00	0,90 - 1,00	Excelente
0,89 - 0,95	0,89 - 0,95	0,80 - 0,90	Ótimo
0,84 - 0,89	0,84 - 0,89	0,70 - 0,80	Muito Bom
0,77 - 0,84	0,77 - 0,84	0,60 - 0,70	Bom
0,71 - 0,77	0,71 - 0,77	0,50 - 0,60	Moderadamente Bom
0,63 - 0,71	0,63 - 0,71	0,40 - 0,50	Moderado
0,55 - 0,63	0,55 - 0,63	0,30 - 0,40	Moderadamente Ruim
0,45 - 0,55	0,45 - 0,55	0,20 - 0,30	Ruim
0,32 - 0,45	0,32 - 0,45	0,10 - 0,20	Muito Ruim
0,00 - 0,32	0,00 - 0,32	0,00 - 0,10	Péssimo

Fonte: Adaptado de Pimenta (2017).

4.4.5 Raiz quadrática do erro médio (RMSE)

A RMSE proposto por Loague e Green (1991), indica o ajustamento dos dados. Seus valores são sempre positivos e variam de 0 a ∞ , onde valores mais próximos de zero demonstram o melhor ajuste. O mesmo pode ser calculado através da Equação (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Em que: O_i são os dados observados; S_i são os dados simulados; e n é o número de relações envolvidas.

4.4.6 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)

O NSE proposto por Nash e Sutcliffe (1970), demonstra o alinhamento dos dados em função da reta 1:1, cujo o cálculo é descrito na Equação (5):

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]} \quad (5)$$

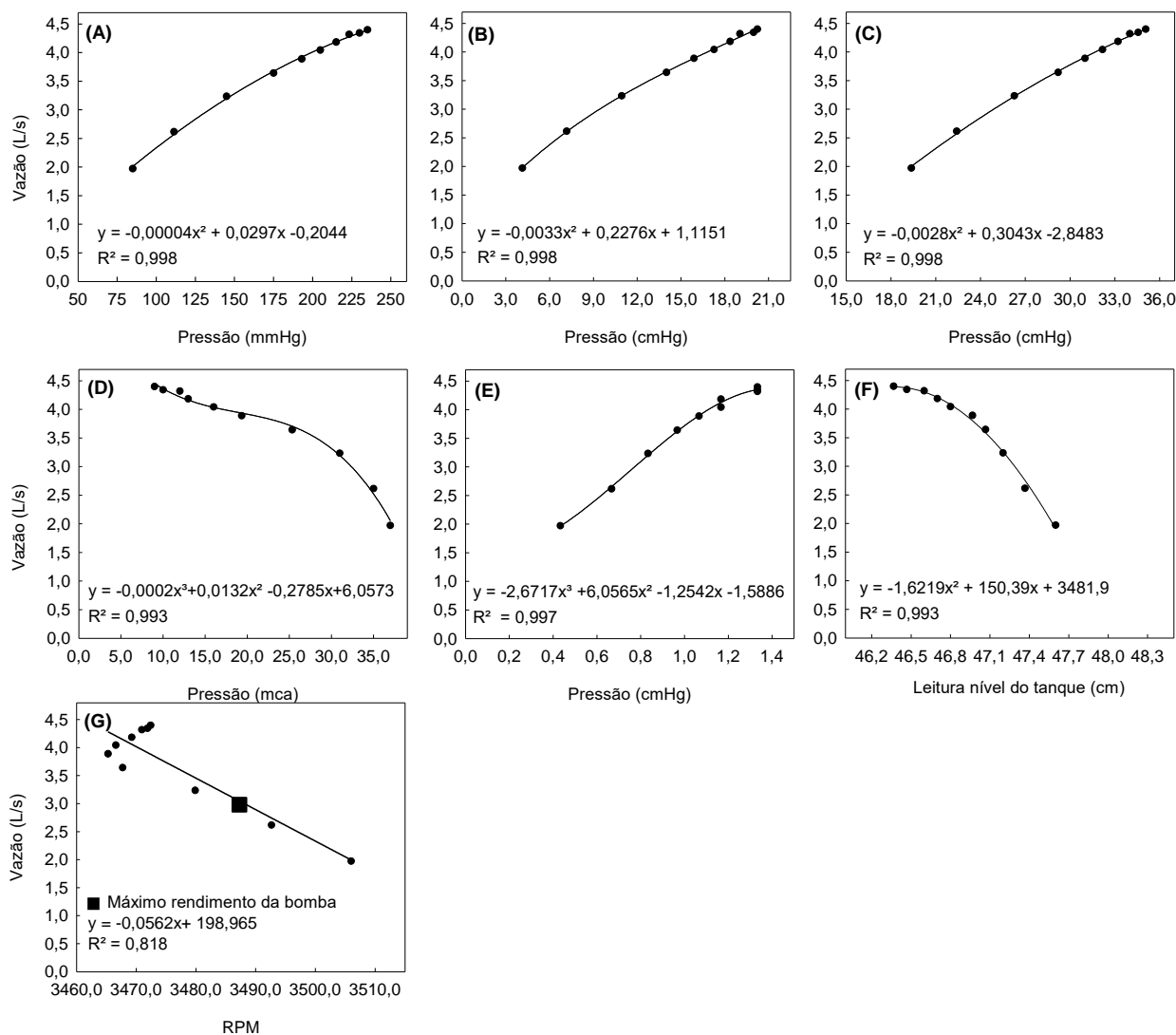
Em que: O_i são os dados observados; \bar{O} é a média dos dados observados; S_i são os dados simulados; n é o número de relações envolvidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AJUSTAMENTO DAS EQUAÇÕES

A partir dos dados coletados e devidamente analisados, é possível verificar através da vazão observada e as leituras fornecidas pelas diferentes metodologias, a confirmação da correlação que existe entre ambas, de acordo com a Figura 5.

Figura 4 - Correlação da vazão observada (hidrômetro) em função dos valores obtidos pelo Vacuômetro de Bourdon (A); Vacuômetro tubo em "U" (B); Tensiômetro (C); Manômetro metálico eletrônico (D); Manômetro diferencial (E); LNT (F) e Tacômetro (G).



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 4, que todas as metodologias empregadas apresentam característica como bons indicadores no controle permanente da vazão, demonstrando uma boa correlação com um ajustamento das equações em maior parte polinomiais, de 2º e 3º grau, com valores do coeficiente de determinação (R^2) variando de 0,993 a 0,998. Já o Tacômetro Figura 4 (G) ajustou-se a uma equação linear com $R^2 = 0,818$.

As metodologias baseadas no parâmetro pressão demonstraram uma melhor correlação em função da vazão observada, visualizados nas Figuras 4 (A), (B) e (C) com os valores mais altos de $R^2 = 0,998$. O Tacômetro Figura 4 (G), apesar de apresentar um R^2 considerado aceitável segundo Krause et al. (2005), foi a metodologia que apresentou menor correlação com a vazão entre as sete em estudo. Ainda na Figura 4 (G), é destacado o ponto de máximo rendimento da bomba que ocorre quando o eixo do motor atinge uma rotação de 3487,27 rpm, equivalente a uma vazão de 2,98 L/s. Nota-se, uma variação dos pontos de operação, sendo este conhecimento importante para a obtenção de um conjunto motobomba que venha a trabalhar no seu ponto de máximo rendimento. Moraes (2013) diz que a bomba centrífuga tem um ponto de trabalho de máximo rendimento, identificado pela vazão e altura manométrica, ajudando a proporcionar maior eficiência da bomba.

As equações dos respectivos ajustamentos, estão demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações de ajuste e suas respectivas metodologias empregadas para determinar a vazão através do monitoramento permanente.

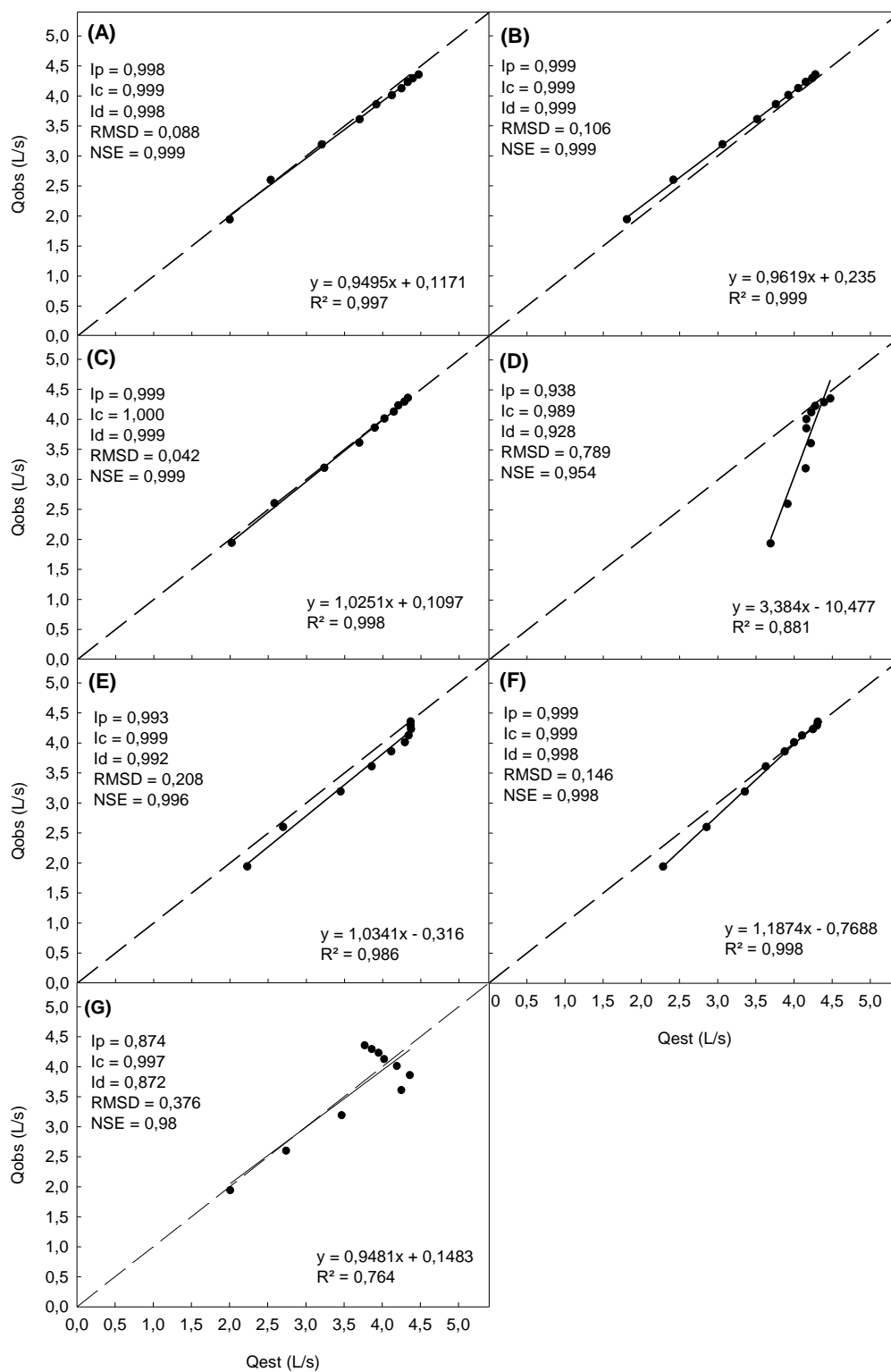
METODOLOGIA	EQUAÇÃO	R^2
Vacuômetro de Bourdon	$-0,00004x^2 + 0,0297x - 0,2044$	0,998
Vacuômetro de tubo em "U"	$-0,0033x^2 + 0,2276x + 1,1151$	0,998
Manômetro metálico eletrônico	$-0,0002x^3 + 0,0132x^2 - 0,2785x + 6,0573$	0,993
Tensiômetro	$-0,0028x^2 + 0,3043x - 2,8483$	0,998
Manômetro diferencial	$-2,6717x^3 + 6,0565x^2 - 1,2542x + 1,5886$	0,997
LNT	$-1,6219x^2 + 150,39x - 3481,9$	0,993
Tacômetro	$-0,0562x + 198,965$	0,818

Fonte: Autor.

5.2 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES

A Figura 5 mostra, na forma gráfica, a relação entre os valores de vazão observada (Q_{obs}) e estimada (Q_{est}) pelas diferentes metodologias, a partir de uma análise de regressão linear.

Figura 5 - Valores de Q_{obs} e Q_{est} para as diferentes metodologias empregadas; Vacuômetro de Bourdon (A); Vacuômetro de tubo em "U" (B); Tensiômetro (C); Manômetro metálico eletrônico (D); Manômetro diferencial (E); LNT (F) e Tacômetro (G).



Fonte: Autor.

Os resultados demonstram que a maioria dos valores de vazões estimadas pelas diferentes metodologias apresentaram tendência de subestimar os dados, para os equipamentos Vacuômetro de Bourdon, Manômetro metálico eletrônico, Manômetro diferencial, LNT e Tacômetro. Estes resultados demonstram valores menores que a vazão observada pelo hidrômetro, visualizados conforme o comportamento em relação a reta 1:1 partindo do eixo. Estes resultados se assemelham com os de Andrade et al. (2007), ao estimar a vazão utilizando diferentes sensores eletrônicos de pressão, obteve maiores vazões medidas pelo hidrômetro em relação aos valores estimados pelos sensores.

Observa-se na Figura 5, que os valores de R^2 variaram de 0,821 a 0,999 para as metodologias empregadas, significando um bom ajuste entre os dados, que segundo Krause et al. (2005) considera estes intervalos aceitáveis. Todavia, este coeficiente quantifica somente a dispersão, podendo alcançar bons resultados, porém, não especifica a diferença em subestimar e superestimar os resultados.

É possível observar que os valores obtidos de vazão nas Figura 5 (A) e (B) em relação à pressão de sucção se aproximam mais da reta 1:1. Observa-se na Figura 5 (C) que os valores observados na pressão de recalque representam um melhor indicativo no controle da vazão, com um coeficiente linear (a) de 0,1097 e um coeficiente angular (b) de 1,0251. Estes resultados se contrastam com os resultados de Canafístula et al. (2010) onde obteve um melhor indicativo do controle da vazão utilizando como monitoramento a pressão de sucção.

Na Figura 5 (D), observa-se o pior desempenho da regressão em função da reta 1:1, com valores de (a) e (b) de 10,477 e 3,384, respectivamente. Esta metodologia, comparada as demais, não é aconselhada para a determinação de vazões baixas de acordo com o sistema em estudo, pois demonstra um melhor comportamento em vazões maiores a partir de 4,161L/s.

Nota-se na Figura 5 (E) e (F) o comportamento da regressão na reta 1:1, com valores do coeficiente angular (a) e linear (b) também próximos de zero e um, respectivamente. Estes resultados demonstram também um ótimo comportamento dos valores estimados em relação aos observados, servindo como indicativo na determinação da vazão da vazão.

Já na Figura 5 (G) observa-se que os valores da vazão estimada apresentaram um comportamento bem próximos da reta 1:1, todavia, nota-se a dispersão dos

pontos, demonstrando a discrepância dos valores estimados em função dos observados, conforme a distribuição dos pontos na análise de regressão.

Verificou-se que os valores do índice de precisão (I_p) apresentaram valores maiores que 0,9, evidenciando que existe uma forte correlação entre os dados estimados com os observados. Em maior parte, o desempenho dos instrumentos Vacuômetro de Bourdon, Vacuômetro de tubo em “U”, Tensiômetro e a Leitura do nível do tanque deu-se por “Excelente”, variando apenas para o Manômetro metálico eletrônico e o Tacômetro, que obtiveram uma classificação “Ótimo” e “Muito bom”, respectivamente, de acordo com a classificação na Tabela 2.

Os valores do índice de concordância (I_c) variaram entre 0,90 a 1,00, aproximadamente. Este índice demonstra uma elevada concordância entre os valores estimados e observados, onde todos os equipamentos apresentaram uma classificação “Excelente”.

Para o índice de desempenho (I_d) todas as metodologias apresentaram valores com classificação “Excelente”, com exceção ao Tacômetro que apresentou valor de $I_d = 0,872$ classificando o mesmo como “Ótimo”.

A RMSD demonstrou para as metodologias empregadas valores que variaram de 0,042 a 0,789. Segundo Loague & Green (1991) os valores para este indicador variam de 0 a ∞ , e quanto mais próximos de 0, melhor o ajustamento dos dados. Com relação a isso, podemos observar que os três melhores ajustamentos foram obtidos no Tensiômetro, Vacuômetro de Bourdon e Vacuômetro de tubo em “U”, apresentando valores mais próximos de 0 comparado as demais metodologias. A metodologia na qual demonstrou menor ajuste foi o Manômetro metálico eletrônico seguido do Tacômetro, com valores de $RMSD = 0,789$ e $0,376$, respectivamente.

Segundo Silva et al. (2018) o NSE representa o alinhamento dos dados em relação ao gráfico 1:1 de dispersão, demonstrando seu comportamento e desempenho. Este indicador variou de 0,954 a 0,999 para as metodologias, com os valores maiores de 0,999 para o Vacuômetro de Bourdon, Manômetro de tubo em “U” e o Tensiômetro. Moriasi et al. (2007) relatam que os valores deste indicador variam de $-\infty$ a 1,0, onde entre 0 a 1,0 classifica o desempenho como aceitável e 1,0 o valor ótimo. Isso demonstra que as metodologias citadas anteriormente apresentaram o melhor alinhamento referente a reta 1:1 e um desempenho muito bom quando comparada as demais.

Como um dos propósitos deste estudo, realizou-se o levantamento de custo para adquirir e/ou confeccionar os instrumentos empregados, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Custo para adquirir ou construir os instrumentos utilizados para a determinação da vazão.

INSTRUMENTO	CUSTO (R\$)
Vacuômetro de Bourdon	120,00
Vacuômetro de tubo em “U”	750,00
Manômetro metálico eletrônico	1.000,00
Tensiômetro	750,00
Manômetro diferencial	850,00
Leitura nível do tanque (LNT)	50,00
Tacômetro	500,00

Fonte: Autor.

De modo geral, é possível observar que alguns instrumentos apresentam um custo inicial significativo, o que poderia se tornar uma desvantagem para o consumidor adquiri-lo.

As empresas prestadoras de assistência técnica que realizam medições de vazões em sistemas de bombeamento de água, não deixam uma forma de monitoramento permanente ao consumidor. Neste sentido, há a necessidade de prestar a assistência técnica regular ao consumidor toda a vez que se deseja determinar a vazão. Assim, em termos gerais, o custo do serviço saíra alto. Quando as empresas possuem para venda equipamentos próprios que estimam e monitoram o fluido, apresentam custo elevado, tornando-se em maior parte inviável para o consumidor, principalmente aos pequenos produtores.

Estes equipamentos em estudo, apesar do custo inicial em maior parte deles, não haveria a necessidade periódica de uma nova assistência para estimar a vazão, visto que, ao adquiri-los o produtor terá seu próprio equipamento, podendo estimar a vazão do seu sistema. Além disso, o produtor irá demandar uma nova assistência técnica apenas em caso de algum equipamento necessitar manutenção.

Com relação aos custos, nota-se que o manômetro metálico eletrônico demonstrou ser um dos instrumentos com menor desempenho, apresentando o custo mais elevado de R\$1.000,00 em comparação aos demais. Já os instrumentos que

demonstraram o melhor desempenho geral na estimativa da vazão, foram o tensiômetro, vacuômetro de Bourdon e o vacuômetro de tubo em “U”.

Ademais, nota-se que os instrumentos citados anteriormente além do melhor desempenho geral na determinação da vazão, apresentam valores para aquisição que variam de R\$120,00 a R\$750,00 reais, considerados um custo baixo em relação aos demais. Em comparação ao medidor ultrassônico, mais comumente utilizado em sistemas de bombeamento de água, na irrigação, o custo torna-se viável pois, este equipamento pode chegar a valores elevados, por exemplo, de R\$10.000,00, podendo variar este valor, dependendo das especificações do equipamento.

Portanto, conforme o desempenho de cada metodologia, considerando o custo de aquisição, mais o custo de instalação conforme o responsável técnico, o produto torna-se viável para o consumidor final.

6. CONCLUSÃO

Diante do presente estudo, considerando as metodologias empregadas para determinar a vazão em sistemas de bombeamento, pode-se concluir que:

- ✓ As metodologias que demonstraram o melhor desempenho geral na determinação da vazão, foram o Tensiômetro, Vacuômetro de Bourdon e Vacuômetro de tubo em “U”, respectivamente. Além disso, elas apresentam vantagens comparada às demais, com relação ao custo de aquisição.
- ✓ Existem equipamentos que medem a vazão e disponibilizam essas informações de modo permanente e apresentam elevado grau de exatidão como o Vacuômetro de Bourdon, Vacuômetro de tubo em “U” e o Tensiômetro.
- ✓ O controle permanente da vazão pode ser realizado monitorando a variação da medida de pressão, tanto na entrada quanto na saída do sistema.
- ✓ As metodologias utilizadas confirmam a determinação da vazão indiretamente, conforme os resultados alcançados para o respectivo sistema em uso.
- ✓ Em seu próprio sistema, o produtor poderá aplicar a metodologia desenvolvida, possibilitando assim, determinar e monitorar a vazão da sua propriedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; BROCKWAY, C. E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.110, n. 2, p. 99-106, 1984.

ALVES, W. W. A. de A. et al. Variabilidade espacial de vazão e pressão em subunidade de microaspersão com emissores usados e novos. **Ambiente & Água- An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 3, 2008.

ALVES JÚNIOR, J., et al. Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas de soja, milho e tomate. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 22, n. 1, 2018.

AL ZAYED, I. S. et al. Satellite-based evapotranspiration over Gezira Irrigation Scheme, Sudan: A comparative study. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 66-76, 2016.

AMARAL, L. G. H. et al. Desenvolvimento de um regulador automático de vazão para condutos livres. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 17, n. 4, p. 303-316, 2009.

AMORIM, E. L. et al. Equação da continuidade aplicada ao Cálculo de Vazão do igarapé São Lourenço do Município de Cantá. **Revista Multidisciplinar Pey Këyo Científico**, v. 2, n. 2, 2017.

ANDRADE, C. L. T. et al. Desenvolvimento e avaliação de dispositivos de controle de vazão derivada em canais de irrigação. **Irriga – Botucatu**. v. 12, n. 4, p. 439-445, 2007.

ARMINDO, R. A. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema automatizado de aquisição de dados para medição de vazão, “Auto-Venturi”. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 5. 2011.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8 ed., São Paulo: Blucher, 1998.

AZEVEVO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Bucher, 632p. 2015.

BO, Y.; LI, C. Electronic circuit design for reciprocal operation of transit-time ultrasonic flow meters. **Flow measurement and instrumentation**, v. 32, p. 5-13, 2013.

CAMARGO, A. P. Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPÊLO, A. R. et al. Avaliação de sistemas de irrigação por aspersão em malha em áreas cultivadas com capim-braquiária. **Revista AGROTEC–v**, v. 35, n. 1, p. 1-12, 2014.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação na agricultura familiar. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 205-214, 2018.

CANAFÍSTULA, F. J. F. et al. Investigação de variável adequada ao controle automático de vazão sem uso de sensores em campos irrigados por meio de análise multivariada. **Ciência Rural**, v. 40, n. 11, p. 2317-2323, 2010.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

COELHO, E. F. et al. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2006.

DE OLIVEIRA PAULINO, M. A. et al. Avaliação da uniformidade e eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão convencional. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada - RBAI**, v. 3, n. 2, p. 48 – 54, 2009.

DERAKHSHAN, S.; NOURBAKHS, A. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 3, p. 800-807, 2008.

DO NASCIMENTO, A. K. S. et al. Desempenho hidráulico e manejo da irrigação em sistema irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada- RBAI**, v. 3, n. 1, p. 39 – 45, 2009.

ELTAIB, K. A.; TANAKAMARU, H.; TADA, A. Estimation of actual e vapotranspiration in gash delta, sudan using a satellite-based energy balance model. **International Water Technology Journal, IWTJ**. v. 2, n.1, 2012.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**. V. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. et al. Construção e calibração de um manômetro de leituras digital microprocessado. **Irriga - Botucatu**, v. 11, n.4, p. 492 - 499, 2006.

- FRACASSO et al. Metodologia para a seleção de um medidor de vazão de líquidos. Assuntos Técnicos. 19 de jul. de 2016. Disponível em: <<https://consuliteengenheiroeletronico.com/2016/07/19/metodologia-para-a-selecao-de-um-medidor-de-vazao-de-liquidos/>>. Acesso em 12 de dez. 2019.
- GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012. 189p.
- GREEN, S. R.; KIRKHAM, M. B.; CLOTHIER, B. E. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 86, n. 1-2, p. 165-176, 2006.
- GUIMARÃES, A. B. Medidor de vazão proporcional para a quantificação do consumo de água na irrigação. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- HE, H. B. et al. Rice root system spatial distribution characteristics at flowering stage and grain yield under plastic mulching drip irrigation (PMDI). **J Anim Plant Sci**, v. 24, n. 1, p. 290-301, 2014.
- HEINER, B.; BARFUSS, S. L.; JOHNSON, M. C. “Conditional assessment of flow measurement accuracy.” **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 137, n. 6, p. 367–374, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000309).
- KRAUSE, P. et al. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences** v.5, p.89–97, 2005.
- LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de Pearson. **Revista Ciência & Engenharia**, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, 2006.
- LOZOYA, C. et al. Model predictive control for closed-loop irrigation. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 4429-4434, 2014.
- LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and Graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models: Overview and Application. **Journal of Contaminant Hydrology**, 7, 51-73, 1991.
- LUDWIG, R. et al. Comparação entre metodologias para estimativa de vazão em canal de irrigação no arroio Chasqueiro/RS. **IRRIGA**, v. 19, n. 1, p. 94, 2014.
- MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. de M. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos. **Rev. Ambiente & Água**, v. 10, n. 2, p. 402 - 412, 2015.
- MEDEIROS, K. A. R.; BARBOSA, C. R. H.; DE OLIVEIRA, E. C. Non-intrusive method for measuring water flow rate in pipe. **Periódico Tche Química**, v. 14, n. 27, p. 44-50, 2017.

- MORAES, J. M. Racionalização do uso de energia elétrica no bombeamento de água em sistemas de irrigação. 2013, 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.
- MORIASI, D. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MORRISON, J.; FRIEDLER, E. A critical review of methods used to obtain flow patterns and volumes of individual domestic water using appliances. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 4, p. 328-343, 2015.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282 - 290, 1970.
- PALADINO, E. E. Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial. 2005. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.
- PIMENTA, B. D. Análise de formulações explícitas do coeficiente de perda de carga em condutos pressurizados. 2017. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. 2017.
- PIMENTA, B. D. et al. Desempenho do medidor ultrassônico de vazão em diferentes tubos de policloreto de vinila. **Irriga** v. 23, n. 1, p. 87-95, 2018.
- PÉREZ-URRESTARAZU, L. P.; BURT, C. M. Characterization of pumps for irrigation in central California: Potential energy savings. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 138, n. 9, p. 815-822, 2012.
- PUERTO, P. et al. Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage. Water relations and yield. **Agricultural water management**, v. 126, p. 33-45, 2013.
- RAPUR, J. S.; TIWARI, R. Experimental fault diagnosis for known and unseen operating conditions of centrifugal pumps using MSVM and WPT based analyses. **Measurement**, v. 147, p. 106809, 2019.
- RODRIGUES, W. Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de água. 2007. 208 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas/SP, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2007.
- ROSSO, R. B.; et al. Medidor de vazão proporcional para quantificação do consumo de água na irrigação. **Tecnologia & Ciência Agropecuária.**, João Pessoa, v. 7, n. 3, p. 59-64, set. 2013.

SABINI, E. P.; LORENC, J. A. Determining centrifugal pump suction conditions using non-traditional method. U.S. **Patent** n. 6,564,627, 20 maio 2003.

SALEMI, L. F. Medições de vazão: diretas ou indiretas? 17 de nov. de 2014. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/medicoes-de-vazao-diretas-ou-indiretas/127041>>. Acesso em 7 de agosto de 2019.

SILVA, C. A. da; SILVA, C. J. da. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, ano 4, n. 8, 2005.

SILVA, V. P. R. et al. Calibration and validations of the AquaCrop model for the soybean crop grow under diferente levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 1, 2018

SOUSA, M. B. A. et al. Manejo da irrigação na cafeicultura irrigada por pivô central nas regiões norte do Espírito Santo e extremo sul da Bahia. **Bioscience Journal**., Uberlândia, v. 27, n. 4, p. 581-590, 2011.

STOKER, D. M.; BARFUSS, S. L.; JOHNSON, M. C. Ultrasonic flow measurement for pipe installations with nonideal conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 138, n. 11, p. 993-998, 2012.

TAMAGI, J. T. et al. Spatial variability of the water depth applied by fixed sprinkler irrigation systems. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 2, p. 188-196, 2018.

VÁSQUEZ, J. D. H. et al. An alternative gravimetric measurement standard for calibration of liquid flow meters. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 58, p. 87-96, 2017.

WANG, Z. et al. Accuracy improvement of virtual pump water flow meters using calibrated characteristics curves at various frequencies. **Energy and Buildings**, v. 191, p. 143-150, 2019.

WILMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WU, D; CUI, Y; LUO, Y. Irrigation efficiency and water-saving potential considering reuse of return flow. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 519-527, 2019.