

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

**Medição de intensidade de precipitação e estimativa de uniformidade  
de aplicação de água na irrigação por aspersão por meio do princípio  
piezoelétrico**

**Elizabeth Lima Carnevskis**

Tese apresentada para a obtenção do título de  
Doutora em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba  
2023**

**Elizabeth Lima Carnevskis**  
**Bacharela em Meteorologia**

**Medição de intensidade de precipitação e estimativa de uniformidade de aplicação de  
água na irrigação por aspersão por meio do princípio piezoelétrico**  
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **FERNANDO CAMPOS MENDONÇA**

Tese apresentada para a obtenção do título de  
Doutora em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba**  
**2023**

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

Carnevskis, Elizabeth Lima

Medição de intensidade de precipitação e estimativa de uniformidade de aplicação de água na irrigação por aspersão por meio do princípio piezoelétrico / Elizabeth Lima Carnevskis. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011 - -Piracicaba, 2023.

84 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Irrigação 2. Avaliação da distribuição de água 3. Automação 4. Uniformidade de aplicação I. Título

### **Dedicatória e Oferecimentos**

Ao meu fofinho S2. Eu posso ter muitos amores, mas somente um fofinho.  
Dedico,

Ofereço esse trabalho a todos aqueles que acreditaram em mim, desde sempre.  
Ofereço,

## AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, por mais uma vez me dar a oportunidade de realizar um curso em sua instituição

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior - CAPES, pela concessão da bolsa, sem a qual a realização deste estudo seria inviável.

Ao Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça, pela orientação, suporte e a dedicação em transformar essa que escreve em uma profissional melhor.

Ao Prof. Dr. José Antônio Frizzone, corresponsável por esse trabalho e por acreditar nele.

Aos Prof. Dr. José Antônio Frizzone, Micael Amore Cecchini e Dr. Thiago Alberto Cabral da Cruz, pelas sugestões e correções, feitas durante a qualificação.

Aos meus irmãos de orientação, principalmente as “Mendoncinhas”.

Aos meus colegas de pós-graduação, com ênfase a Ailson, Alex e, principalmente Angelo, que ajudaram na construção deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas: Seu Antônio, Davilmar, Fernanda, Fernando, Beatriz, Alexandre, Áureo, Juarez, Luciane, Seu Luiz, Chicão, Gilmar e Paulinha.

Aos meus irmãos de infância, Jeferson Alves Matos e Ivan Carlos Torquato, que depois de tanto tempo, ajudaram a curar e fortalecer meu corpo para eu continuar com meus estudos.

E ao meu amigo, companheiro de vida, mecânico, cozinheiro... Diógenes Pereira de Lemos.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2 HIPÓTESES.....	11
3 OBJETIVOS.....	13
3.1 Geral.....	13
3.2 Específicos.....	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	15
4.1 Agricultura e suas revoluções.....	15
4.2 Brasil e a produção agrícola.....	16
4.3 Sistemas de irrigação por aspersão.....	17
4.4 Avaliação da uniformidade de distribuição de água.....	18
4.4.1 Métodos padrão de avaliação de uniformidade em aspersores.....	19
4.5 Tentativas de métodos alternativos de avaliação.....	20
4.6 Estudos das gotas.....	21
4.7 Técnicas de medição de gota de chuva.....	23
4.7.1 Equipamentos disponíveis no mercado.....	23
4.7.2 Os disdrômetros.....	25
4.8 Princípio piezoelétrico.....	28
4.8.1 Definição.....	28
4.8.2 Efeito piezoelétrico direto.....	29
4.8.3 Efeito piezoelétrico inverso.....	29
4.8.4 Materiais piezoelétricos.....	30
Referências.....	33
5 MATERIAL E MÉTODOS GERAL.....	41
6 VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM DISPOSITIVO DE AUTODIAGNOSE EM TESTES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO.....	43
Resumo.....	43
Abstract.....	43
6.1 Introdução.....	44
6.2 Material e Métodos.....	44
6.3 Resultados.....	46

6.4 Conclusões.....	51
Referências.....	52
7 DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO NA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO.....	57
Resumo.....	57
Abstract.....	57
7.1 Introdução.....	57
7.2 Material e Métodos.....	58
7.2.1 Localização e caracterização do local de estudo.....	58
7.2.2 Descrição básica do experimento.....	58
7.2.3 Construção do dispositivo e seus componentes.....	60
7.3 Resultados e Discussão.....	66
7.3.1 Relação entre a massa de água e o número de gotas.....	66
7.3.2 Relação entre a massa de água e a tensão.....	67
7.3.3 Relação entre a tensão e as alturas.....	67
7.3.4 Volume constante.....	69
7.3.5 Comparação entre volume coletado do aspersor com a tensão do piezoelétrico.....	69
7.4 Conclusões.....	73
Referências.....	73
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
APÊNDICE.....	77

## RESUMO

### **Medição de intensidade de precipitação e estimativa de uniformidade de aplicação de água na irrigação por aspersão por meio do princípio piezoelétrico**

Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma metodologia para avaliar sistemas de irrigação de forma automatizada. Para isso ele foi dividido em duas partes: uma avaliação econômica, onde se descreve quanto custaria a suposta implantação de um sistema automatizado utilizando o princípio piezoelétrico em um pivô de grande porte, em comparação com os valores das avaliações convencionais. Uma segunda parte, onde foram feitas comparações para que pudessem ser estabelecidas relações entre massas de água e tensão, utilizando um dispositivo piezoelétrico e a relação de densidade da água. Na primeira parte, chegou-se à conclusão de que a implantação de um futuro sistema automatizado de avaliação é mais vantajoso economicamente quando comparado às avaliações realizadas por um corpo técnico especializado ou feita pelo proprietário do pivô. Na segunda parte, obteve-se relações entre massas e volumes de água, com frequências emitidas por um sensor piezoelétrico.

Palavras-chave: Irrigação, Avaliação da distribuição de água, Automação, Uniformidade de aplicação



## ABSTRACT

### **Measurement of rainfall intensity and estimation of water application uniformity in sprinkler irrigation using the piezoelectric principle**

This work aimed to build a methodology to evaluate irrigation systems in an automated way. For this, it was divided into two parts, an economic evaluation, which describes how much the supposed implementation of an automated evaluator using the piezoelectric principle in a large pivot is described, in comparison with the values of conventional evaluations. A second part, where comparisons were made so that relationships between water volumes and tension could be established, using a piezoelectric device and the water density relationship. In the first part, it was concluded that the implementation of a future automated evaluation system is more economically advantageous compared to evaluations carried out by a specialized technical body or made by the owner of the pivot. In the second part, relations between masses and volumes of water were obtained, with frequencies emitted by a piezoelectric sensor.

Keywords: Irrigation, Evaluation of water distribution, Automation, Application uniformity

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Desabastecimento de água e crises hídricas são assuntos recorrentes nas principais agências de notícias (Jornal da USP, 2021). Alguns setores representantes da sociedade apontam para a Agricultura como responsável pelo mau uso da água, alegando desperdícios ao longo de toda a cadeia produtiva, principalmente com relação à irrigação (AGÊNCIA SENADO, 2019; IPEA, 2020).

Publicações muito difundidas mostram gráficos exemplificando que 70% da água é destinada à irrigação e os outros 30% ao consumo humano e às indústrias (BRITO et al., 2007). Porém, o emprego de tecnologias de monitoramento e reuso vem modificando o quadro geral de uso da água pela agricultura (IPEA, 2020; ANA, 2021). Levantamentos atualizados mostram uma realidade diferente no Brasil: a agricultura consome 59,8% da água captada no País, com 49,8% da água destinada à irrigação e 10% a outras atividades agrícolas, e o restante (40,2%) vai para os outros setores (indústria, abastecimento humano, geração de energia e mineração) (ANA, 2021), mostrando uma proporção diferente do uso da água na agricultura brasileira.

Mesmo assim, existe um potencial de aumento da eficiência de irrigação que propiciaria redução no consumo ou aumento da área irrigável. O Brasil possui 8,4 milhões de hectares (Mha) de área irrigada (ANA, 2021). O potencial efetivo de expansão é de 13,7 Mha, um crescimento projetado de 163%. Essa expansão ainda é relativamente lenta, considerando-se a área agrícola atualmente utilizada (66 Mha), a área agrícola total (cerca de 300 Mha) e a extensão territorial do País (852 Mha) (IBGE (2018)), e o conjunto de fatores físico-climáticos desfavoráveis, tais como a má disponibilidade hídrica no território nacional (ANA, 2021). Com a irrigação, essa má distribuição pode ser amenizada. O suprimento de água pode ser feito com diferentes métodos e os principais são: superfície (inundação, faixas e sulcos), aspersão (convencional, carretel enrolador, pivô central e sistema linear), localizada (microaspersão e gotejamento superficial) e subterrânea (gotejamento subsuperficial e subirrigação com fechamento de sistema de drenagem). No Brasil, o método mais utilizado é a aspersão (ANA, 2021).

Existem diversas soluções disponíveis que reduzem o trabalho manual na irrigação, com atividades automatizadas em praticamente todo o processo (NETAFIM, 2021; JAIN, 2021; ELECTRONOBO, 2021; VALLEY, 2022; LINDSAY, 2022; RAINBIRD, 2022). Porém, a aferição de desempenho dos equipamentos de irrigação (uniformidade de distribuição de água) ainda é feita de forma manual, com a instalação de hastes metálicas e coletores de plástico ou metal distribuídos no campo ao longo da área irrigada. Os testes de avaliação de uniformidade de aplicação requerem horários específicos para serem realizados (ISO 15886-3, 2012 e ABNT. NBR/ISO 11544, 2016; AZEVEDO, 2000; CARRIÓN et al., 2001), consumindo muito tempo e apresentando custo elevado.

Vários fatores interferem na uniformidade de distribuição de água dos sistemas por aspersão, como ventos fortes ou alguma obstrução nos aspersores (AZEVEDO, 2000), mascarando possíveis desperdícios de água. Esses aspectos podem tornar a avaliação do sistema de irrigação um trabalho

dispendioso e de longa duração. Além disso, às vezes não é possível a realização da avaliação sob as condições operacionais e ambientais desejadas (CARRIÓN et al.; 2001).

Visando aperfeiçoar os testes de avaliação de uniformidade de distribuição, neste estudo propõe-se o desenvolvimento de um novo método para realizar a avaliação da uniformidade de distribuição de água por sistemas de irrigação por aspersão. O novo método baseia-se em dispositivos que utilizam o princípio de pulsos piezoelétricos. Tal princípio é amplamente utilizado na meteorologia, usando disdrômetros (KATHIRAVELU, 2016), para a medição de precipitação, por ser preciso e apresentar um custo significativamente menor em relação a outros métodos de medida.

## **2. HIPÓTESES**

É possível utilizar piezoelétricos para medir frequências de gotas e, posteriormente, registrar dados de intensidade de precipitação. E assim desenvolver métodos alternativos, aos atualmente aplicados, para a avaliação da uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação, com formas mais eficientes, rápidas e economicamente viáveis.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Geral**

Desenvolver um novo método de avaliação para medição de intensidade de precipitação, e um novo método de avaliação da uniformidade de distribuição para sistemas de irrigação.

#### **3.2 Específicos**

- a) Estudar as propriedades das partículas de água emitidas por um sistema de irrigação durante seu funcionamento, analisando fatores como volume e tamanho de gotas, e fazer a análise distributiva delas.
- b) Elaborar um método de conversão da frequência de partículas de água em frequência de pulsos elétricos (Hertz [Hz]), variando de acordo com a massa de cada partícula, utilizando o princípio piezoelétrico.
- c) Executar o processo de análise dos pulsos elétricos em dados brutos e obter os primeiros dados relativos à eficácia do método em sistemas de irrigação.
- d) Desenvolver, em laboratório, um método de coleta e processamento de dados para avaliação da uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação.
- e) Avaliar e comparar o novo método com o método tradicional de avaliação da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão.



## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

### 4.1 Agricultura e suas revoluções

Uma lavoura é um ambiente controlado; caso a deixemos em pousio, ela voltará ao seu estado natural (MAZOYER E ROUDART, 2006). Caso isso ocorresse em grande parte da área cultivada, não conseguiríamos alimentar os oito bilhões de pessoas no planeta; daí a necessidade de constante vistoria e manutenção (USCB, 2021). Para conseguirmos alimentar, vestir e locomover essa população, a agricultura sempre se aprimora e passa por evoluções, e as principais são brevemente descritas a seguir.

Os primeiros indícios da domesticação de plantas surgem entre onze mil e cinco mil anos atrás, numa área próxima ao Oriente Médio; os homens passaram de coletores a plantadores de culturas como trigo, oliveira, videira e cevada. Em outras localidades, como na China e América, as culturas do arroz, da batata e do milho começaram a ser cultivadas, independentemente, entre oito mil e cinco mil anos atrás (HARARI, 2016).

A segunda revolução surge por volta de 1300 anos atrás, quando povos árabes começam o cultivo irrigado, com água retirada dos corpos d'água ou extraída de águas subterrâneas rasas (MAZOYER E ROUDART, 2006).

A terceira revolução na agricultura surge junto com a primeira revolução industrial, com o início da mecanização no campo e o transporte de alimentos para as cidades (NUVOLARI E RICCI, 2013). Essa revolução surge como uma resposta à diminuição da mão de obra no campo, que começa a se deslocar para as cidades e ocasiona um aumento de demanda por alimentos nas mesmas, que por sua vez gera a necessidade de aumento da produtividade, das culturas e da própria mão de obra (KELLY E GRADA, 2013).

A quarta revolução, chamada Revolução Verde, começou há 60 anos (PINGALI, 2012). Nela, as mais altas tecnologias disponíveis na época começaram a ser implementadas no campo (HAZELL, 2009), possibilitando o alto rendimento no mesmo. Seleção de cultivares e sementes de alto rendimento, uso de agroquímicos e adoção de métodos científicos no cultivo foram algumas das práticas adotadas (FARMER, 1986).

A quinta revolução se deve ao uso de tecnologias computacionais na agricultura a partir dos anos 60, com o uso de dispositivos para monitoramento remoto do campo, como os satélites, com fins de avaliação permanente dos recursos e da produção (MARTOS *et al.*, 2021).

As novas tecnologias da Revolução Verde não se distribuíram uniformemente em todos os países. Em países desenvolvidos, houve grandes avanços tecnológicos, mas nos países em desenvolvimento tais avanços limitaram-se a poucos tipos de cultura (MAZOYER E ROUDART, 2006). No Brasil, por exemplo, permitiu a expansão de monoculturas de grande valor econômico como milho e soja.



#### 4.2 Brasil e a produção agrícola

Atualmente, no Brasil, as monoculturas com as maiores produções são: soja, milho, cana de açúcar, arroz e café. Suas respectivas quantidades produzidas estão listadas na Tabela 1.

**Tabela1:** Principais culturas do Brasil, e suas quantidades produzidas no ano de 2019

Cultura	Quantidade produzida
Soja*	124.844,8
Milho*	102.586,4
Cana de Açúcar*	654.527,8
Arroz*	11.183,4
Café**	63.077,9

\* em mil toneladas      \*\*em mil sacas beneficiadas (1 saca = 60 kg de café grão)

Fonte: CONAB (2019).

A água é fundamental para que essas culturas se desenvolvam plenamente. A quantidade específica varia de acordo com a idade fenológica da planta, sua cultivar, o local de plantio e outros fatores (MONTEIRO, 2009). Carnevskis (2016) compilou uma série de dados climáticos de 27 Zonas Agroclimáticas Homogêneas (ZAHs) brasileiras e observou que o Brasil apresenta uma distribuição desuniforme de chuvas, tanto espacial e quanto temporalmente. No trabalho, a autora apresentou a irrigação como possível solução para sanar essa desuniformidade de distribuição.

A irrigação pode ser feita com diferentes métodos e sistemas, e os principais são: superfície (inundação, faixas e sulcos), aspersão (convencional, carretel enrolador, pivô central e sistema linear), localizada (microaspersão e gotejamento superficial) e subterrânea (gotejamento subsuperficial e subirrigação com fechamento de sistema de drenagem) (ALLEN *et al.*; 1998). No Brasil, o método mais utilizado é a aspersão (ANA, 2021), que é o alvo do presente estudo.

Os principais tipos de sistemas por aspersão são: (a) convencional, no qual os aspersores podem ser fixos ou movidos pelo campo, mas com posição fixa durante a aplicação; (b) sistemas mecanizados, nos quais os aspersores são instalados em estruturas que se movem pela área de cultivo (ALLEN *et al.*; 1998), tais como o autopropelido e o pivô central. Os pivôs centrais ocupam 20% da área irrigada no Brasil (ANA, 2017). Para verificar que esses sistemas tenham bom desempenho são necessárias constantes avaliações. Para isso, existem os testes de uniformidade de aplicação de água.

As normas da ABNT para testes de uniformidade de aplicação (ISO 15886-3, 2012; ABNT NBR/ISO 7749-1, 2000) estabelecem padrões de trabalho para que os testes sejam válidos, tais como o diâmetro e a altura de instalação de coletores, a medição da evaporação ocorrida durante o teste e a leitura de dados, a distância mínima e máxima entre coletores e a duração do teste, entre outros

detalhes. Isto faz com que os testes tenham longa duração, devido ao tempo necessário para instalação, coleta de água, leitura de dados e recolhimento do equipamento no campo.

Campêlo *et al.* (2014) avaliaram seis aspersores em dois piquetes de pastagem (aproximadamente 0,04 ha cada), com o objetivo de analisar a uniformidade de aplicação do sistema de irrigação ao qual os aspersores pertenciam. Os autores informaram que foram necessárias duas avaliações, com duração de quatro horas cada (total de oito horas de medições), sem contar o tempo de instalação e desmontagem dos equipamentos após os testes. Logo, um avaliador demoraria ao menos um dia para conseguir avaliar esse campo. Levando em consideração que a atual média brasileira de área irrigada com algum tipo de sistema é de 28,5 ha (IBGE-SIDRA, 2017), o tempo e o custo estimados para avaliar a uniformidade de distribuição em tais propriedades seriam altíssimos, praticamente inviabilizando a realização dos testes.

No caso de pivôs centrais, o tempo gasto em uma avaliação depende de dois fatores: (a) comprimento da linha lateral (tubulação aérea, suspensa sobre as torres); e (b) o tempo de avaliação, que deve ser igual à metade do tempo normal de funcionamento do sistema, por posição, durante as irrigações (BERNARDO *et al.*, 2009). Uma equipe de duas a três pessoas dificilmente conseguiria fazer mais de dois testes em um dia. Situação semelhante é observada em testes com autopropelidos e similares.

Além disso, para garantir níveis adequados de exatidão e precisão, os testes devem ser feitos preferencialmente antes do nascer ou após o pôr do Sol, para reduzir a influência do vento e da evaporação de água dos coletores. Isso reduz a capacidade operacional diária e demanda muita mão de obra devido à baixa produtividade desse trabalho. Por isso, é comum que os sistemas de irrigação por aspersão não sejam avaliados com a devida frequência.

### 4.3 Sistemas de irrigação por aspersão

Segundo Frizzone *et al.* (2018), um sistema de irrigação por aspersão consiste num conjunto de tubulações pressurizadas para distribuir água pelo campo onde a cultura esteja localizada, e a aplicação de água se dá através de pequenos orifícios ou bocais de aspersão, de modo que a água saia em forma de jato. Esses orifícios são distribuídos de forma que a água seja aplicada do modo mais uniforme possível em toda a área.

Dentre os sistemas por aspersão destaca-se o pivô central. No Brasil, esse tipo de equipamento ocupa uma área de 1600000 hectares e representa 67% da área total irrigada. O pivô central pode ser utilizado em várias culturas, principalmente cereais, frutíferas e hortaliças. Sua utilização pode ser parcial ou totalmente automatizada, utiliza emissores (*sprayers*) de baixa pressão (6 a 20 PSI<sup>1</sup>) e potência unitária instalada de 2,0-3,0 cv ha<sup>-1</sup> (1,47-2,21 kW ha<sup>-1</sup>). Devido à praticidade e à facilidade de utilização, o pivô central é o sistema com maior crescimento de área instalada atualmente no Brasil (ANA, 2021).

---

<sup>1</sup> PSI: *pounds per square inch*, ou libras-força por polegada quadrada. 1 PSI = 0,00689476 MPa.

Para garantir uma distribuição uniforme de água, os pivôs centrais são equipados com reguladores de pressão, instalados juntamente com os emissores. Assim, a pressão de operação será sempre adequada, de modo que cada bocal de emissor tenha vazão igual ou muito próxima à projetada. Com o tempo de uso do sistema, ocorre um desgaste natural de suas peças, principalmente dos reguladores de pressão, que podem falhar e permitir a passagem de pressão inadequada, que afeta a vazão do emissor. Por isso, é necessário que a uniformidade de distribuição seja testada periodicamente (BERNARDO e MANTOVANI, 2009).

O desenvolvimento da tecnologia de rede de sensores sem fio permitiu sua extensão e aplicação ao ambiente rural, onde a vida das pessoas que interagem com o meio ambiente pode ser melhorada. (GONZALEZ- BRIONES, 2018). Ainda dos mesmos autores, o uso de tecnologias “inteligentes” também pode melhorar a eficiência e eficácia dos sistemas rurais.

A água de irrigação é crucial para as operações agrícolas em todo o mundo, com as terras irrigadas contribuindo com cerca de 40% para a produção de alimentos e fibras. (RODRIGUES, 2017).

Um aumento na área cultivada e na área colhida e diminuição na irrigação são possíveis através da combinação de tecnologias aprimoradas de irrigação e ao uso das melhores decisões de gestão, que podem servir como um modelo para o uso prudente da água. (MPANGA e OMOLOLU, 2021).

#### **4.4 Avaliação da uniformidade de distribuição de água**

A avaliação dos sistemas de irrigação por aspersão tem a finalidade de auxiliar a busca por uma melhor uniformidade de distribuição de água na área irrigada. Para isto, os aspersores devem ser instalados de modo que o arco de água aspergida por um aspersor se sobreponha adequadamente ao arco de água do aspersor adjacente, para que toda a área embaixo deles seja molhada com a maior uniformidade possível (KARMELI, 1978).

O espaçamento entre os aspersores é definido buscando a melhor relação benefício-custo. Por isso, os testes visam encontrar ao menos uma combinação entre espaçamento e uniformidade de aplicação que resulte no melhor resultado possível com a cultura irrigada (BERNARDO *et al.*, 2009).

No caso de pivôs centrais, há vários fatores que influenciam a uniformidade de distribuição de água. Sandri e Cortez (2009) realizaram um estudo em onze municípios do estado de Goiás e do Distrito Federal, visando avaliar o desempenho de dezesseis pivôs centrais por meio dos coeficientes de uniformidade de Heermann e Hein (CUH – HEERMANN & HEIN, 1968) e de uniformidade de distribuição (CUD – DAVIS, 1966). Segundo os autores, 25% dos pivôs avaliados apresentaram CUH inadequado (<80%) e 19% apresentaram CUD inadequado (<70%). Além disso, os autores detectaram lâminas médias coletadas superiores às projetadas em 19% dos pivôs e inferior em 81%, observando que os pivôs apresentaram problemas em bocais com vazão diferente da adequada em algumas torres, emissores obstruídos ou danificados, ausência de pendurais, reguladores de pressão danificados,

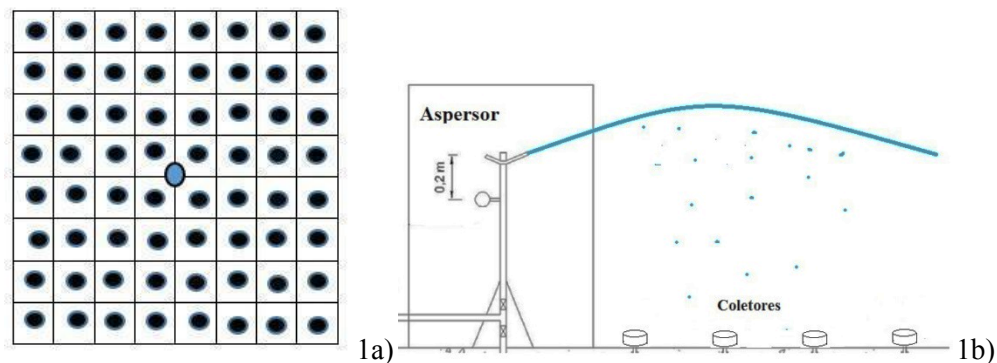
vazamentos na linha lateral e velocidade de deslocamento em campo diferente da indicada no relé porcentual. Tais falhas mostram a importância da realização de testes periódicos de desempenho dos pivôs centrais.

#### 4.4.1. Métodos padrão de avaliação de uniformidade em aspersores

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu normas para testes de desempenho de sistemas de irrigação por aspersão (ABNT. NBR/ISO 7749-1, 2000 e ISO 15886-3, 2012 e ABNT. NBR/ISO 11544, 2016).

Os métodos de ensaio de distribuição de água mais utilizados em sistemas de irrigação por aspersão convencional são: completo e radial. O primeiro é mais utilizado no campo e o segundo é mais utilizado em laboratório.

No primeiro método, os coletores são distribuídos em malha ao redor do aspersor e no segundo os coletores são posicionados em uma ou duas linhas retas, na direção de deslocamento do jato de água (ABNT NBR/ISO 11544, 2016), como é ilustrado nas Figuras 1a) e 1b). O espaçamento máximo entre os coletores deve levar em consideração a seguinte regra: se o raio de alcance do *sprayer* ou aspersor for menor que dez metros, o espaçamento deve ser de 3 metros; caso seja maior ou igual a dez metros, o espaçamento deve ser de cinco metros (ABNT NBR ISO 11544, 2016).



**Figura 1.** a) Esquema de disposição dos coletores em ensaio de aspersão em malha (ensaio completo).  
b) Esquema de disposição dos coletores num ensaio de aspersão em linha (ensaio radial).

O mesmo tipo de coletor pode ser utilizado para ambos os tipos de ensaio. Os coletores utilizados no ensaio devem ser idênticos e de formato tal que a água não respingue para dentro ou para fora. O lábio do coletor deve ser simétrico e sem depressões. A altura de cada coletor deve ser de pelo menos duas vezes a profundidade máxima da água coletada durante o ensaio, porém não inferior a 150 mm. Ele deve ser uma abertura circular com arestas vivas livres de deformidades. O diâmetro deve ser pelo menos a metade da altura, porém não pode ser inferior a 85 mm. Para minimizar o erro na medição, é recomendado que os ensaiadores utilizem coletores que sejam os maiores possíveis (ABNT NBRISO 11544, 2016).

A parte da entrada dos coletores deve ser nivelada. Caso a velocidade do vento ultrapasse 2 m/s, convém que a entrada dos coletores não esteja a mais de 0,3 m do solo ou acima da cultura. A altura de descarga de água deve estar a pelo menos um metro da parte superior o coletor. Deve-se anotar a altura dos bocais dos aspersores ou dos *sprayers* ou dos aspersores e da entrada dos coletores (ABNT NBR ISO 11544, 2016).

No ensaio em campo, o melhor horário para a realização dos ensaios é à noite ou nas primeiras horas da manhã, pois durante esses períodos a evaporação é minimizada (ABNT NBR ISO 11544, 2016). A temperatura do ar deve estar entre 15 e 30 ° C, que aliada à umidade relativa do ar influenciam a evaporação da água nos coletores. Para ser medida essa evaporação, deve-se utilizar três coletores colocados próximos à área de ensaio (ABNT. NBR/ISO 7749-1, 2000; ISO 15886-3, 2012).

Para os dois métodos de ensaio, o tempo de medição de água pelos coletores é iniciado quando uma pressão preestabelecida é alcançada; e o tempo mínimo de coleta é de 1 hora (ABNT. NBR/ISO 7749-1, 2000). Ao final, cada volume dos coletores é medido por proveta graduada utilizando uma resolução adequada e medir com atenção para evitar efeitos de paralaxe (SARETTA, 2016).

#### **4.5 Tentativas de métodos alternativos de avaliação**

Silva *et al.*, 2005; Campêlo *et al.*, 2014 e Paulino *et al.*, 2009 observaram que os ensaios de distribuição de água de aspersores são convencionalmente realizados manualmente, requerendo tempo e mão de obra treinada. Além disso, cada novo tipo de aspersor produzido exige vários testes rigorosos e mão de obra qualificada para a realização dos mesmos. Para toda a faixa de pressão de serviço recomendada pelo fabricante é necessária a realização de testes de uniformidade, com um mínimo de três repetições (SARETTA, 2016).

Na revisão de literatura há pouca informação sobre sistemas automatizados para coleta e processamento desses dados, e geralmente o foco está em testes em laboratório. A automação dos testes de uniformidade de distribuição reduziria o tempo e o custo necessários à sua realização, e também poderia minimizar falhas e/ou desvios de procedimento.

Desde 1988 houveram tentativas para a construção de um novo método de avaliação automatizada de sistemas de aspersão, como é possível observar nos trabalhos de Seginer *et al.*(1992); Fisher e Wallander (1988); Tarjuelo *et al.*(1999) e Zanon *et al.*(2000). Os trabalhos desses autores consistiam em acoplar um sistema de tubos junto aos coletores, que estariam ligados a elementos sensores (célula de carga) e a um *datalogger*, no qual a aquisição de dados seria automática. Porém, em todos os trabalhos citados, as principais desvantagens foram os custos com equipamentos (principalmente com os sensores). Assim, abre-se um precedente para novas alternativas de automação da avaliação dos sistemas de irrigação por aspersão, tanto para ensaios de laboratório quanto para testes de campo.

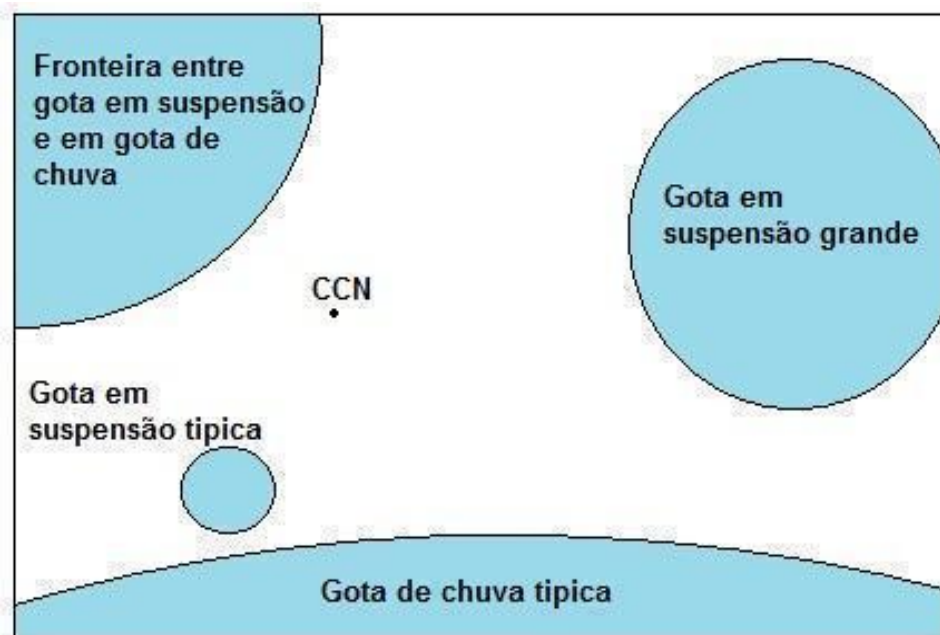
Sistemas automáticos desenvolvidos com tal finalidade devem ser portáteis (principalmente para trabalhos de campo), resistentes às intempéries climáticas, fáceis de operar e registrar dados, e ter baixo custo.

Para solucionarmos esse entrave tecnológico, foi necessário o estudo do menor componente do sistema de irrigação: a gota.

#### 4.6 Estudos das gotas

Na meteorologia, as gotas são as menores entidades observáveis a olho nu (WALLACE e HOBBS, 2006). Na natureza, ela se origina com uma parcela de ar, carregada de vapor de água, se elevando devido à instabilidade causada por: aquecimento da superfície do solo, turbulência mecânica, ascendência de ar devido a uma zona frontal ou subida forçada sobre uma barreira orográfica (BARRY & CHORLEY, 2009).

Quanto mais alto a parcela sobe, mais ela esfria e o vapor contido nela pode se condensar. (BARRY & CHORLEY, 2009). Normalmente, a condensação ocorre em uma superfície estranha; pode ser uma partícula terrestre ou vegetal no caso de orvalho ou geada, enquanto no ar livre a condensação começa nos núcleos de condensação ou CCN (cloud condensation nuclei) (FERREIRA, 2006). Esses CCN incluem poeira, fumaça, sais e compostos químicos (WALLACE & HOBBS, 2006). Como esses CCN têm diversos tamanhos, as gotas irão apresentar tamanhos diversos também. Esses tamanhos são ilustrados na Figura 2.



**Figura 2:** Tamanho relativo das gotas em suspensão, de chuva e CCN. As circunferências das gotas foram desenhadas em escala aproximada, mas o ponto preto que representa um CCN típico é 25 vezes maior do que deveria ser. (WALLACE& HOBBS, 2006)

Geralmente, as gotas são classificadas de acordo com o raio ( $r$ ) em micrometros, o número ( $n$ ) de gotas por litro de ar e sua velocidade terminal ( $v$ ) em centímetros por segundo. Os valores típicos estão listados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Valores típicos de  $r$ ,  $n$  e  $v$ ; para as gotas em suspensão, de chuva e CCN

Circunferência	Raio ( $\mu\text{m}$ )	$n$	Velocidade Terminal ( $\text{cm s}^{-1}$ )
Fronteira entre gota em suspensão e de chuva	100	----	70
Gota em suspensão grande	50	$10^3$	27
Gota em suspensão típica	10	$10^6$	1
Gota de chuva típica	1000	1	650
CCN	0,1	$10^6$	0,0001

Fonte: WALLACE & HOBBS, 2006

A detecção do tamanho das gotas também depende da sensibilidade dos equipamentos utilizados e do observador. A ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) apresenta uma norma (S572.1, 2009) na qual ela classifica o tamanho das gotas de chuva, apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3:** Tamanhos de gotas segundo a classificação da ASABE (2009)

Grau de Atomização	Tamanho médio (DTG* $\mu\text{m}$ )	Tamanho relativo
Nevoeiro	$\leq 20$	Ponta de Agulha (25 $\mu\text{m}$ )
Névoa Fina	20 – 100	Cabelo Humano (100 $\mu\text{m}$ )
Garoa Fina	100 – 250	Linha de Costura (150 $\mu\text{m}$ )
Chuva Leve	250 – 1000	Grampo de Cabelo (420 $\mu\text{m}$ )
Tempestade	1000 – 4000	Grafite nº 2 (2000 $\mu\text{m}$ )

\* DTG: densidade de tamanho de gotas: densidade do volume dos hidrometeoros por unidade de diâmetro ( $\mu\text{m}^4$ )

As gotas de chuva que chegam à superfície são geradas em nuvem de tempestades, que são a cumulonimbus e a nimbostratus (YNOUE et al., 2017). Essas nuvens são geradas por elevação convectiva, que pode resultar do aquecimento diurno, ascensão orográfica ou linhas de rajada. (BARRY & CHORLEY, 2009)

Nuvens de origem convectiva (como a cumulonimbus) se formam através do aquecimento da superfície, que gera movimentos verticais. Essa é a formação mais rápida que a estratiforme, não há

tempo suficiente para que processos de colisão-coalescência formem gotas de tamanho mais uniforme. (RAGNO & HOBBS, 2005)

Nuvens de origem estratiforme (como a nimbostratus) se formam através de movimentos horizontais e mais demorados do que as que foram as convectivas. Existe aqui tempo para que processos de colisão-coalescência, formem gotas mais uniformes (SHAW, 2003)

Os sistemas de irrigação por aspersão têm como objetivo emular esses tipos de nuvem (CDC, 2022). E para avaliar essas gotas existem algumas técnicas e equipamentos amplamente utilizados.

#### 4.7 Técnicas de medição de gota de chuva

##### 4.7.1. Equipamentos disponíveis no mercado

As gotas podem ser avaliadas através de diversos parâmetros, como diâmetro ou velocidade terminal (ISLAM *et al.*; 2012). Esses parâmetros podem ser colhidos através de diversos métodos, desde os mais simples, como gotas que mancham um papel especial até o uso de laser (KATHIRAVELU *et al.*, 2016). Na Tabela 4 estão listados os principais métodos utilizados e seus princípios de funcionamento.

**Tabela 4:** Principais técnicas utilizadas para caracterizar gotas e seus princípios físicos

<b>Técnica/ Equipamento</b>	<b>Princípio</b>
Método da Mancha (1)	Papel especial que absorve e revela a umidade
Método da Farinha (2)	Gotas de água colhidas em um prato com farinha
Técnica da imersão em óleo (3)	Coleta de gotas passando em uma calha de vidro, besuntada com óleo, com o uso do microscópio ou de câmera
Fotografia (4)	Fotografar a chuva que cai
Disdrômetros JWD RD80 e RD60(5)	Captam a massa da gota através do deslocamento da membrana do equipamento
Disdrômetro VR - WXT520 (6)	Capta a massa da gota através do som que faz quando cai
Disdrômetro de vídeo em 2D (7)	Capta o deslocamento da gota, utilizando duas câmeras
Disdrômetro OTT Parsivel (8)	Capta imagens da gota utilizando laser
Disdrômetro a Laser (9)	Capta as características da gota utilizando laser

**Fontes:** LOWE (1892); MACHE (1904); FUCHS e PETRJANOFF (1937); JOSS e WALDVOGEL (1967); JAYAWARDENA e REZAUR (2000); KATHIRAVELU *et al.* (2016).



Cada método apresenta uma gama de parâmetros que consegue mensurar. A seguir a tabela 5 mostra quais parâmetros cada método listado consegue captar.

**Tabela 5:** Parâmetros que cada tipo de equipamento consegue medir

Parâmetro	Método								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gotas grandes	S	S	S	N	S	S	S	S	S
Gotas pequenas	S	S	N	N	S	S	S	S	S
Contador de gotas	S	S	S	N	N	N	S	S	S
Velocidade terminal	N	N	N	S	N	N	S	S	S
Energia cinética	N	N	N	N	N	N	N	S	N
Intensidade de chuva	N	N	N	N	N	N	S	S	S
Achatamento	N	N	N	N	N	N	S	N	N
Contagem de longa duração	N	N	N	N	S	S	S	S	S
Resistência aos efeitos do vento	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Resolução	N	N	N	N	S	S	N	S	S
Resolução temporal	N	N	N	N	S	S	N	S	S

(1): Método da Mancha; (2): Método da Farinha; (3) Técnica da imersão em óleo; (4) Fotografia; (5): Disdrômetros JWD RD80 e RD60; (6): Disdrômetro VR – WXT520; (7) Disdrômetro de vídeo em 2D; (8) Disdrômetro OTT Parsivel; (9) Disdrômetro a Laser.

**Fonte:** KATHIRAVELU *et al.*, 2016

Existem limitações comuns de todas as técnicas de medição de gotas de chuva (KATHIRAVELU *et al.*, 2016). Essa comparação é importante, pois possibilita a escolha do melhor para cada situação.

Os três primeiros métodos apresentam bons resultados na descrição de tamanho, contagem e distribuição de gotas (NASCIMENTO *et al.*, 2013; FRITZ *et al.*, 2012). Porém, esses métodos funcionam para aplicações curtas e bem precisas, como no caso de defensivos químicos (JACTO, 2021; CHECHETTO *et al.*, 2020); para medições de longa duração, como na irrigação, esses métodos de avaliação não funcionam (KATHIRAVELU *et al.*, 2016). Atualmente, os ensaios para aferição de tamanho e outras características das gotas utilizam equipamentos baseados em laser (FRITZ *et al.*, 2012), mas esses ensaios são realizados somente em laboratório, para evitar os efeitos do vento e

outros fatores que impossibilitam uma medição precisa (TAPIADOR *et al.*; 2010; TOKAY *et al.*; 2014).

Para obtermos avaliações realistas e precisas, o equipamento tem que apresentar certas características, dentre elas (WEN *et al.*, 2018; SEELA *et al.*, 2018; KATHIRAVELU *et al.*, 2016):

- Diferenciar tamanhos de gotas;
- Contar as gotas com precisão;
- Amostrar continuamente; e
- Ser robusto o suficiente para aguentar as intempéries climáticas.

#### 4.7.2 Disdrômetros

Os instrumentos que mais apresentam essas características citadas no item anterior são os disdrômetros (KATHIRAVELU *et al.*, 2016; SAKAR *et al.*; 2015). O disdrômetro Joss-Waldvogel caracteriza bem a distribuição de tamanhos de gotas, identificando diferentes intensidades de chuva. Considera-se que a chuva estratiforme tende a se espalhar horizontalmente com menores valores de intensidade, enquanto o sistema convectivo apresenta altas intensidades (ISLAM *et al.*, 2012); assim, um sistema de irrigação tem o objetivo de emular uma chuva estratiforme (TESTEZLAF, 2011). A utilização de disdrômetros para a caracterização de sistema de irrigação pode ser uma boa alternativa aos métodos utilizados para avaliação de uniformidade de aplicação na irrigação por aspersão.

Instrumentos como o disdrômetro são utilizados na caracterização de chuvas desde a década de 40 (GUCKER, F.T.,JR.; 1949; PICCA e TROUILHET; 1964; KLAUS, 1977); a tecnologia veio se aprimorando e permitindo medições mais precisas e acuradas (DONNADIEU, 1980; HAUSER *et al.*; 1984; FRIEDRICH *et al.*; 2013). Tanto que a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos da América (NASA) utiliza esses instrumentos para aferir os satélites e radares meteorológicos (TOKAY *et al.*; 2014; BRINGI *et al.*; 2015; LOLLI *et al.*; 2015)

Existem dois tipos de disdrômetros: óticos e de impacto (TAPIADOR *et al.*, 2012). Os óticos dividem-se em dois subtipos de captura: por imagem e por laser (PARK *et al.*; 2012). Os de captura por imagens utilizam duas ou mais câmeras para filmar as gotas que caem (De JONG 2010; ABUDI *et al.*, 2012); no outro subtipo, as características das gotas são captadas quando as mesmas atravessam um feixe de laser (LIU *et al.*; 2014; SOLOMON *et al.*; 1991; LANZINGER *et al.*; 2014). Como esses dois tipos de disdrômetro funcionam melhor em laboratório (TAPIADOR *et al.*; 2010; TOKAY *et al.*; 2014), eles não serão abordados com profundidade neste trabalho. Nas Figuras 3, 4 e 5 são mostrados os disdrômetros óticos, por captura de imagem (Figura 3) e a laser (Figuras 4 e 5).



**Figura 3:** Disdrômetro por imagem Thies.

**Fonte:** <https://www.thiesclima.com/en/Products/Precipitation-Electrical-devices/?art=774>



**Figura 4:** Disdrômetro a laser OTT Parsivel.

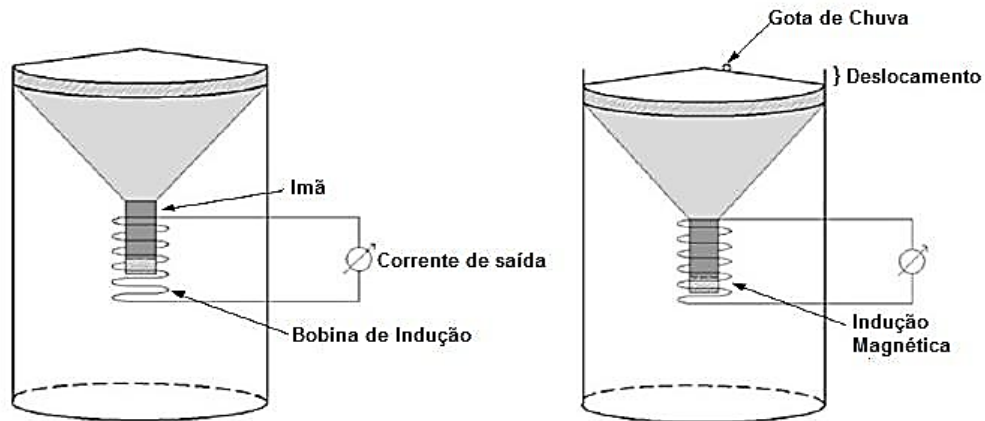
**Fonte:** <https://www.ott.com/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392/>



**Figura 5:** Disdrômetro a laser Thies

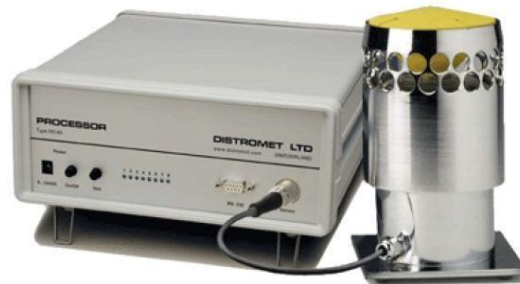
**Fonte:** <https://www.thiesclima.com/en/Products/Precipitation-Electrical-devices/?art=1339>

Os disdrômetros de impactos também se dividem em dois tipos: deslocamento e acústico (KATHIRAVELU *et al.*, 2016). O disdrômetro de deslocamento utiliza a energia gerada pelas gotas que caem na superfície superior, que é traduzida por indução magnética e convertida em pulso elétrico para estimar o tamanho de uma gota de chuva, como é mostrado na figura 6 (BAGREE 2012).



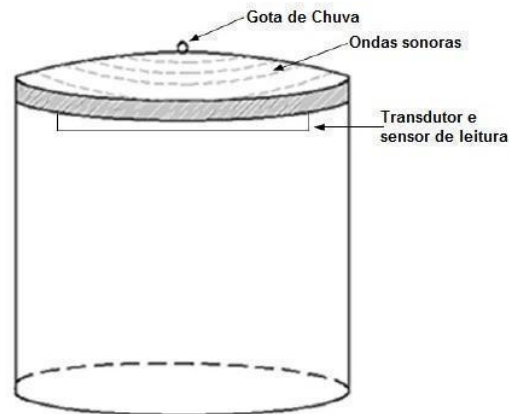
**Figura 6:** Esquema do princípio de funcionamento de um disdrômetro por deslocamento  
**Fonte:** Adaptado de BAGREE 2012

Os disdrômetros que caracterizam as gotas por meio do deslocamento da membrana podem funcionar por indução magnética (JOSS e WALDVOGEL, 1967), molas elásticas (BAGREE 2012), pluviógrafo adaptado (NEAL e BAVER, 1937) e transdutores de pressão (SALMI *et al.*, 2011). O mais utilizado comercialmente o é Disdrômetro Joss-Waldvogel, mostrado na figura 7 (JOSS e WALDVOGEL, 1967). Embora já seja utilizado a 50 anos e tenha passado por modificações para aumentar sua acurácia e precisão, sua capacidade de amostragem por longos períodos ainda é limitada (KATHIRAVELU *et al.*, 2016)



**Figura 7:** Disdrômetro por deslocamento Joss-Waldvogel  
**Fonte:** <https://distromet.com/>

Outro modo de funcionamento dos disdrômetros é a acústica. A queda das gotas de água em um diafragma especializado, instalado na face superior do disdrômetro, provoca a geração e gravação de um sinal elétrico por meio de um sensor piezoelétrico (KATZ, 1952; De JONG, 2010). Com base na relação entre a energia cinética e os cálculos do tamanho da gota, este sinal elétrico é convertido em energia cinética através da energia acústica medida (MINDA, MAKINO e TSUDA, 2014)



**Figura 8:** Esquema do princípio de funcionamento de um disdrômetro acústico.

**Fonte:** Adaptado de BAGREE 2012

As limitações apresentadas no seu funcionamento se devem ao material do diafragma. Primeiramente, por não permitir uma percepção em todo seu diâmetro e por ser insensível a gotas pequenas, pois ele não capta os diferentes tipos de respingos. Além disso, grandes volumes de água podem diminuir a precisão da medição, devido aos ruídos gerados nas leituras (KATHIRAVELU *et al.*, 2016; De JONG, 2010 e BAGREE, 2012). O disdrômetro acústico mais utilizado é o Vaisala (SALMI, *et al*, 2022).



**Figura 9:** Disdrômetro acústico Vaisala

**Fonte:** Salmi et al 2011

## 4.8 Princípio piezoelétrico

### 4.8.1 Definição

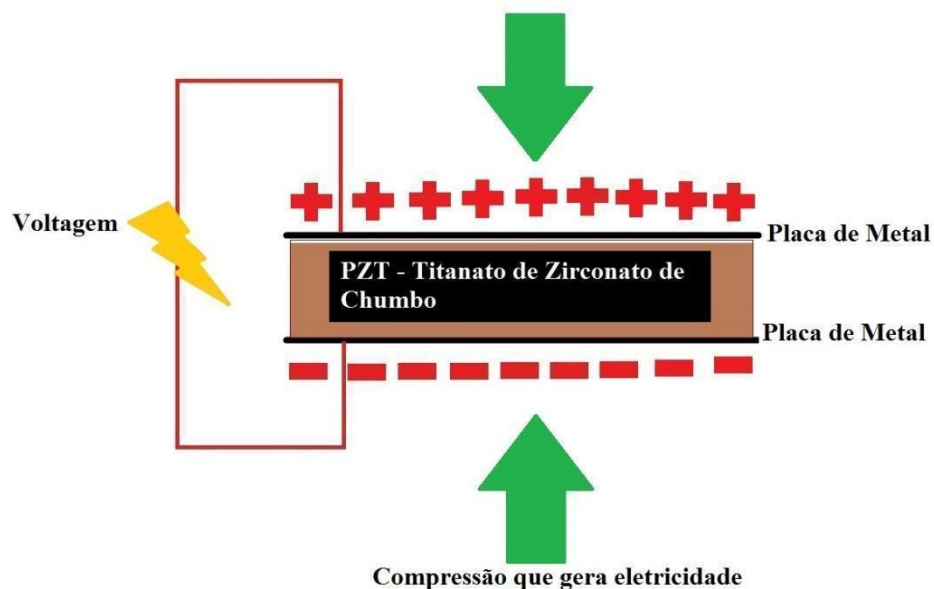
O termo piezoelectricidade vem das palavras gregas “piezos” (πιεζος), que significa “apertar” ou “pressionar”, e “elektro” (ηλεκτρο), que remete à eletricidade obtida ao se friccionar o âmbar, que foi umas das primeiras manifestações da eletricidade (HARPER, 2019).

A piezoelectricidade foi verificada pela primeira vez pelos irmãos e cientistas franceses Jacques e Pierre Curie, em 1880. Eles notaram a piezoelectricidade depois de perceber que a pressão aplicada ao quartzo ou a certos tipos de cristais cria uma carga elétrica naquele material. Mais tarde, eles se referiram àquele fenômeno como o efeito piezoelétrico (MANBACHI e COBBOLD, 2012).

#### 4.8.2 Efeito piezoelétrico direto

A Figura 10 mostra um esquema do conceito do efeito piezoelétrico direto em um material cerâmico piezoelétrico não condutor, ou cristal, colocado entre duas placas de metal. Para que a piezoelectricidade seja gerada, é necessário que o material seja comprimido. O estresse mecânico aplicado ao material cerâmico piezoelétrico gera eletricidade.

Conforme mostrado na Figura 10, há uma diferença de potencial elétrico no material. As duas placas de metal comprimem o piezocristal e as placas de metal coletam as cargas, o que produz eletricidade (símbolo de um raio elétrico), ou seja, piezoelectricidade. Desta forma, o efeito piezoelétrico age como um armazém em miniatura, porque gera eletricidade. Este é o efeito piezoelétrico direto. Dispositivos que usam o efeito piezoelétrico direto incluem microfones, sensores de pressão e hidrofones (GAUSTSCHI, 2002).

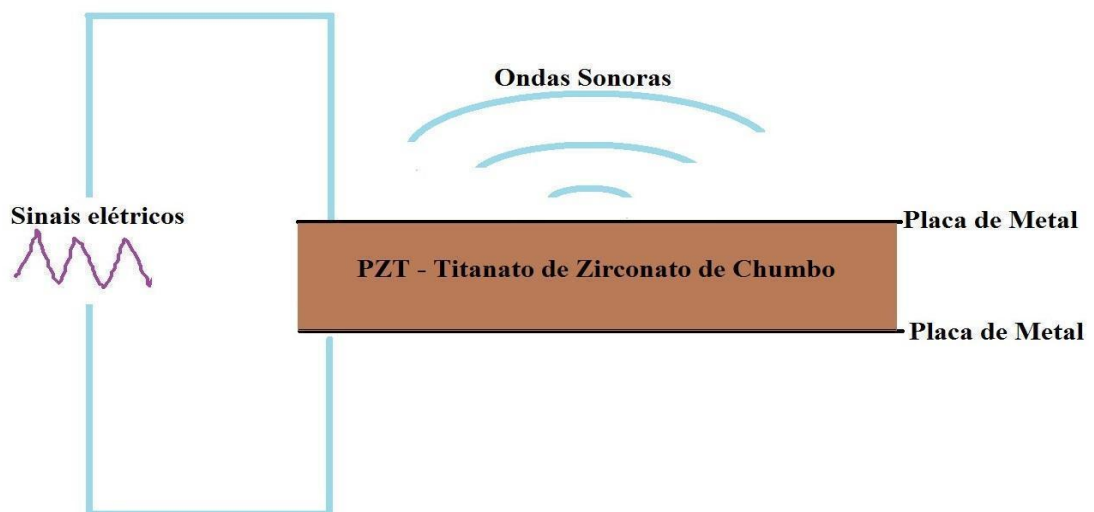


**Figura 10:** Desenho esquemático do efeito piezoelétrico direto

#### 4.8.3 Efeito piezoelétrico inverso

Com o avanço de suas pesquisas, Jacques e Pierre Curie descobriram o efeito piezoelétrico inverso, que consiste em aplicar um campo elétrico em ligações de metal com cristais, que causa desordem no material. Isto é criado por aplicação de tensão elétrica para fazer um cristal piezoelétrico encolher ou expandir (Figura 11). O efeito piezoelétrico inverso converte energia elétrica em energia mecânica (GAUSTSCHI, 2002).

O efeito piezoelétrico inverso é a base para o desenvolvimento de dispositivos que geram e produzem ondas sonoras acústicas. Exemplos de dispositivos acústicos piezoelétricos são alto-falantes ou campainhas. A vantagem desses alto-falantes é que eles são muito finos, o que os torna úteis em uma variedade de dispositivos, tais como telefones fixos ou celulares e *tablets*. Outros exemplos de equipamentos que funcionam sob o efeito piezoelétrico inverso são os transdutores de ultrassom e sonar médicos. Também há equipamentos não acústicos que utilizam o efeito piezoelétrico inverso, tais como os usados em ultrassom (GAUSTSCHI, 2002).



**Figura 11:** Desenho esquemático do efeito piezoelétrico inverso

#### 4.8.4 Materiais piezoelétricos

Materiais piezoelétricos podem produzir eletricidade devido ao estresse mecânico, tal como a compressão, e também podem se deformar quando é aplicada uma tensão elétrica. O quartzo foi o primeiro material conhecido com propriedades piezoelétricas (MANBACHI e COBBOLD, 2012).

Eles podem ser separados em dois grupos: cristais e cerâmicos. Alguns exemplos de materiais piezoelétricos são PZT (titanato de zirconato de chumbo, sigla em inglês), titanato de bário e niobato de lítio (IPI, 2019). Estes materiais manufaturados têm um efeito mais pronunciado que o quartzo e outros materiais piezoelétricos naturais, sendo os melhores materiais para uso em vários dispositivos (ALMEIDA, 2013). Ao comparar PZT ao quartzo, o PZT pode produzir mais voltagem para a mesma

quantidade de estresse mecânico aplicado. Por outro lado, a aplicação de tensão ao PZT proporciona mais movimento que no quartzo (RAMO *et al.*, 1994)

Os dispositivos piezoelétricos estão disponíveis no mercado em diversas configurações (tamanho, formato, sensibilidade, intervalo de captação de sinal). Para adequação à utilização neste estudo, as mesmas são apresentadas a seguir com uma breve descrição (Tabela 6):



**Tabela 6:** Propriedades físicas utilizadas na escolha do dispositivo piezoelétrico.

Propriedade Física	Descrição	Símbolo	Unidade
Ponto de Curie ou Temperatura de Curie <sup>1</sup>	Temperatura na qual o magnetismo permanente de um material se torne um magnetismo induzido.	T	°C
Fator de acoplamento eletromecânico <sup>2</sup>	Capacidade de um material piezoelétrico para converter energia elétrica em energia mecânica e vice-versa	$K_{ij}$	adimensional
Coefficiente de tensão piezoelétrico <sup>2</sup>	Razão entre o campo elétrico e a tensão mecânica efetiva	$g_{ij}$	$10^{-3} \text{Vm.N}^{-1}$
Módulo de Young <sup>2,4</sup>	Descreve as propriedades elásticas de um sólido submetido a tensão ou compressão em uma única direção	$Y_{ij}$	$\text{N.m}^{-2}$
Coefficiente de frequência <sup>2</sup>	Descreve a relação entre a dimensão geométrica A de um corpo e a correspondente frequência de ressonância	N	Hz.m
Fator de qualidade mecânica <sup>2</sup>	Caracteriza a largura ou a banda de do mesmo com relação à sua frequência central	$Q_m$	adimensional
Impedância elétrica <sup>3</sup>	Medida da capacidade de um circuito de resistir ao fluxo de uma determinada corrente elétrica quando se aplica certa tensão elétrica	$Z_a$	$\Omega$
Fator de dissipação <sup>5</sup>	Medida da taxa de perda de energia de um modo de dissipação (mecânico, elétrico ou eletromecânico) em um sistema dissipativo	$\text{Tan } \delta$	$10^{-3}$
Coefficiente de deformação <sup>2</sup>	Relação da carga elétrica induzida para a tensão mecânica ou da tensão mecânica alcançada para o campo elétrico aplicado	$d_{ij}$	$10^{-12}\text{C.N}^{-2}$

**Fontes:** <sup>1</sup>Zhu (2010); <sup>2</sup>IPI (2019); <sup>3</sup>Almeida (2013); <sup>4</sup>Enciclopédia Britânica (2019); <sup>5</sup>RAMO *et al.* (1994)

Uma cerâmica piezoelétrica é classificada quanto à quantidade de energia dissipada em forma de calor, quando um campo elétrico alternado é aplicado à essa cerâmica (TRESSLER, 2008). A principal classificação dos materiais piezoelétricos é baseada na diferença da quantidade de energia

dissipada, assim sendo denominados como materiais “Soft” para maiores dissipações ou “Hard” para as menores. Também materiais “Hard” são denominados como materiais de alta potência e os “Soft” são classificados como os de alta sensibilidade ATCP(2019).

A marinha americana estabeleceu uma norma que subdivide esses materiais “Soft” e “Hard” em subgrupos, utilizando os intervalos das propriedades físicas dos piezoelétricos e também de acordo com as suas aplicações. Com essa norma, é possível escolher o piezoelétrico que mais se adéqua ao projeto proposto (MilStd1376b,1995). A classificação desses piezoelétricos tal como suas funções podem ser vislumbradas na Tabela 7, a seguir:

**Tabela 7:** Caracterização dos tipos de cerâmica piezoelétrica e suas aplicações

Nome <sup>1</sup>	Tipo <sup>1</sup>	Propriedades em destaque <sup>1</sup>	Aplicações <sup>2,3</sup>
Navy Type I PZT-4	“Hard”	Resistente a cargas elétricas elevadas e estresse mecânico	Limpeza por ultrassom e fisioterapia <sup>2</sup>
Navy Type II PZT-5A	“Soft”	Maior sensibilidade, sem resistividade à cargas elétricas elevadas	Sensores e transdutores para ensaio não destrutivo <sup>2</sup>
Navy Type III PZT-8	“Hard”	Semelhante ao type I, porém com perdas elétricas e mecânicas menores	Sistemas de Solda por ultrassom e processamento de materiais <sup>2</sup>
Navy Type IV BT	“Soft”	Composição de Titanato de Bário, que permite menor atividade piezoelétrica e menor temperatura de Curie, em comparação com os PZT's	Memórias RAM e capacitores
Navy Type V PZT-5J	“Soft”	Composição intermediária entre os types II e VI	Detonadores de impacto <sup>2</sup>
Navy Type VI PZT-5H	“Soft”	Similar ao type II, porém com maior sensibilidade elétrica, e menor temperatura de Curie	Atuadores e posicionadores <sup>2</sup>

**Fontes:**<sup>1</sup> Mil-Std-1376b(1995);<sup>2</sup>ATCP(2019);<sup>3</sup>FARACO(2013)

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR/ISO 11545: equipamentos de irrigação agrícola – máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores – determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 2016a. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR/ISO 7749-1. Equipamentos de irrigação agrícola -Aspersores rotativos - Parte 1: Requisitos para projetos e operação. Rio de Janeiro, Brasil, 2000. 12 p.

ABUDI, I., G. CARMI, AND P. BERLINER. "Rainfall simulator for field runoff studies." *Journal of Hydrology*, 454 (2012): 76-81.

AGÊNCIA SENADO MAU uso dos recursos hídricos agrava calamidade da água potável., 2019 Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2019/03/22/mau-uso-dos-recursos-hidricos-agrava-calamidade-da-agua-potavel-diz-kajuru> Acesso em 22 mar. 2021

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. (Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALMEIDA, PATRICIA MATOS VIANA de. "Caracterização estrutural e dielétrica da matriz BaBi4Ti4O15 (BBT) com adição de Bi2O3." (2015).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS., ATLAS da Irrigação. Uso da água na agricultura irrigada. 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b> Acesso em 06 abr. 2021.

ATCP Engenharia Física, CERÂMICAS Piezoelétricas: funcionamento e propriedades. 2019. São Carlos – SP. Disponível em: [www.atcp.com.br](http://www.atcp.com.br). Acesso 23 ago. 2019

AZEVEDO, H. J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2000, v.4, n.2, p.152-158.

BAGREE, R. Characterization and Design of a Readout Circuit for a Piezoelectric-based Acoustic Disdrometer. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2012.

BARRY, R.G. and CHORLEY, R. J. *Atmosphere, weather and climate*. Routledge, 2009.

BERNARDO, S., A. A. SOARES, AND C. MANTOVANI. "Manual de irrigação, edição: 8ª." Editora: UFV, 2ª reimpressão. Viçosa, MG (2009).

BRINGI, V. N., TOLSTOY, L., THURAI, M., & PETERSEN, W. A. (2015). Estimation of spatial correlation of drop size distribution parameters and rain rate using NASA's S-band polarimetric radar and 2D video disdrometer network: Two case studies from MC3E. *Journal of Hydrometeorology*, v. 16, n.3, 1207-1221.

BRITO, LT de L.; SILVA, A. de S.; PORTO, Everaldo R. Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.

CAMPÊLO, A. R., FERNANDES, C. N. V., SILVA, A. R. A. da, OLIVEIRA, S. R. M da, BEZERRA, F. M. L., CÂNDIDO, M. J. D. Avaliação de sistemas de irrigação por aspersão em malha em áreas cultivadas com capim-braquiária. Revista AGROTEC – v. 35, n. 1, p 1–12, 2014

CARNEVSKIS, E. L. Determinação de eventos de deficiência hídrica máxima com fins de implantação de sistemas de irrigação em pastagens tropicais. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. doi:10.11606/D.11.2016.tde-30112016-164446. Acesso em: 05 ago. 2021

CARRIÓN, P., TARJUELO, J., & MONTERO, J. (2001). SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. *Irrigation Science*, 20(2), 73-84.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION IRRIGATION VS. Rain-Fed Agriculture. 2022. Disponível em: <https://www.cdc.gov/healthywater/other/agricultural/types.html>. Acesso em 17 fev. 2022

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. ACOMPANHAMENTO da Safra 2020., 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra>. Acesso em 03 ago. 2022

CHECHETTO, R.G.; CARVALHO, F.K.; MOTA, A. A. B.; ANTUNIASSI, U.R. Tecnologia de Aplicação. Espectro e classes de tamanho de gotas: O que é preciso saber e como interpretar resultados. 2020 Disponível em: <https://www.upherb.com.br/int/espectro-e-classes-de-tamanho-de-gotas-o-que-e-preciso-saber-e-como-interpretar-resultados>. Acesso em: 03 nov. 2021

DA SILVA, C. A., and da SILVA, C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. (2005).

DAVIS, J. R. Measuring water distribution from sprinklers. Transactions of the ASAE, v. 9, n. 1, p. 94-97, 1966.

DE JONG, S. Low Cost Disdrometer. Master's Thesis, Delf University of Technology, Delft, The Netherlands, 2010. Developed by the Pest Control and Fertilizer Application Committee; Approved by the Power and Machinery Division Standards Committee; Adopted by ASAE PM41 (2009)

DONNADIEU, G. Comparison of Results Obtained with the VIDIAZ Spectropluviometer and the Joss-Waldvogel Rainfall Disdrometer in a " Rain of a Thundery Type". Journal of Applied Meteorology (1962-1982), p. 593-597, 1980.

ELETRONOBO. Sistema Gootem. 2021. Disponível em: <https://www.agriexpo.online/pt/prod/electronobo-sl/product-184951-125974.html>. Acesso em: 07 abr. 2021.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. Young's modulus definition. 2019. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/Youngs-modulus>. Acesso em 14/08/2019

FARACO, B. S. Fibras nanoestruturadas de titanato de bário e estrôncio: Síntese por electrospinning e caracterização microestrutural. 2013.

FARMER, B. H. Perspectives on the 'green revolution' in south asia. Modern Asian Studies, v. 20, n. 1, p. 175-199, 1986.

FERREIRA, A. G. (2006). Meteorologia prática. Oficina de Textos.

FISCHER, G. R., AND W. W. WALLENDER. 1988. Collector size and test duration effects on sprinkler water distribution measurement. Transactions of the ASAE31(2): 538-42.

FRASER, E.D.G; CAMPBELL, M. Agriculture 5.0: reconciling production with planetary health. One Earth, v. 1, n. 3, p. 278-280, 2019.

FRIEDRICH, K.; HIGGINS, S.; MASTERS, F.J.; LOPEZ, C.R. Articulating and stationary PARSIVEL disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall. J. Atmos. Ocean. Technol. 2013, 30, 2063–2080.

FRITZ, B. K., HOFFMANN, W. C., CZACZYK, Z., BAGLEY, W., KRUGER, G., & HENRY, R. (2012). Measurement and classification methods using the ASAE S572. 1 reference nozzles. AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE COLLEGE STATION TX.

FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A.P. de; COLOMBO, A. Irrigação por aspersão: sistema de pivô central. Maringá: EDUEM, 2018. 355 p.

FUCHS, N.; PETRJANOFF, I. Microscopic examination of fog, cloud and rain droplets. *Nature* 1937, 139, 111–112.

GAUTSCHI, G. (2002). Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers. Springer. [doi:10.1007/978-3-662-04732-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04732-3). ISBN 978-3-662-04732-3.

GONZÁLEZ-BRIONES, A., CASTELLANOS-GARZÓN, J. A., MEZQUITA MARTÍN, Y., PRIETO, J., & CORCHADO, J. M. (2018). A framework for knowledge discovery from wireless sensor networks in rural environments: a crop irrigation systems case study. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.

GUCKER, F.T., Jr. Determination of concentration and size of particulate matter by light scattering and sonic techniques. In *Proceedings of First National Air Pollution Symposium*, 10–11 November 1949; Stanford Research Institute: Los Angeles, CA, USA; p. 14–25.

HARARI, Y. N. *Homo Deus: uma breve história do amanhã*. Editora Companhia das Letras, 2016.

HARPER, D. Online Etymology Dictionary. Disponível em: <https://www.etymonline.com/>. Acesso em 24/02/2019

HAUSER, D.; AMAYENC, P.; NUTTEN, B.; WALDTEUFEL, P. A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distributions. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1984, 1, 256–269.

HAZELL, P. B.R. The Asian green revolution. *International Food Policy Res. Inst.*, 2009.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PESQUISA Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil. , 2017. Diretoria de Pesquisas Coordenação de Agropecuária. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Rio de Janeiro v.30 n.1 p.1-81. Acesso em 06 abr. 2021

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. MONITORAMENTO da cobertura e uso da terra do Brasil. 2018. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento\\_cobertura\\_uso\\_terra/v1/](https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/) Acesso em 06 abr. 2021

INSTITUTO DE PESQUISA APLICADA. CRISES Hídricas: Tecnologia e inovação no combate à insuficiência de água. 2020 23/12. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/96-crises-hidricas-tecnologia-e-inovacao-no-combate-a-insuficiencia-de-agua>. Acesso em 23 dez. 2020.

ISLAM, T., RICO-RAMIREZ, M. A., HAN, D., & SRIVASTAVA, P. K. A Joss–Waldvogel disdrometer derived rainfall estimation study by collocated tipping bucket and rapid response rain gauges. *Atmospheric Science Letters*, v. 13 n. 2, p. 139-150, 2012.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 15886-3 – Agricultural irrigation equipment – sprinklers – part 3 – Characterization of distribution and test methods. 2012.

JAIN Sistema Gavish., 2021. Disponível em: <https://naandanjain.com.br/produto/gavish-connect/> Acesso em 07 abr. 2021

JACTO, Catalogo de bicos. 2021 54p. Disponível em: <https://jacto.com/brasil/products/bicos-e-acessorios/guia-de-bicos>. Acesso em 02 fev. 2022

JAYAWARDENA, A. W., AND R. B. REZAUR. Measuring drop size distribution and kinetic energy of rainfall using a force transducer. *Hydrological Processes* 14.1 (2000): 37-49.

JORNAL DA USP, Crise Hídrica. 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/tag/crise-hidrica/> Acesso em 22 mar. 2021.

JOSS, J; WALDVOGEL, A. Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. *Pure and applied Geophysics*, v. 68, n. 1, p. 240-246, 1967.

JOSS-Waldvogel rainfall disdrometer in a “rain of a thundery type”. *J. Appl. Meteorol.* 1980, 19, 593–597.

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. *Transactions of the ASAE* 21.4 (1978): 682-0686.

KATHIRAVELU, G, LUCKE, T., and NICHOLS, P. Rain drop measurement techniques: a review. *Water* 8.1 (2016): 29.

KATZ, I. A momentum disdrometer for measuring raindrop size from aircraft. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1952, 33, 365–368.

KELLY, M; GRADA, C. O. Numerare est errare: agricultural output and food supply in England before and during the industrial revolution. *The Journal of Economic History*, v. 73, n. 4, p. 1132-1163, 2013.

KLAUS, V. Study Spectropluviomètre Photoelectric Providing Real-time Integrated Parameters. Ph.D. Thesis, University of Paris, Paris, France, 1977.

LANZINGER, E.; THEEL, M.; WINDOLPH, H. Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. In *Instruments and Observing Method Report No. 94*, 1–97, Proceedings of TECO-2006-WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, 4–6 December 2006; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2006.

LINDSAY Sistema Fieldnet., 2021. Disponível em: <https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/fieldnet/sobre/> Acesso em 19 ago. 2022.

LIU, X. C., GAO, T. C., & LIU, L. (2014). A video precipitation sensor for imaging and velocimetry of hydrometeors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7), 2037-2046.

LOLLI, S., D'ADDERIO, L. P., CAMPBELL, J. R., SICARD, M., WELTON, E. J., BINCI, A., ... & MADONNA, F. (2018). Vertically resolved precipitation intensity retrieved through a synergy between the ground-based NASA MPLNET lidar network measurements, surface disdrometer datasets and an analytical model solution. *Remote Sensing*, *10*(7), 1102.

LOWE, E. J. Rain drops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 18.84 (1892): 242-245.

MACHE, H. Ueber die Geschwindigkeit un Grosse der Regentpfen. *Meteorol. Z* 39 (1904): 278.

MANBACHI, A., & COBBOLD, R. S. (2011). Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection. *Ultrasound*, *19*(4), 187-196.

MARTOS, V., AHMAD, A., CARTUJO, P., & ORDOÑEZ, J. (2021). Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, *11*(13), 5911.

MAZOYER, M; ROUDART, L. A history of world agriculture: from the neolithic age to the current crisis. NYU Press, 2006.

MINDA, H, MAINO, T, and TSUDA, N. Performance of a new low-cost laser disdrometer with rainfall intensity correction in heavy rainfall. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 9.5 (2014): 542-547.

MONTEIRO, J.E.B.A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. - Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.

OMOLOLU, J. I. and MPANGA, I K., A decade of irrigation water use trends in Southwest USA: The role of irrigation technology, best management practices, and outreach education programs. *Agricultural Water Management* 243 (2021): 106438.

NASCIMENTO, A. B., DE OLIVEIRA, G. M., DE BATISTA FONSECA, I. C., ABI SAAB, O. J. G., & CANTERI, M. G. (2013). Determinação do tamanho da amostra de papéis hidrossensíveis em experimentos ligados à tecnologia de aplicação. *Semina: Ciências Agrárias*, *34*(6), 2687-2696.

NEAL, J. H.; BAVER, L. D. (1937). Measuring the Impact of Raindrops. *Agronomy Journal*, *29*(8), 708–709. doi:10.2134/agronj1937.000219620029000800

NETAFIM Sistema Netmcu., 2021. Disponível em: <https://www.netafim.com.br/digital-farming/netbeat/controle/netmcu/> Acesso em 07 abr. 2021

NUVOLARI, A; RICCI, M. Economic Growth in England 1250-1850: Some New Estimates Using a Demand Side Approach. *Rivista di storia economica*, v. 29, n. 1, p. 31-54, 2013.

PARK, S. G., KIM, H. L., HAM, Y. W., & JUNG, S. H. (2017). Comparative evaluation of the OTT PARSIVEL 2 using a collocated two-dimensional video disdrometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *34*(9), 2059-2082.

PAULINO, M.A. de O. et al. Avaliação da uniformidade e eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão convencional. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI* 3.2 (2013).

PI CERAMIC GMBH PIEZOELECTRIC Ceramic Products., 2019. Fundamentals, Characteristics and Applications. Disponível em: [www.piceramic.com](http://www.piceramic.com) Acesso em 13 ago. 2019

PICCA, B.; TROUILHET, G. Un pluviogramme photoelectrique (A photoelectric raindrop-size spectrometer). *J. Atmos. Res.* 1964, 7, 184–188.

PINGALI, P L. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 31, p. 12302-12308, 2012.

RAINBIRD Sistema Lnkwifi, 2022. Disponível em: <https://www.rainbird.com/corporate/press-releases/rain-birds-new-lnk-wifi-module-offers-remote-irrigation-system-access> Acesso em 19 ago. 2022.

RAMO, S; WHINNERY, J.R.; and VAN DUZER, T. *Fields and Waves in Communication Electronics*, 3rd ed., (John Wiley and Sons, New York, 1994)

RANGNO, A. L., & HOBBS, P. V. (2005). Microstructures and precipitation development in cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical Pacific Ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 131(606), 639-673.

RODRIGUES, L N. *Agricultura irrigada: Desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*. 2017.

SANDRI, D.; CORTEZ, D. A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. *Ciênc. Agrotec., Lavras*, v. 33, n. 1, p. 271-278, 2009.

SALMI, A., ELOMAA, L., KOPSALA, P., LAUKKANEN, E., & OYJ, V. (2011). Piezoelectric Vaisala Raincap® rain sensor applied to drop size distribution monitoring. In *Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation* (pp. 1-7). Geneva: World Meteorological Organization.

SARETTA, E. *Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação*. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016

SARKAR, T., DAS, S., & MAITRA, A. (2015). Assessment of different raindrop size measuring techniques: Inter-comparison of Doppler radar, impact and optical disdrometer. *Atmospheric Research*, 160, 15-27.

SEELA, B. K., JANAPATI, J., LIN, P. L., WANG, P. K., & LEE, M. T. (2018). Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over north Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(20), 11-602.

SEGINER, I., KANTZ, D., NIR, D., & VON BERNUTH, R. D. (1992). Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. *Transactions of the ASAE (USA)*.

SHAW, R. A. (2003). Particle-turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 183-227.

SOLOMON, K. H., ZOLDOSKE, D. F., & OLIPHANT, J. C. (1991). Laser optical measurement of sprinkler drop sizes

TAPIADOR, F. J.; CHECA, R.; DE CASTRO, M. An experiment to measure the spatial variability of rain drop size distribution using sixteen laser disdrometers. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 16, 2010.



TAPIADOR, F.J.; TURK, F.J.; PETERSEN, W.; HOU, A.Y.; GARCIA-ORTEGA, E.; MACHADO, L.A.T.; ANGELIS, C.F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G.J.; et al. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, v. 104, p. 70-97, 2012.

TARJUELO, J. M., MONTERO, J., CARRION, P. A., HONRUBIA, F. T., & CALVO, M. A. (1999). Irrigation uniformity with medium size sprinklers part ii: influence of wind and other factors on water distribution. *Transactions of the ASAE*, 42(3), 677.

TESTEZLAF, R. Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações. Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp-FEAGRI, 2011.

TOKAY, A., WOLFF, D. B., & PETERSEN, W. A. (2014). Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel 2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(6), 1276-1288.

TRESSLER J.F. (2008) Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. In: Safari A., Akdoğan E.K. (eds) *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer, Boston, MA

WALLACE, J M., and HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. Vol. 92. Elsevier, 2006.

WEN, L., ZHAO, K., CHEN, G., WANG, M., ZHOU, B., HUANG, H., ... & HU, H. (2018). Drop size distribution characteristics of seven typhoons in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(12), 6529-6548.

UNITED STATES CENSUS BUREAU, *World Population Clock*. 2021. Disponível em: [https://www.worldometers.info/worldpopulation/#:~:text=World%20Population%20Clock%3A%207.9%20Billion%20People%20\(2021\)%20%2D%20Worldometer](https://www.worldometers.info/worldpopulation/#:~:text=World%20Population%20Clock%3A%207.9%20Billion%20People%20(2021)%20%2D%20Worldometer) Acesso em 23 dez. 2020

VALLEY Sistema Icon10., 2022. Disponível em: [https://www.valley\\_irrigation.com.br/icon10](https://www.valley_irrigation.com.br/icon10) Acesso em 19 ago. 2022

YNOUE, R. Y., REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T., & da SILVA, G. A. (2017). *Meteorologia: noções básicas*. Oficina de Textos.

ZANON, E. R.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. J. A data acquisition system for sprinkler uniformity testing. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 16, n. 1984, p. 123–127, 2000.

ZHU, X. *Piezoelectric ceramic materials: processing, properties, characterization, and applications*. Nova Science Publishers, 2010.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS GERAIS**

A descrição de materiais e métodos utilizados neste trabalho foi dividida e descrita em dois capítulos distintos:

### **Capítulo 1 (Item 6): VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM DISPOSITIVO DE AUTODIAGNOSE EM TESTES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

O primeiro capítulo teve por objetivo analisar a viabilidade econômica da aplicação do princípio piezoelétrico para avaliação de um sistema de irrigação por aspersão. Para isso é proposto um dispositivo de auto diagnose, considerando as médias de custos utilizando o sistema de avaliação realizado atualmente e comparando-o a uma estimativa de custos se considerado o uso de sensores piezoelétricos em seu lugar.

### **Capítulo 2 (Item 7): DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MÉTODO UTILIZANDO O PRINCÍPIO PIEZOELÉTRICO PARA AVALIAÇÃO DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO NA IRRIGAÇÃO**

O segundo capítulo foi o desenvolvimento da metodologia para a realização dessa avaliação onde estudou-se o comportamento dos sensores quando submetidos a ação de um sistema de irrigação por aspersão e um sistema de gotejamento.



## 6. VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM DISPOSITIVO DE AUTODIAGNOSE EM TESTES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

ELIZABETH LIMA CARNEVSKIS<sup>1</sup>; FERNANDO CAMPOS MENDONÇA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ - USP, Avenida Pádua Dias, 11, Vila Independência, Piracicaba-SP, 13418-900, [elizabeth.carnevskis@usp.br](mailto:elizabeth.carnevskis@usp.br)

<sup>2</sup> Prof. Associado, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ - USP, Avenida Pádua Dias, 11, Vila Independência, Piracicaba-SP, 13418-900, [fernando.mendonca@usp.br](mailto:fernando.mendonca@usp.br)

### Resumo

Este trabalho teve por objetivo comparar os custos operacionais da avaliação de uniformidade de distribuição de água de sistemas de irrigação por aspersão tipo pivô central, em três alternativas: (i) contratação de empresa para realizar a avaliação; (ii) teste de campo feito pelo produtor rural e análise de dados por técnico ou empresa; (iii) sistema autônomo de avaliação do equipamento (autodiagnose), atualmente em desenvolvimento pelos autores do presente trabalho. Na Alternativa 1, os custos incluem a avaliação do hectare irrigado, o tempo de funcionamento do pivô, o deslocamento e a estadia da equipe que realiza o teste. Na Alternativa 2, os custos envolvem a compra do equipamento de avaliação, o tempo de funcionamento do pivô, mão de obra do proprietário e a contratação de profissionais para a análise dos dados. Na Alternativa 3, os custos se referem à instalação e utilização de um sistema de autodiagnose. A análise comparativa mostrou que o sistema de autodiagnose pode resultar em custos ser até oito vezes inferiores aos das demais alternativas. Logo, o sistema de autodiagnose proposto pode reduzir substancialmente os custos de avaliação de uniformidade de aplicação de um sistema de irrigação, além de ser rápido, eficiente, apresentar resultados em tempo real, ser de fácil transporte e manutenção, e já poder ser montado desde a instalação de equipamentos novos, dispensando longas horas de ensaio e profissionais qualificados a esse tipo de análise.

Palavras-chave: Irrigação, Pivô central, Avaliação de distribuição de água, Autodiagnóstico.

### Abstract

This work aimed to compare the operational costs of evaluating the uniformity of water distribution in center-pivot irrigation systems, in three alternatives: (i) hiring a company to carry out the evaluation; (ii) field test carried out by the rural producer and data analysis by a technician or company; (iii) autonomous equipment evaluation system (self-diagnosis), currently under development by the authors of the present work. In Alternative 1, the costs include the evaluation of the irrigated hectare, the pivot operating time, the displacement, and the stay of the team that performs the test. In Alternative 2, the costs involve purchasing evaluation equipment, the operating time of the pivot, and hiring professionals for data analysis. In Alternative 3, the costs refer to installing and using a self-diagnosis system. The comparative analysis showed that the self-diagnosis system could result in costs up to eight times lower than the other alternatives. Therefore, the proposed self-diagnosis system can substantially reduce the costs of assessing the application uniformity of an irrigation system, in addition to being fast, efficient, presenting results in real-time, being easy to transport and maintain, and being able to be assembled from the installation of new equipment, dispensing with long hours of testing and qualified professionals for this type of analysis.

Keywords: Irrigation, Center pivot, Water distribution evaluation, Self-diagnosis.

## 6.1 Introdução

O Brasil possui 8,4 milhões de hectares (Mha) de área irrigada (ANA, 2022) e um potencial de expansão efetivo de 13,7Mha. Essa expansão ainda é contida devido a alguns fatores, tais como a área agrícola total (66 Mha) e a extensão territorial (852 Mha) (IBGE, 2018), e o conjunto de fatores físico-climáticos desfavoráveis, inclusive a má distribuição hídrica (ANA, 2021). A distribuição hídrica irregular pode ser amenizada utilizando a irrigação, e sua aplicação pode ser feita de diversas formas. Dentre elas, a irrigação por aspersão é a forma mais utilizada no Brasil, principalmente o pivô central (ANA, 2021).

Devido ao seu extenso uso, são necessárias avaliações periódicas de desempenho nesse tipo de sistema, pois vários fatores interferem na uniformidade de distribuição de água, tais como a influência do vento e possíveis defeitos nos aspersores (AZEVEDO *et al.*, 2000). Essa avaliação é feita dispendo coletores embaixo do pivô, espaçados de 3 a 5 metros entre si, dependendo do tamanho do pivô, onde o equipamento opera a uma velocidade tal que a lâmina de água não fique menor que 15 mm . Depois o conteúdo de cada coletor é esvaziado em uma proveta graduada e anotado. Geralmente esses dados são inseridos em uma planilha eletrônica, na qual são feitos os cálculos de uniformidade (ABNT. NBR 11544, 2016).

Os métodos tradicionais de avaliação da irrigação por aspersão são eficientes, mas envolvem processos lentos e dispendiosos. Em certas situações, sua realização não é possível por não haver condições operacionais e ambientais desejadas (CARRIÓN *et al.*; 2001). Há diversas soluções automatizadas para praticamente todo o processo de irrigação (NETAFIM, 2021; JAIN, 2021; ELECTRONOBO, 2021, VALLEY, 2022; LINDSAY, 2022; RAINBIRD, 2022), mas a aferição de uniformidade de distribuição de água dos equipamentos de irrigação ainda é feita manualmente (ISO 15886-3, 2012; ABNT. NBR/ISO 11544, 2016), consumindo muito tempo e tendo custo elevado.

Visando propor uma alternativa mais adequada às tendências tecnológicas do ramo, foram comparados os custos de três diferentes formas de fazer a avaliação de uniformidade de distribuição de água em sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

## 6.2 Material e Métodos

O estudo envolveu a avaliação dos custos para realizar a avaliação de desempenho de pivôs centrais em três alternativas:

1. Contratação de empresa especializada em avaliação de sistemas de irrigação.
2. Realização do trabalho de campo por conta própria e análise terceirizada; a equipe da propriedade rural realiza a coleta de dados no campo e profissionais analisam os dados.
3. Instalação de um sistema de autoavaliação na própria estrutura do pivô central.

Para as duas primeiras alternativas, foram escolhidas cinco localidades para simular a realização de uma avaliação convencional, a fim de estimar os custos envolvidos em tais avaliações. O

critério de escolha das localidades foi a quantidade de sistemas de irrigação por pivô central implantados no município. A escolha foi feita com base nos levantamentos apresentados no Atlas da irrigação (ANA, 2021) e no trabalho de georreferenciamento de pivôs centrais com ano-base 2020 (LANDAU, 2020), por meio dos quais foi possível descobrir os principais sistemas de irrigação utilizados no Brasil, suas respectivas localidades e a concentração dos equipamentos.

Para a realização das avaliações são necessários profissionais capacitados para instalação, coleta de dados no campo e análise de resultados (ABNT. NBR/ISO 11544, 2016). Segundo o IBGE (2019) a maioria dos profissionais qualificados está localizada nos estados das regiões Sul e Sudeste. Logo, estipulou-se a região Sudeste, mais precisamente a cidade de São Paulo-SP, como o local de partida da equipe técnica, utilizando tal informação para o cálculo das despesas de viagem até os respectivos locais dos testes.

Como a avaliação convencional necessita ser feita em um período sem cultura embaixo do pivô (ISO 15886-3, 2012), foi necessário contabilizar os custos da energia elétrica, água e combustível de cada sistema, que variam de acordo com o município considerado.

Os custos da água no Brasil variam de acordo com a participação dos usuários, da sociedade civil e do poder público; no âmbito dos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs) (ANA, 2022). Geralmente é utilizado o seguinte critério: quem usa e polui mais os corpos de água, paga mais; quem usa e polui menos, paga menos. No meio agrário, esse custo médio foi de R\$ 1,11 por metro cúbico, na região Sudeste, R\$ 1,23 por metro cúbico, na região Centro-Oeste e R\$ 2,23 por metro cúbico, na região Nordeste (IBGE, 2023)

Os custos de energia elétrica no Brasil variam de acordo com a compra da energia, transmissão, subsídios, impostos e com o que é destinado para expansão e reforço da rede. Também varia de acordo com a demanda (potência instalada, kW), o consumo (energia consumida, kWh) e a época do ano (ANEEL, 2022). Esses valores são fornecidos por cada uma das prestadoras de serviços em cada cidade estudada. E os mesmos variam de acordo com tipo de uso, horário e época do ano (CPFL (2022); CEMIG (2022); ENEL (2022); CEMAT (2022); COELBA (2022)).

Os preços dos combustíveis no Brasil são definidos pela Petrobrás, mas variam de município para município, de acordo com impostos, distribuição, revenda e adicional dos biocombustíveis (PETROBRAS, 2022). Tais preços foram utilizados, juntamente com o pagamento de pedágios em rodovias, para estimar os custos de deslocamento dos profissionais até as áreas irrigadas.

Normas como a ABNT NBR ISO 9261 (2006) e a ISO 15886-3 (2012) detalham todos os procedimentos necessários para a avaliação. Foi feita uma lista dos equipamentos utilizados para a realização de uma avaliação, incluindo seus respectivos valores. Nessa lista também estão os valores médios pagos para um profissional capacitado para a realização do teste e um auxiliar de campo. Esse valor é necessário para contabilizar os custos das alternativas 1 e 2.

Na alternativa 3 foram calculados os custos de um sistema de autodiagnose, instalado na estrutura do pivô. Um sistema desse tipo vem sendo desenvolvido pelos autores do presente trabalho,

no Laboratório de Solos e Qualidade de Água (LSQA) e no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI), ambos do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). A fim de desenvolver um método equivalente aos resultados previstos na norma ISO 15886-3, 2012 e ABNT. NBR/ISO 11544, 2016; foram utilizados sensores já disponíveis no mercado, porém adaptados a novas finalidades. Independentemente do tipo de sensor utilizado ou da forma que será realizada a coleta dos dados, é proposto um sistema básico de deslocamento de um gabinete que contém o equipamento de coleta de dados entre as torres do equipamento (Figura 12).

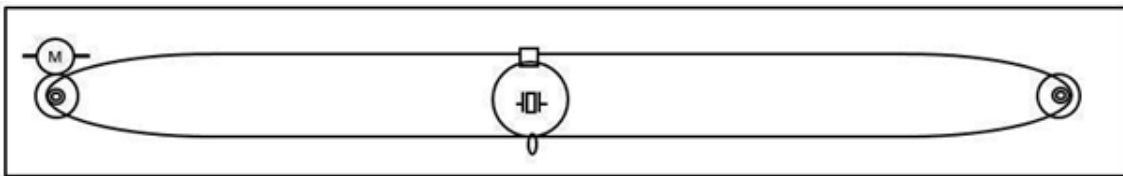


Figura 12: Proposta de esquema de montagem de um dispositivo de autodiagnose em um pivô. Imagem vista de cima

Para essa simulação, foi utilizado um pivô fixo com área de 435 ha, com 20 vãos (CENTRAL IRRIGAÇÃO, 2018). O gabinete do dispositivo deve ser preso em cabos de aço ligados a uma polia, acionada por um motor de passo (M, Figura 12). Esse dispositivo deve ser colocado entre duas torres do pivô (em pivôs com um mínimo de duas torres), ou entre o centro do pivô e a torre móvel (pivôs com uma torre). O gabinete armazenará um conjunto composto por um sensor de contagem de gotas ( $n$ , gotas  $\text{min}^{-1}$ ), uma unidade de processamento e armazenamento de dados, e uma unidade de comunicação por sinais de rádio ou wi-fi.

O dispositivo vai coletar, analisar e enviar os dados à central de armazenamento de informações da propriedade. A unidade de comunicação transmitirá os dados à central de armazenamento de dados da propriedade, a partir da qual eles serão processados e poderão ser consultados por meio de computadores ou *smartphones*. Adicionalmente, os dados poderão ser enviados diretamente a um aplicativo para *smartphones*, que fará o processamento e a apresentação de resultados na forma de gráficos, agilizando e facilitando o acesso aos resultados e a tomada de decisões.

### 6.3 Resultados e Discussão

Consultando agricultores que contrataram empresas especializadas na análise de distribuição de água de sistemas de irrigação por aspersão, e realizando uma cotação com elas, estabeleceu-se o valor médio de R\$ 35,00 por hectare irrigado, mais despesas de viagem de profissionais que realizam essa avaliação. Em pivôs de qualquer área irrigada, considerou-se um custo mínimo de R\$ 2.000,00 por teste, que é o valor aceito pelos avaliadores. Esses custos levam em conta os equipamentos

utilizados, profissionais capacitados para a realização desse tipo de teste e as despesas de deslocamento, alimentação e hospedagem.

Os custos descritos no parágrafo anterior foram somados às despesas da avaliação em si. Segundo as normas ABNT NBR ISO 9261 (2006) e a ISO 15886-3 (2004), a duração de um ensaio de pivô central depende do equipamento que deve operar a uma velocidade tal que a lâmina de água não fique menor que 15 mm. Somando o tempo de montagem e desmontagem dos equipamentos de avaliação, pode-se levar vários dias para avaliar um único equipamento de grande porte. Assim, foi contabilizado o intervalo de uma semana para deslocamento dos profissionais e a avaliação em si.

Como a maioria das empresas de engenharia está localizada no Sudeste (IBGE, 2019), foram estimados os custos de viagem de dois profissionais saindo de São Paulo-SP, com destino aos cinco municípios com maior número de pivôs centrais em operação no Brasil (LANDAU, 2020). Os custos de viagem envolvem passagens aéreas, aluguel de veículo, hospedagem, alimentação, combustível e pedágio. Os valores totais da viagem para cada uma dessas cidades estão listados na Tabela 8.

Ainda sobre os custos, a avaliação deve ser feita sem cultura embaixo do sistema de irrigação, ou seja, o sistema funciona consumindo energia elétrica e água sem uso por alguma cultura. Os valores da energia elétrica (em R\$ kWh<sup>-1</sup>) e da água (em R\$ m<sup>-3</sup>) nesses locais estão na Tabela 9:

Tabela 8: Despesas estimadas de viagem para duas pessoas, por 7 dias.

Destino	Despesas (R\$)
Itai-SP	7.861,40
Paracatu-MG	12.838,88
Cristalina-GO	13.413,96
Primavera do Leste-MT	18.463,48
São Desidério-BA	19.748,64

Fonte: HOTÉIS.COM (2022); LOCALIZA (2022); PETROBRÁS (2022); EMSAMPA (2022); e EXAME (2022); PBE VEICULAR (2022).



Tabela 9: Valores da energia (R\$ kWh<sup>-1</sup>) e da água (em R\$ m<sup>-3</sup>) em cada município utilizado no presente trabalho

Local	Energia elétrica (R\$ kWh <sup>-1</sup> )	Água (R\$ m <sup>-3</sup> )
Itaí-SP	0,56 <sup>(1)</sup> *	1,11 <sup>(6)</sup>
Paracatu – MG	0,54 <sup>(2)</sup> *	1,11 <sup>(6)</sup>
Cristalina -GO	0,56 <sup>(3)</sup> **	1,23 <sup>(6)</sup>
Primavera do Leste – MT	0,20 <sup>(4)</sup> ***	1,23 <sup>(6)</sup>
São Desidério – BA	0,33 <sup>(5)</sup> ***	2,23 <sup>(6)</sup>

\*Bandeira verde \*\*Tarifa rural \*\*\*Tarifa fora de ponta rural

Fonte: (1) CPFL (2022); (2) CEMIG (2022); (3) ENEL (2022); (4) CEMAT (2022); (5) COELBA (2022); (6) IBGE (2023)

Considerou-se uma potência unitária de 2,5 kW ha<sup>-1</sup> para a operação (bombeamento e deslocamento) de pivôs de grande porte (área > 100 ha), baseada em dados de vários autores (LIMA et al., 2009; SANTOS, 2017; TOLEDO et al., 2019). Utilizando como exemplo um pivô, com área de 435 ha, chegou-se a uma potência de 1087,5 kW, ou 6 motores de 184 kW (250 cv). Considerando seu funcionamento durante a avaliação, os custos de energia são apresentados na Tabela 10, supondo a instalação de pivôs com área igual (435 ha) nas cinco localidades com maior número de pivôs instalados.

O pivô utilizado no presente estudo aplica uma lâmina bruta de 3,15 mm por volta a 100% de velocidade, o que resulta em uma vazão de 650 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Os custos da água utilizada durante o ensaio estão descritos na Tabela 11.

Somando os valores das despesas de deslocamento, do uso da água e energia elétrica durante o ensaio, e do custo médio por avaliação, chegou-se aos valores apresentados na Tabela 12:

Tabela 10: Custo da energia elétrica consumida pelo pivô central, considerando seis (06) motores de 250 cv funcionando durante o ensaio, no horário de menor custo de energia, levando em consideração o equipamento operando com velocidade tal que uma lâmina média não seja inferior a 15 mm

Local	Energia elétrica (R\$)
Itaí-SP	605,05
Paracatu – MG	591,47
Cristalina -GO	609,54
Primavera do Leste – MT	215,38
São Desidério – BA	360,94

Tabela 11: Custo da água aplicada durante o ensaio, considerando a vazão do pivô central estudado ( $650 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ )

Local	Água (R\$)
Itaí-SP	561,66
Paracatu – MG	561,66
Cristalina -GO	622,38
Primavera do Leste – MT	622,38
São Desidério – BA	1.128,38

Tabela 12: Custo total da avaliação convencional em cada local, contratando empresas (Alternativa 1)

Local	Valores (R\$)
Itaí-SP	16824,92
Paracatu – MG	21797,82
Cristalina – GO	22500,44
Primavera do Leste – MT	27416,68
São Desidério – BA	29763,06

Dando sequência ao estudo, apresentam-se os custos de uma avaliação em que o proprietário queira fazer por conta própria e contratar uma empresa para analisar os dados (Alternativa 2). Na Tabela 13 estão os valores dos equipamentos utilizados e os valores da hora - homem de cada profissional envolvido.

Tabela 13: Custos envolvidos no teste de uniformidade de distribuição em pivôs centrais com mão de obra própria e análise de dados por empresa (Alternativa 2)

Componentes	Custos
Kit de avaliação de sistema de irrigação	R\$ 4.000,00 <sup>(1)</sup>
Proveta	R\$ 220,00 <sup>(2)</sup>
Custos operacionais	R\$ 100,00
Profissional com treinamento em sistemas de irrigação	R\$/h 60,00 <sup>(3)(4)</sup>
Ajudante Geral	R\$/h 7,60 <sup>(4)</sup>

Fonte: (1) WATERCONTROL, 2022; (2) PROPOSTO, 2022; (3) LEI 4.590 – A, 1996; (4) SENADO, 2022.

Considerando os valores do equipamento e os custos de 8 horas trabalhadas por profissional, durante 7 dias, chegou-se a um custo em torno de R\$ 8100,00. Somando as despesas dos profissionais e o custo de operação do pivô, o custo total estimado da avaliação é mostrado na Tabela 14.

Tabela 14: Valores estimados para o custo total da avaliação de um pivô, com mão de obra própria para os testes de campo e análise de dados por empresa (Alternativa 2).

Destino	Valor estimado da avaliação
Itaí-SP	8.763,96
Paracatu – MG	8.761,67
Cristalina –GO	8.825,44
Primavera do Leste – MT	8.758,80
São Desidério – BA	9.289,41

Considerando apenas os custos de uma avaliação para as localidades com maior concentração de pivôs centrais, foi estimado o custo da instalação de um dispositivo de autodiagnose em um sistema de irrigação (Alternativa 3), nas mesmas condições das alternativas anteriores. Na Tabela 15 estão os valores médios individuais dos principais componentes.

Tabela 15: Custo individuais dos componentes para um componente de auto diagnose num sistema de irrigação por pivô central

Componente	Valor	Quantidade	Total
Polia (1)	12,87	2	25,74
Motor de Passo (2) *	300,00	1	300,00
Cabo de aço (3) **	1,00	2 vezes a distância entre as torres	100,00*****
Gabinete de PVC (4) ***	0,77	1	0,77
Sensor**** (5)	3,00	1	3,00
Elemento de coleta e análise de dados (6) ****	81,22	1	81,22
Conjunto de passador/ fixador de cabo de aço (7) *****	2,22	3	6,66

Fontes: (1) Grupo Emar (2022); (2) Kalatec (2022); (3) ABCMaior (2022); (4) Potenzashop (2022); (5) Proesi (2022); Eletrônica Ômega (2022); (6) Usinainfo (2022); (7) Grupo Emar (2022); Parafusofacil (2022).

\* Valor médio      \*\* Bobina com 100 m, valor médio      \*\*\* Peça de 5 cm de um tubo de 6 m

\*\*\*\* Custo médio dos sensores que estão sendo testados.      \*\*\*\*\* Arduino + coletor de dados

\*\*\*\*\* Caixa com 125 peças      \*\*\*\*\* Considerando o espaçamento médio entre torres de 61 m.

Somando esses custos, o valor de implementação é ligeiramente superior a R\$ 500,00 por vão do pivô. A esse valor deve ser somado o frete do equipamento, o custo da mão de obra para instalação e as despesas de viagem da equipe de montagem. Para tal serviço seria necessário o trabalho de um técnico por aproximadamente 5 horas por vão.

Nesta alternativa foi considerado o mesmo pivô das alternativas anteriores (linha lateral de 1176 m, 19 vãos e 1 lance em balanço), área de 435 ha, localizado em Goianésia-GO. O valor estimado da instalação do conjunto nessas condições é apresentado na Tabela 16

Somando os custos dos conjuntos, das horas trabalhadas do técnico e seu deslocamento, o total é de aproximadamente R \$16600,00. Considerando que a avaliação seria feita em conjunto com a irrigação, pois os componentes do avaliador já estariam acoplados às torres do pivô, o custo da avaliação seria diluído nos custos da irrigação em si. Como o dispositivo deve avaliar se o sistema está, ou não, irrigando uniformemente, não seria necessário o acompanhamento de técnicos especializados.

Tabela 16: Custos estimados na instalação de um sistema de autodiagnose num pivô central

Custos individuais	Valor (R\$)
Frete (São Paulo - SP – Goianésia-GO) <sup>(1)</sup>	2.800,00
23 conjuntos (1 por cada vão + lance em balanço)	5.500,00
Hora trabalho de um técnico mecânico <sup>(2)</sup>	20,00
Instalação do equipamento (115 horas)	1.200,00

Fonte: (1) CENTRALDOFRETE.COM, 2022 (2) VAGAS.COM, 2022

Calculando os custos para o mesmo pivô e os custos do frete de São Paulo a cada uma das cinco (05) localidades, foram comparados os custos nas três alternativas, apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Comparação entre os custos do produtor com as opções: 1: contratar uma empresa; 2: avaliar por conta própria; e 3: instalar um dispositivo de autoavaliação da irrigação

Destino	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Itaí-SP	16.824,92	8.763,96	7.479,28
Paracatu – MG	21.797,82	8.761,67	7.389,38
Cristalina -GO	22.500,44	8.825,44	8.156,19
Primavera do Leste – MT	27.416,68	8.758,80	7.241,35
São Desidério – BA	29.763,06	9.289,41	8.000,00

#### 6.4 Conclusões

Os custos de uma avaliação tradicional num sistema de irrigação são elevados e tomam muito tempo, o que pode torná-lo inadequado.

O sistema de avaliação acoplado no equipamento de irrigação teve o menor custo entre as três alternativas estudadas.

Sistemas automáticos de avaliação têm operação rápida e eficiente, são de fácil transporte e manutenção, funcionam em tempo real e podem ser fornecidos montados em equipamentos novos dispensando longas horas de ensaio e profissionais qualificados.

Sistemas automáticos de avaliação podem ser uma solução de menor custo total de avaliação de uniformidade de aplicação de água em pivôs centrais.

## Referências

ABCMAIOR. Cabo de aço. 2022. Disponível em: [https://www.loja.abcmaior.com.br/MLB-1580524304-bobina-100mts-cabo-de-aco-revestido-pvc-270-mm-pvaral\\_JM?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeypAmBUwpRYeRSH47fzK2rZ1-pbZBWi6JBGAYf5Kn\\_tR4rvEMpqCRoCESIQAvD\\_BwE](https://www.loja.abcmaior.com.br/MLB-1580524304-bobina-100mts-cabo-de-aco-revestido-pvc-270-mm-pvaral_JM?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeypAmBUwpRYeRSH47fzK2rZ1-pbZBWi6JBGAYf5Kn_tR4rvEMpqCRoCESIQAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

AEGEA SANEAMENTO. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://www.aegeamt.com.br/legislacao-e-tarifas/aguas-de-primavera/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas da irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/story/maps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>. Acesso em: 06 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Cobrança (pelo uso da água). 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/cobranca#:~:text=O%20valor%20da%20cobran%C3%A7a%20%C3%A9,e%20polui%20menos%2C%20paga%20menos>. Acesso em: 31 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Custo da energia que chega aos consumidores. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/ptbr/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/custo-da-energia-que-chega-aos-consumidores>. Acesso em: 31 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15084: irrigação localizada – micro aspersores – requisitos gerais e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2004. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 9261: equipamentos de irrigação agrícola – emissores e tubos emissores – especificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2006. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR/ISO 11545: equipamentos de irrigação agrícola – máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores – determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 2016a. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 8026: equipamentos de irrigação agrícola – sprayers – requisitos gerais e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016b. 26 p.

AZEVEDO, H.J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 152-158, 2000.

BRASIL. Leis, decretos, etc. Lei n.45901 A, de 22 de abril de 1966. Dispõe sobre a remuneração de profissionais diplomados em Engenharia, Química, Arquitetura, Agronomia e Veterinária. Diário Oficial, Brasília, 31 de julho de 2022. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4950a.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4950a.htm). Acesso em: 31 jul. 2022

BRASIL. Senado Federal. Novo salário mínimo 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/esocial/pt-br/noticias/novo-salario-minimo-2022-veja-como-registrar-o-reajuste-no-esocial-domestico#:~:text=Novo%20sal%C3%A1rio%20m%C3%ADnimo%202022%3A%20veja%20como%20registrar%20o%20reajuste%20no%20eSocial%20Dom%C3%A9stico,-Sal%C3%A1rio%20m%C3%ADnimo%20foi&text=A%20Medida%20Provis%C3%B3ria%20n%C2%BA%201.091,1%C2%BA%20de%20janeiro%20de%202022>. Acesso em: 30 jul. 2022.

CANCIAN, T. Preço médio para comer fora de casa chega a 40 reais no país, confira as médias das capitais. Exame, São Paulo, 07 jul. 2022. Invest. Disponível em: <https://exame.com/invest/minhas-financas/preco-medio-alimentar-fora-de-casa-pais-medias-capitais/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CARRIÓN P.; TARJUELO, J.; MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Irrigation Science, Berlin, v. 20, n. 2, p. 73-84, 2001.

CENTRAL DOS FRETES. Fretes. 2022. Disponível em: <https://centraldofrete.com/cotacao-de-frete-online>. Acesso em: 12 set. 2022.

COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/reajuste-tarifario-anual-da-coelba-e-aprovado>. Acesso em: 30 jul. 2022.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 30 jul. 2022

COMPANHIA PIRATININGA DE FORÇA E LUZ. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://servicosonline.cpfl.com.br/agencia-webapp/#/taxas-tarifas>. Acesso em: 30 jul. 2022.

DATALOGGER. Usinainfo, 2022. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/shields-para-arduino/shield-data-logger-arduino-com-rtc-ds1307-para-registro-de-dados4487.html>. Acesso em: 31 ago. 2022.

DECOLAR.COM. Vendas de passagens aéreas. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.decolar.com/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

ELETRÔNICA ÔMEGA. Arduino. 2022. Disponível em: [https://www.eletronicaomega.com/unor3smdch340?utm\\_source=Site&utm\\_medium=GoogleMerchant&utm\\_campaign=GoogleMerchant&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe28fSdgTS74ehNyEOzteepw0maIVBUcDe9loO9qqg1kC Tr\\_kFZlJmRoCTJwQAvD\\_BwE](https://www.eletronicaomega.com/unor3smdch340?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe28fSdgTS74ehNyEOzteepw0maIVBUcDe9loO9qqg1kC Tr_kFZlJmRoCTJwQAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

ELETRONOBO. Sistema Gootem. 2021. Disponível em: <https://www.agriexpo.online/pt/prod/electronobo-sl/product-184951-125974.html>. Acesso em: 07 abr. 2021.

ENSAMPA. Valores dos pedágios no país. 2022. Disponível em: <http://www.emsampa.com.br/wwrota0221.htm>. Acesso em: 31 ago. 2022.

ENTIDADE NACIONAL DE ELETRICIDADE. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-goias/espaco-produtor-rural/tarifa-rural.html>. Acesso em: 30 jul. 2022.

GRUPO EMAR. Fixador de cabo de aço. 2022. Disponível em: [https://grupo.emar.com.br/fixador-de-cabo-de-aco?variant\\_id=2231](https://grupo.emar.com.br/fixador-de-cabo-de-aco?variant_id=2231). Acesso em: 31 ago. 2022.

GRUPO EMAR. Polia. 2022. Disponível em: [https://grupo.emar.com.br/roldana-pp-com-rolamento-para-cabo-de-aco?parceiro=2905&variant\\_id=422&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeDe8q37ybtbKs74AWwNTf812OaGfzNphomQuJmKhkA\\_thVQdPKGqJR0C1VgAvD\\_BwE](https://grupo.emar.com.br/roldana-pp-com-rolamento-para-cabo-de-aco?parceiro=2905&variant_id=422&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeDe8q37ybtbKs74AWwNTf812OaGfzNphomQuJmKhkA_thVQdPKGqJR0C1VgAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

GRUPO ENERGISA. Tarifas. 2022. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>. Acesso em: 30 jul. 2022.

HOTEIS.COM. Vendas de estadias em hotéis. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.hoteis.com/>. Acesso em: 31 jul. 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil. 2018. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento\\_cobertura\\_uso\\_terra/v1/](https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/). Acesso em: 06 abr. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Contas econômicas ambientais da água : Brasil : 2018-2020 / IBGE, Coordenação de Contas Nacionais, Agência Nacional de Águas, Rio de Janeiro 2023, 23 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Distribuição das empresas por município. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/pesquisa/10088/0?tipo=cartograma>. Acesso em: 31 ago. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/Tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 31 jul. 2022.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 15886-3: agricultural irrigation equipment – sprinklers – part 3 – characterization of distribution and test methods. Geneva, 2012. 21 p.

IRRIGA ENGENHARIA. O maior pivô do mundo. 2019. Disponível em: <http://www.irrigaengenharia.com.br/projeto/o-maior-pivo-central-do-mundo/19>. Acesso em: 16 jul. 2022.

KALATEC. Motor de passo. 2022. Disponível em: <https://loja.kalatec.com.br/motor-de-passo>. Acesso em: 31 ago. 2022.

LANDAU, E.C.; GUIMARÃES, D.P. Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2022. 63 p.

LIMA, A.C.; GUIMARÃES JR., S.; FIETZ, C.R.; CAMACHO, J. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 499-505, 2009.

LINDSAY. Sistema Fieldnet. 2021. Disponível em: <https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/fieldnet/sobre/>. Acesso em: 19 ago. 2022.

LOCALIZA. Aluguel de carros. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://www.localiza.com/brasil/pt-br>. Acesso em: 31 jul. 2022.

NAANDANJAIN: A JAIN IRRIGATION COMPANY. Sistema Gavish. 2021. Disponível em: <https://naandanjain.com.br/produto/gavish-connect/>. Acesso em: 07 abr. 2021.

NETAFIM. Sistema Netmcu. 2021. Disponível em: <https://www.netafim.com.br/digital-farming/netbeat/controle/netmcu/>. Acesso em: 07 abr. 2021.

PARAFUSO FÁCIL. Prendedor de cabo de aço. 2022. Disponível em: [https://www.parafusofacil.com.br/ProdutosDetalhes.php?Codigo=1219670&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeztwD7OxSEfEW1\\_RnSxH\\_GKhDyCkjUUolrM3ti01p5CAsn5jFiVpBoCrXwQAvD\\_BwE](https://www.parafusofacil.com.br/ProdutosDetalhes.php?Codigo=1219670&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oeztwD7OxSEfEW1_RnSxH_GKhDyCkjUUolrM3ti01p5CAsn5jFiVpBoCrXwQAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

PETROBRAS. Composição de preços de venda ao consumidor. 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

POTENZASHOP. Tubo de PVC 6 metros. 2022. Disponível em: [https://www.potenzashop.com.br/tubo-pvc-esgoto-100mm-6-metros-tigre-p4041?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=lojavirtual&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=TUBO%20PVC%20ESGOTO%20100MM%206%20METROS%20TIGRE&utm\\_campaign=materia-ishidraulicos&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe0p8MRYpBYf4xrFt-N11DqF-IraMIMJirH7sM5HXK1vFupGVV9sY2BoCTjsQAvD\\_BwE](https://www.potenzashop.com.br/tubo-pvc-esgoto-100mm-6-metros-tigre-p4041?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=lojavirtual&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=TUBO%20PVC%20ESGOTO%20100MM%206%20METROS%20TIGRE&utm_campaign=materia-ishidraulicos&gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe0p8MRYpBYf4xrFt-N11DqF-IraMIMJirH7sM5HXK1vFupGVV9sY2BoCTjsQAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

PROESI. Sensor. 2022. Disponível em: [https://proesi.com.br/pastilha-piezoelétrico-20mm-com-fio.html?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe\\_7II\\_Vi602V\\_eRQbivprzfOyyQwzeTfdGxnRe5t5HdxunaCPVNBhoCb4gQAvD\\_BwE](https://proesi.com.br/pastilha-piezoelétrico-20mm-com-fio.html?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe_7II_Vi602V_eRQbivprzfOyyQwzeTfdGxnRe5t5HdxunaCPVNBhoCb4gQAvD_BwE). Acesso em: 31 ago. 2022.

PROPOSTO. Proveta graduada. 2022. Disponível em: [https://www.proposto.com.br/38474-proveta-graduada-de-vidro-100-ml-certificado-inmetro-p8033?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=lojavirtual&gclid=Cj0KCQjwio6XBhCMARIsAC0u9aGOzqStTHpSHWw5dRIAYfxVbQsCj4\\_16UgIyG4aOybAGkMf2g8uZ3oaAomJEALw\\_wcB](https://www.proposto.com.br/38474-proveta-graduada-de-vidro-100-ml-certificado-inmetro-p8033?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=lojavirtual&gclid=Cj0KCQjwio6XBhCMARIsAC0u9aGOzqStTHpSHWw5dRIAYfxVbQsCj4_16UgIyG4aOybAGkMf2g8uZ3oaAomJEALw_wcB). Acesso em 25 jul. 2022.

RAINBIRD. Sistema Lnkwifi. 2022. Disponível em: <https://www.rainbird.com/corporate/press-releases/rain-birds-new-lnk-wifi-module-offers-remote-irrigation-system-access>. Acesso em: 19 ago. 2022.

ROME2RIO. Deslocamento Palmas – Pedro Afonso. 2022. Disponível em: <https://www.rome2rio.com/pt/s/Palmas/Pedro-Afonso>. Acesso em: 09 set. 2022.

SANTOS, I.N. dos. Desempenho de sistemas pivô central. 2017. 43 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2017. Disponível em: [https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/iuri\\_tcc\\_2017\\_vers%E3o\\_final.pdf](https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/iuri_tcc_2017_vers%E3o_final.pdf). Acesso em: 20 abr. 2023.

TOLEDO, C.E.; PIRES NETO, L.R.; SILVA, T.L.G.R.; NOGUEIRA, J C.M. Viabilidade econômica-financeira da otimização de sistemas de irrigação tipo pivô central. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 3275-3284, 2019.

VAGAS.COM. Vagas técnico mecânico. 2022. Disponível em: <https://www.vagas.com.br/cargo/tecnico-mecanico>. Acesso em: 08 set. 2022.



VALLEY. Sistema Icon10. 2022. Disponível em: <https://www.valleyirrigation.com.br/icon10>. Acesso em: 19 ago. 2022.

WATERCONTROL. Kit de avaliação de sistema de irrigação. 2022. Disponível em: <https://www.watercontrol.com.br/produtos/irrigacao/kit-ensaio-de-aspersao>. Acesso em: 25 jul. 2022.

## 7. DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

ELIZABETH LIMA CARNEVSKIS<sup>1</sup>; FERNANDO CAMPOS MENDONÇA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ - USP, Avenida Pádua Dias, 11, Vila Independência, Piracicaba-SP, 13418-900, [elizabeth.carnevskis@usp.br](mailto:elizabeth.carnevskis@usp.br)

<sup>2</sup> Prof. Associado, Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ - USP, Avenida Pádua Dias, 11, Vila Independência, Piracicaba-SP, 13418-900, [fernando.mendonca@usp.br](mailto:fernando.mendonca@usp.br)

### Resumo

Tomando como base o princípio de funcionamento de um disdrômetro de impacto, em que a energia cinética de uma gota de chuva que cai sobre a placa do sensor, converte a mesma em tensão elétrica. Para isso foi proposto uma série de testes, para descobrir se é possível substituir os atuais coletores por sensores automatizados. Esses testes consistem em: comparação de massa de água com número de gotas; comparação de massa de água e tensão; variação de tensão a diferentes alturas e membranas; volume constante e volume coletado do aspersor com a tensão gerada pelo sensor. O piezoelétrico se mostrou um dispositivo bem acurado para captar gotas individuais e padrões de gotas.

Palavras-chave: Acurácia; Precisão; método de avaliação; automação.

### Abstract

#### DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR EVALUATION OF DISTRIBUTION UNIFORMITY IN IRRIGATION SYSTEMS

Carnevskis, E.L.; Mendonça, F.C.

Based on the operating principle of an impact disdrometer, in which the kinetic energy of a raindrop that falls on the sensor plate converts it into electrical voltage. whether it is possible to replace the current collectors by automated sensors. These tests consist of: comparing the mass of water with the number of drops; comparison of mass of water and tension; voltage variation at different heights and membranes; constant volume and collected volume from the sprinkler with the voltage generated by the sensor. The piezoelectric proved to be a very accurate device for picking up individual drops and droplet patterns.

Keywords: Irrigation; distribution uniformity; evaluation method.

### 7.1 Introdução

A evolução da agricultura foi diretamente influenciada pela transformação do espaço geográfico que as atividades humanas geram (PENA, 2023). Mas somente após a quarta e quinta revolução, que o método científico e computacional começaram a ser empregados na agricultura (PINGALI, 2012; HAZELL, 2009; FARMER, 1986; MARTOS et al., 2021).

Para que a agricultura se tornar o que é hoje, uma de suas bases foi a implantação de sistemas de irrigação, que evoluíram com o passar dos milênios, e se tornaram cada vez mais eficientes e automatizados (EMBRAPA, 2018). Porém, sua avaliação continua sendo feita de modo analógico, e isso poderia evoluir também.

Pensando nessa evolução, a construção de sistemas automáticos desenvolvidos com tal finalidade deve ser portáteis (principalmente para trabalhos de campo), resistentes às intempéries climáticas, fáceis de operar e registrar dados, e ter baixo custo.

Tomou-se como base o princípio de funcionamento de um disdrômetro de impacto, que se baseia na detecção de impactos individuais das gotas de chuva (SALMI et al.; 2011). Seu método de funcionamento é a conversão de energia cinética em volume de água, e isso é gerado pela queda da gota de chuva sobre o sensor. Em vez de coletores, usam sensores digitais.

Logo esse trabalho se propõe a construir uma nova metodologia para avaliar sistemas de irrigação, utilizando sensores piezoelétricos.

## **7.2 Material e Métodos**

### **7.2.1 Localização e caracterização do local de estudo.**

O estudo foi realizado no Laboratório de Solos e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP).

### **7.2.2 Descrição básica do experimento**

Para a realização do experimento foi utilizada a seguinte série de equipamentos:

- ✓ Bomba Peristáltica MiniPuls 3
- ✓ Balança de Precisão Unibloc Shimadzu
- ✓ Tripa de mico 200 (tubo de borracha)
- ✓ Água destilada a 24°C, obtida pelo método da osmose reversa
- ✓ Becker de Plástico para coleta
- ✓ Balão Volumétrico de 500 ml
- ✓ Suporte universal com garra
- ✓ Trena de 5 metros

- ✓ Sensores piezoelétrico acoplados a gabinetes de PVC com membrana de borracha (látex) e membrana de plástico (PEDB)
- ✓ Osciloscópio MSO2000B Tektronic

Para a realização desse experimento foram adotadas algumas constantes e as mesmas estão listadas na Tabela 18.

**Tabela 18:** Constantes utilizadas em laboratório

Constante	Valor	Unidade
Densidade (24°C)	0,9973	$\text{g.mL}^{-1}$
Diâmetro do tubo	3	$10^{-3} \text{ m}$
Velocidade da Bomba	10	RPM
Temperatura	24	°C

No primeiro teste foi posicionada a saída da bomba peristáltica a altura de 38,5 cm, quando era acionado um volume de água constante e conhecido que cai sobre um recipiente coletor e sobre a balança de precisão e era transcrito para o campo “resultados” deste relatório. O posicionamento dos equipamentos utilizados nesta etapa é mostrado na Figura 13 a seguir:



**Figura 13:** Posicionamento dos equipamentos no primeiro teste, situados em primeiro plano na foto, da esquerda para a direita: balão volumétrico, bomba peristáltica, suporte universal e balança de precisão.

Primeiramente, foi verificada a variabilidade da massa de gotas caindo a uma altura constante, para estabelecer uma relação entre voltagem e massa de água. O volume de cada gota foi obtido por meio da relação de densidade (fórmula 1).

$$\rho = \frac{M}{V} \rightarrow M = \rho \cdot V \quad (1)$$

Em que :

$\rho$ : Densidade da água (g/ml)

M: massa da gota de água (g)

V: Volume da gota (ml)

O ensaio teve duração necessária para que não houvesse saturação do sensor de gotas.

A média foi calculada através da seguinte fórmula:

$$M = \frac{N1+N2+N3+\dots+Ni}{i} \quad (2)$$

Em que:

M = média dos valores da tensão em mV

$N_i$  = valores da tensão em mV

i = número de vezes coletadas

O desvio padrão foi calculado com a seguinte fórmula:

$$\delta m = \frac{\sum_{i=1}^n |N_i - M|}{i} \quad (3)$$

Em que:

$\delta_m$  = desvio médio absoluto dos valores da tensão em mV

M = média dos valores da tensão em mV

$N_i$  = valores da tensão em mV

i = número de dados coletados

n = número de amostras coletadas

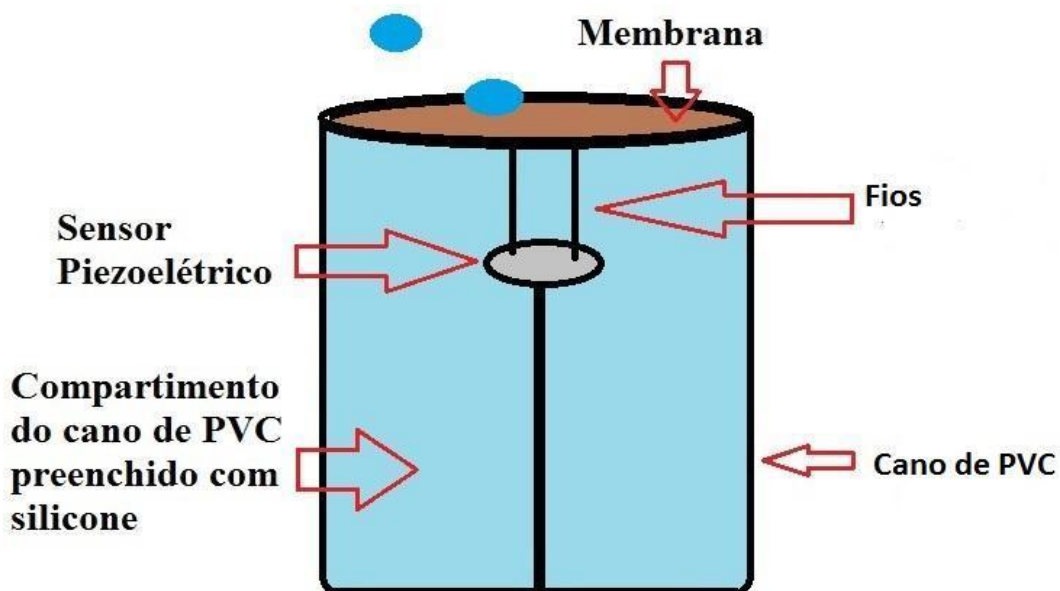
### 7.2.3 Construção do dispositivo e seus componentes

Primeiramente foram avaliados alguns tipos de sensores piezoelétricos dentre os disponíveis no mercado brasileiro, e foram escolhidos por meio de comparação entre as seguintes propriedades físicas:

- Ponto de Curie ou Temperatura de Curie
- Permissividade
- Fator de acoplamento eletromecânico

- Coeficiente de tensão piezoelétrico
- Módulo de Young
- Coeficiente de frequência
- Fator de qualidade mecânica
- Impedância elétrica
- Fator de dissipação
- Coeficiente de deformação

Como os sensores podem ser danificados caso entrem em contato com a água foi construído um gabinete que visa à otimização na leitura dos dados de precipitação dos sistemas de irrigação, por meio de um ambiente favorável à propagação de ondas causadas pela interação entre as partículas de água e uma membrana.

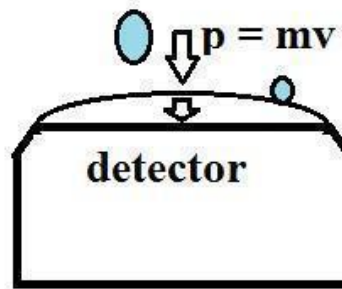


**Figura 14:** Esquema de montagem do sensor e do gabinete de proteção contra a umidade

Com os sensores dentro do gabinete foi realizado um teste de calibração do sensor piezoelétrico, utilizando volumes conhecidos de água, para estabelecer uma relação entre os pulsos (em volts) e a massa das gotas geradas a partir do volume conhecido de água caindo sobre o sensor.

Tomou-se como base o princípio de funcionamento de um disdrômetro de impacto, que se baseia na detecção de impactos individuais das gotas de chuva (SALMI *et al.*; 2011), a queda da gota de chuva sobre a placa do sensor converte o impacto da gota em pulso elétrico.

A construção do dispositivo é mostrada na Fig. 15. O sensor piezoelétrico é preso à estrutura do dispositivo por uma membrana que tem a função de proteger o sensor da umidade. Os pulsos de tensão fornecidos pelo elemento piezoelétrico poderão ser filtrados, amplificados, digitalizados e, finalmente, analisados.



**Figura 15:** Esquema simplificado do coletor de gotas

O material e as dimensões da tampa do detector foram selecionados de modo que a vibração de ressonância excitada pela gota de chuva impactante seja atenuada rapidamente. A área de superfície do sensor será determinada levando em consideração duas especificações (SALMI *et al.*; 2011):

a) Quanto maior a área de superfície do sensor, menor será a variação estatística no valor calculado da precipitação cumulativa.

b) Por outro lado, quanto maior a área de superfície do sensor, maior o número de impactos simultâneos da chuva, o que leva à imprecisão na interpretação dos sinais medidos.

No momento do impacto de queda, o elemento piezoelétrico se deforma, criando um sinal. O sinal de queda é definido como o sinal dado pelo elemento piezoelétrico para um impacto de queda. O comprimento de um sinal de queda depende do impacto da queda e das propriedades do material (DE JONG, 2013).

Com a construção desse dispositivo foi possível a realização dos testes seguintes, no qual era posicionada a saída da bomba peristáltica a uma determinada altura quando acionado um volume de água constante e conhecido caía sobre um dispositivo piezoelétrico convertendo a energia do impacto da água em um pulso elétrico, que era captado por um osciloscópio. A disposição dos equipamentos é mostrada na Figura 16:



**Figura 16.** Posicionamento dos equipamentos no segundo teste. Na figura consta; na esquerda para direita, com balão volumétrico, bomba peristáltica, osciloscópio, suporte universal com variação de altura e dispositivo de membrana . Ignorar a panela de pressão.

No segundo teste, foram coletados 150 pulsos a uma altura de 38,5 cm, altura essa determinada pelo suporte universal.

O terceiro e o quarto teste consistiram em coletar 30 gotas em diferentes alturas (20 até 120 centímetros, de 20 em 20 centímetros) utilizando tanto a membrana flexível quanto a membrana rígida.



**Figura 17.** Diferenças entre a membrana flexível (látex) e a rígida (polietileno de baixa densidade).



O quinto teste consistiu em comparar o volume de água que sai da bomba peristáltica com o que é recolhido por um coletor convencional de avaliação de sistema de irrigação e verificar se no mesmo intervalo de tempo, os volumes são próximos, como é mostrado na Figura 18, a seguir:



**Figura 18.** Posicionamento dos equipamentos no quinto teste.

O sexto teste consistiu em comparar a quantidade de gotas recolhidas no coletor convencional e no piezoelétrico, e verificar se isso resulta em volumes semelhantes.

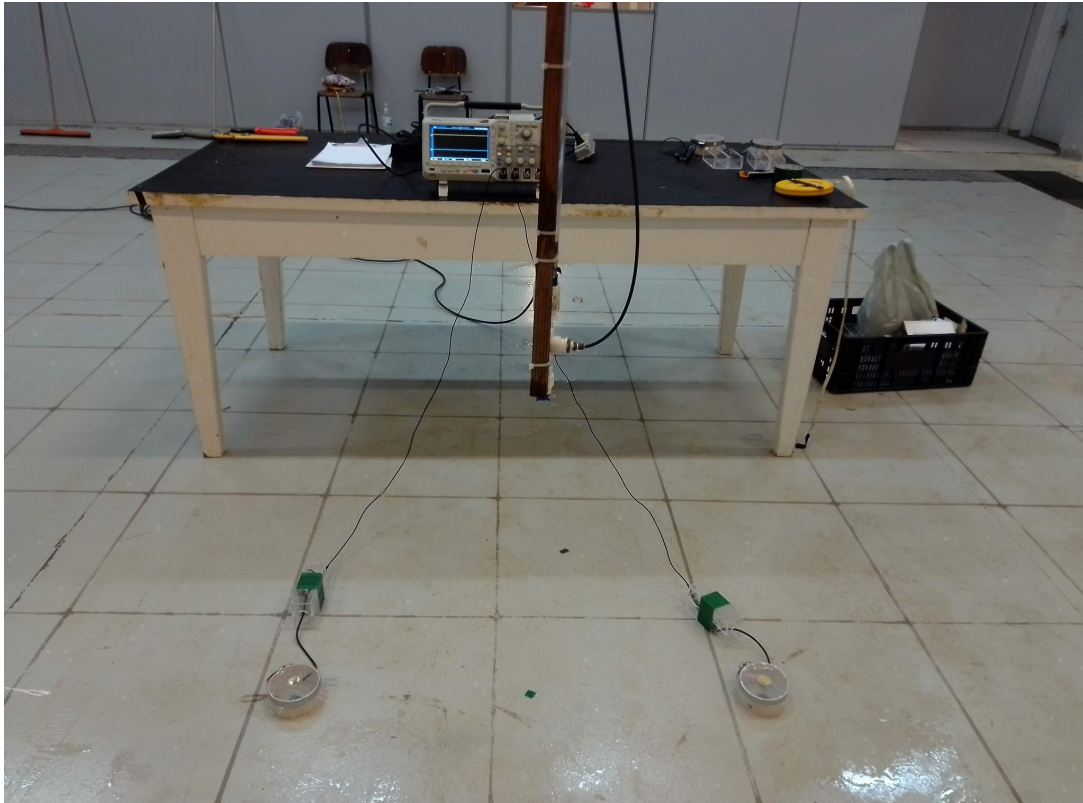


**Figura 19.** Posicionamento dos equipamentos no sexto teste

O sétimo teste consistiu em construir uma linha hidráulica com um aspersor, e verificar se o piezoelétrico consegue capturar a frequência de gotas que caem sobre ele. Os ensaios foram feitos em ambiente protegido (laboratório) e seguindo instruções constantes na norma ABNT NBR ISO 7749-1 (ABNT, 2000): a temperatura do ambiente deve estar entre 15 e 30° C; os coletores de água devem estar dispostos com espaçamento igual entre si e utilizando um único aspersor para obter uma curva de caracterização de distribuição de água. Ainda segundo esta norma, o tempo de medição deve ser de 60 minutos, intervalo suficiente para que haja água nos coletores suficiente para medir, utilizando uma proveta volumétrica. Os coletores utilizados no ensaio são cilíndricos, com altura mínima de 15 cm e seu diâmetro varia entre  $\frac{1}{2}$  e 1 vez a sua altura, porém, sempre maior que 8,5 cm (ISO 15886-3, 2012). Na Figura 21, é possível observar o modelo do coletor utilizado.



**Figura 20:** Coletor utilizado para os testes, fabricado pela Fabrimar. O esquema da montagem dessa linha é mostrado na Figura 21:



**Figura 21.** Posicionamento dos equipamentos no sétimo teste

### 7.3 Resultados e Discussão

#### 7.3.1 Relação entre a massa de água e o número de gotas

No primeiro teste foram obtidos a massa de água com uma saída e o número de gotas. Durante um minuto, foram coletadas amostras de água sobre a balança. Neste mesmo intervalo de tempo foram contadas, utilizando um aplicativo, quantas gotas caem sobre a balança, os valores médios são mostrados na Tabela 19:

**Tabela 19:** Ensaio 1: número de gotas por tempo

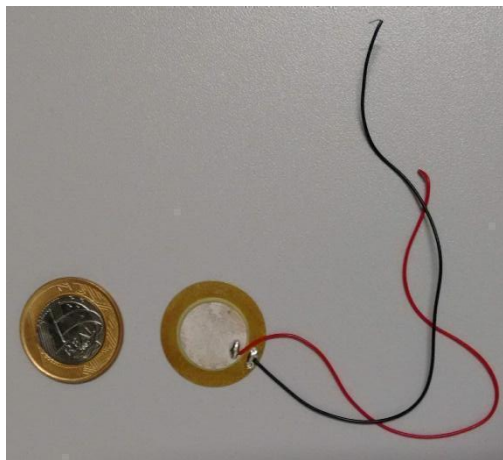
	Tempo (min)	Nº de gotas	Massa por gota (g)	Volume (mL)	Volume por gota (mL)	Vazão (ml/min )	Vazão (m <sup>3</sup> /min)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
<b>Média</b>	1,053	51,2	0,046	2,358	0,046	2,273	2,27E-06	3,79E-08
<b>Desvio</b>	0,087	0,64	2,27E-05	0,030	0,001	0,142	1,42E-07	2,37E-09

Assim, estabeleceu-se que uma gota produzida por um tubo de diâmetro de 3 mm tem a massa de  $4,6E-02 \pm 2,3E-05$  gramas e um volume de  $4,6E-02 \pm 1,0E-03$  mL. O volume foi obtido utilizando a relação expressa na fórmula 1. A água destilada foi utilizada, pois a água proveniente de torneira pode

apresentar características diferentes quanto a densidade, e isso se deve ao local onde ela foi coletada e ao tipo de tratamento que ela foi submetida.

### 7.3.2 Relação entre a massa de água e a tensão

Foi realizada uma pesquisa nos *websites* e fichas de dados (Mil-Std-1376b(1995); ATCP(2019); FARACO(2013)) dos fabricantes de cada um dos tipos de sensor piezoelétrico apresentados no item cinco, e com isso montou-se a Tabela 7 da Revisão Bibliográfica. Nela estão descritas os usos de cada tipo sensor piezoelétrico, e assim optou-se pelo sensor tipo pastilha neste estudo (Figura 22).



**Figura 22:** Piezoelétrico escolhido, em comparação com uma moeda de um real.

Como esse sensor não pode ser molhado, foi construído um gabinete. Esse sensor foi ligado ao osciloscópio, para que cada batida na membrana fosse detectada. Assim estabeleceu-se a seguinte relação: uma gota de água destilada, que cai a uma altura de 38,5 cm, com massa de  $4,6E-02 \pm 2,3E-05$  gramas produz um pulso de  $63,3 \pm 8,4$  mV.

### 7.3.3 Relação entre a tensão e as alturas

Nos testes 3 e 4, foram coletadas 30 gotas em cada altura, utilizando os dois tipos de membrana. A primeira membrana (MF) utilizada foi a de látex e a segunda (MR) foi de polietileno de baixa densidade.

Os valores de altura na medida foram escolhidos segundo os critérios a seguir:

- Distância mínima de vinte centímetros: menor que isso, o sistema de irrigação pode produzir um filete de água, devido a tensão superficial da água.
- Distância máxima de cento e vinte centímetros: a distâncias maiores que essa, as gotas adquirem velocidade devido a aceleração da gravidade (Tabela A4 com os valores do momento de inércia adquirida com gotas pequenas). A dedução desta equação está presente no apêndice A

**Tabela 21:** Ensaio 3: Relação entre tensão e altura, com a MF

Altura (cm)	Média (mV)	Moda (mV)	Mediana (mV)	Máximo (mV)	Mínimo (mV)
20	33,3±3,8	36,0	34,0	42,0	22,0
40	51,6±10,6	40,0	49,0	80,0	34,0
60	79,4±10,5	68,0	79,0	100,0	54,0
80	123,6±33,5	160,0	116,0	188,0	60,0
100	199,9±55,9	199,9	192,0	294,0	84,0
120	274,8±60,3	160,0	281,0	432,0	152,0

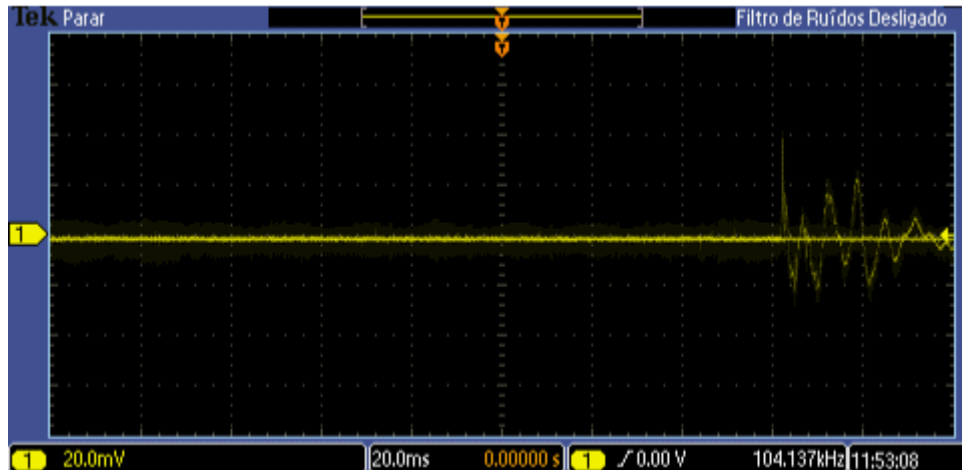
**Tabela 22:** Ensaio 4: Relação entre voltagem e altura, com a MR

Altura (cm)	Média (mV)	Moda (mV)	Mediana (mV)	Máximo (mV)	Mínimo (mV)
20	204,9±40,0	240,0	210,0	42,0	130,0
40	381,5±46,2	360,0	380,0	500,0	320,0
60	512,9±107,0	440,0	540,0	670,0	300,0
80	585,5±206,4	400,0	550,0	930,0	300,0
100	609,0±210,8	609,0	590,0	960,0	260,0
120	523,9±136,3	400,0	500,0	890,0	360,0

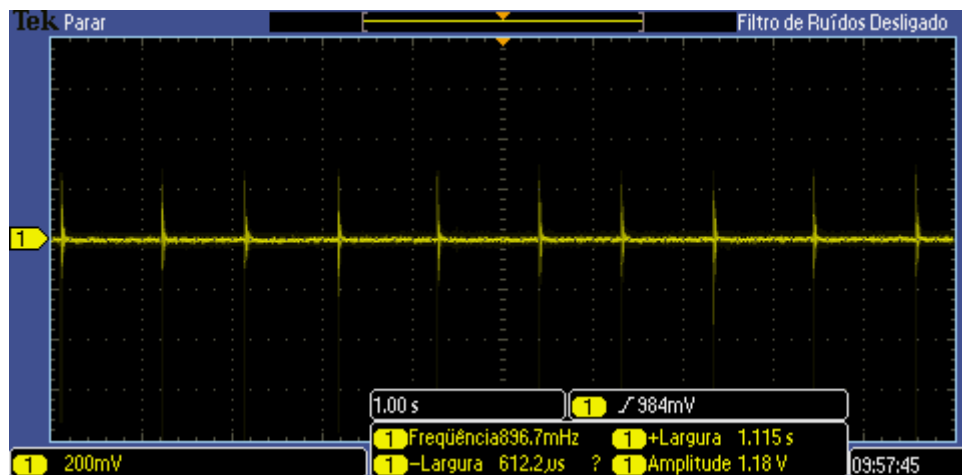
Para saber se um conjunto de dados é bem ilustrado por sua média; a mediana e a moda devem apresentar valores aproximados entre si e a média (Bussab e Morettin, 2017).

No decorrer da coleta de dados, o fenômeno da reverberação foi notado na utilização da MF, principalmente com o aumento na diferença de altura entre o sensor e a saída da bomba peristáltica.

Observando as tabelas 21 e 22 é possível ver que quanto maior a diferença de altura entre o sensor e a saída da bomba, menos as medidas de tendência central coincidem. É possível que esse fenômeno se deve à presença do gabinete; para evitar que o sensor piezoelétrico fosse exposto a umidade, foi construído um gabinete de PVC com uma membrana acoplada a ele e na membrana o sensor piezo foi colado, como a membrana é de látex, a mesma vibra quando a gota cai sobre ela. Para evitar o fenômeno de reverberação, optou-se por trocar a membrana flexível por outra rígida. A seguir, temos os exemplos da mesma gota, caindo da mesma altura. É possível observar a reverberação na utilização da membrana flexível (Figura 23), fenômeno não observado utilizando a membrana rígida (Figura 24).



**Figura 23:** Pulso gerado por uma gota unitária a 40 cm de altura do sensor, com a membrana flexível



**Figura 24:** Pulso gerado com saída a 40 cm de altura do sensor, com a membrana rígida

Analisando o comportamento do osciloscópio, é possível notar uma frequência de tensão, gerada por gotas individuais iguais.

#### 7.3.4 Volume constante

No teste 5, que consistiu em comparar o volume de água que sai da bomba peristáltica com o que é recolhido por um coletor convencional de avaliação de sistema de irrigação e verificar se no mesmo intervalo de tempo, os volumes são próximos; obteve-se média de 32 ml.

#### 7.3.5 Comparação entre volume coletado do aspersor com a tensão do piezoelétrico

O teste 6 consistiu em comparar o volume de água que sai do aspersor com o sinal que é gerado pelo piezoelétrico. Utilizou-se um microaspersor Inverted model Modelo ½” M NPT da Senninger (Figura 25), pois o mesmo é o que apresenta as menores gotas.



**Figura 25:** Aspersor utilizado no teste 6

Esse aspersor foi instalado conforme as recomendações descritas pelo fabricante (SENNINGER, 2023), e foi posicionado a 60 cm do chão. A linha hidráulica foi acionada com uma pressão de 3,12 kgf/cm<sup>2</sup> ( 44,38 PSI).

A fim de realizar um teste padrão no aspersor selecionado, foi utilizado o método de Christiansen (ABNT. NBR/ISO 11545, 2016), conforme a Figura 26 que ilustra a distância e a posição dos coletores, onde foi obtido o valor de uniformidade de 88%.

Depois de realizado o teste, dois dos coletores posicionados a 60 cm foram substituídos por sensores, conforme ilustra a Figura 27. E a Figura 28, mostra o detalhe do sensor recebendo a rega. E por fim a Figura 29, mostra a leitura obtida pelo osciloscópio durante o teste.

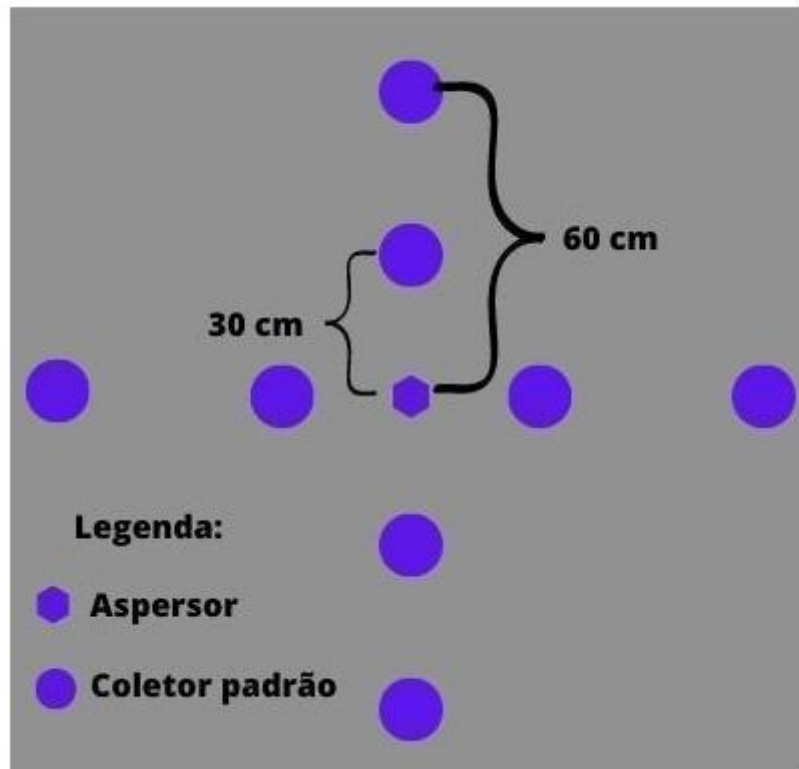


Figura 26: Disposição dos elementos durante o teste 6

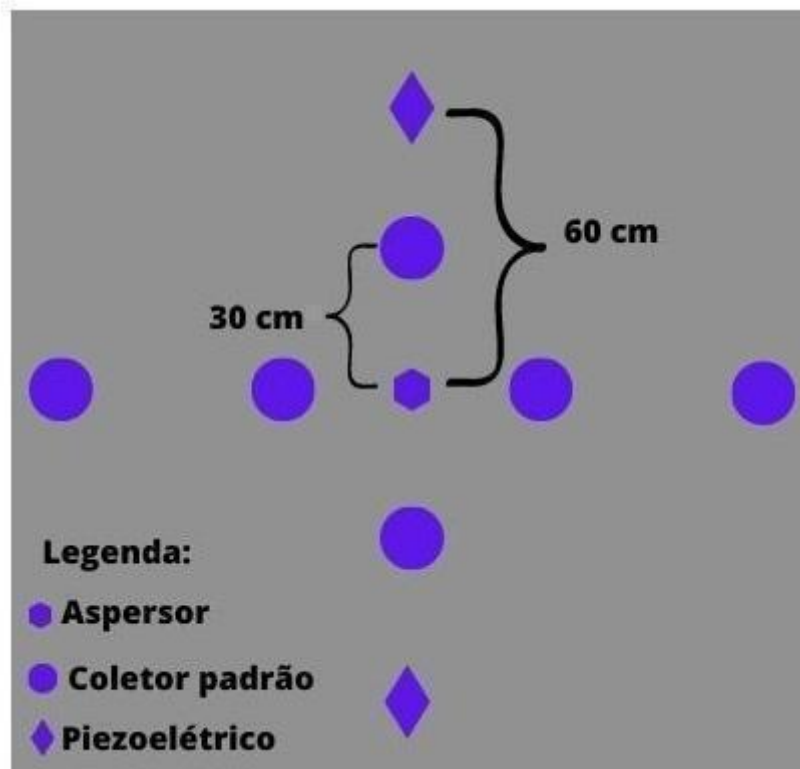
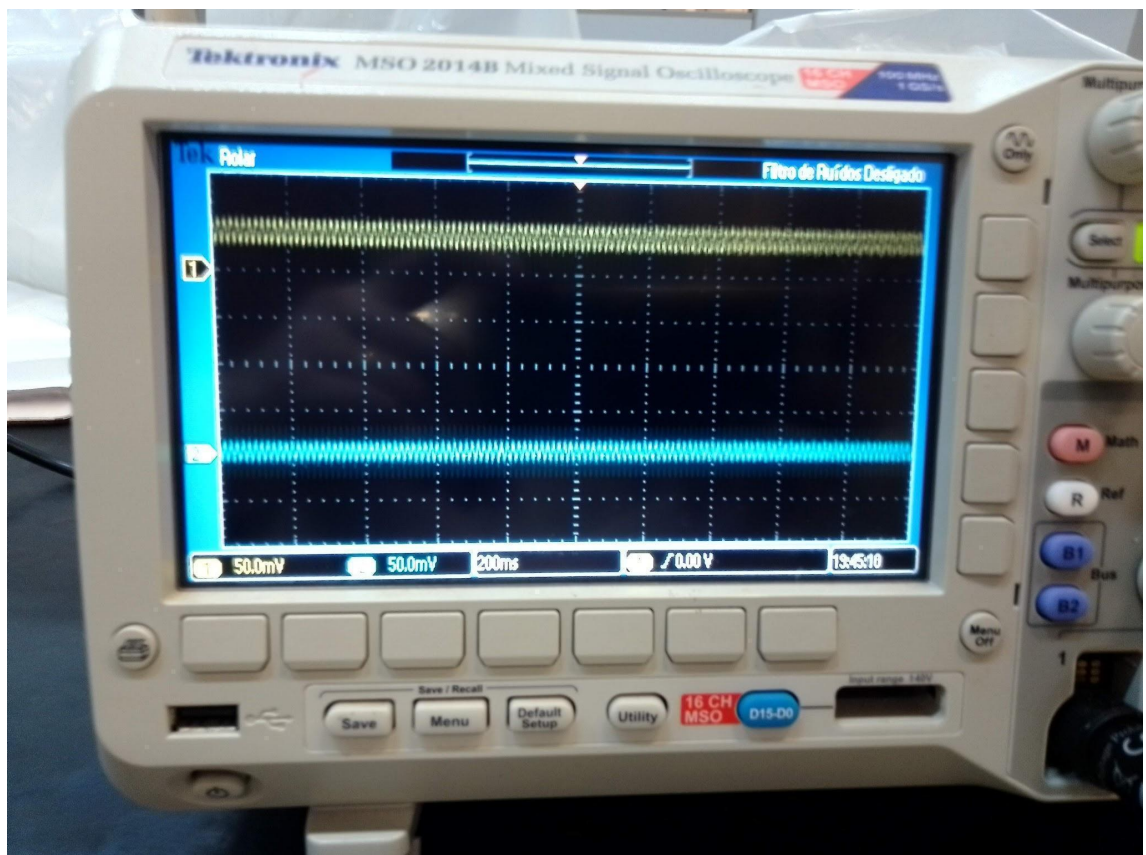


Figura 27: Disposição dos elementos durante o teste 6, com os sensores





**Figura 28:** Detalhamento do sensor, recebendo água (parte circular), a parte retangular é somente uma emenda de fio, protegida por uma caixa de acrílico.



**Figura 29:** Frequências obtidas com o sensor piezoelétrico durante o teste.

O teste com os sensores ficou ativo durante 60 minutos, a fim de se aferir a estabilidade do sinal. Embora a resposta do sensor seja instantânea, para fins de comparação com o teste padrão foi necessário utilizar os parâmetros da norma especificada. Durante o teste foi realizada a correlação

entre o volume contido no coletor, que estava na mesma posição do sensor e o padrão obtido através da leitura do gráfico apresentado no osciloscópio.

Após o teste notou-se que os coletores que estavam a 60cm do aspersor tinham uma média de 270 mL de água e durante este mesmo período o sinal emitido pelo sensor permaneceu estável (em 20 mV), comprovando que a leitura da uniformidade da aspersão pode ser realizada instantaneamente.

#### 7.4 Conclusões

Considerando as condições em que o presente estudo foi desenvolvido e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) O uso do princípio piezoelétrico é compatível com a captação de gotas, tanto as individuais, como as de um sistema de irrigação por gotejamento, quanto as de *sprayers* de pivôs centrais ou de aspersores.
- b) Fazendo uso desses dados é possível desenvolver um novo método de análise de uniformidade de sistemas de irrigação.

#### Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. NBR/ISO 7749-1. Equipamentos de irrigação agrícola -Aspersores rotativos - Parte 1: Requisitos para projetos e operação. Rio de Janeiro, Brasil, 2000. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR/ISO 11545: equipamentos de irrigação agrícola – máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com *sprayers* ou aspersores – determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 2016a. 21 p.

ATCP Engenharia Física, CERÂMICAS Piezoelétricas: funcionamento e propriedades. 2019. São Carlos – SP. Disponível em: [www.atcp.com.br](http://www.atcp.com.br). Acesso 23 ago. 2019

DE JONG, S. Low cost disdrometer: Improved design and testing in an urban environment. Tese de Doutorado. Faculteil Civiletechnicken Geowetenschappen. Delft University of Technology. 2013. 52p.

EMBRAPA. Visão 2030 : o futuro da agricultura brasileira. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 212 p.

FARACO, B. S. Fibras nanoestruturadas de titanato de bário e estrôncio: Síntese por electrospinning e caracterização microestrutural. 2013.

FARMER, B. H. Perspectives on the ‘green revolution’ in south asia. Modern Asian Studies, v. 20, n. 1, p. 175-199, 1986.

HAZELL, P. B.R. The Asian green revolution. International Food Policy Res. Inst., 2009.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 15886-3 – Agricultural irrigation equipment – sprinklers – part 3 – Characterization of distribution and test methods. 2012.

MARTOS, V., AHMAD, A., CARTUJO, P., & ORDOÑEZ, J. (2021). Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911.

MILITARY STANDARD 1376B: Piezoelectric Ceramic Material And Measurements Guidelines For Sonar Transducers 1995. Disponível em: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-13001399/MIL\\_STD\\_1376B\\_666/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-13001399/MIL_STD_1376B_666/). Acesso em 22 ago. 2019

MORETTIN, P. A., & BUSSAB, W. O. (2017). *Estatística básica*. Saraiva Educação SA.

PENA, Rodolfo F. Alves. "Evolução da agricultura e suas técnicas"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/evolucao-agricultura-suas-tecnicas.htm>. Acesso em 22 abr. 2023.

PINGALI, P L. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 31, p. 12302-12308, 2012.

SALMI, A., ELOMAA, L., KOPSALA, P., LAUKKANEN, E., & OYJ, V. (2011). Piezoelectric Vaisala Raincap® rain sensor applied to drop size distribution monitoring. In *Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation* (pp. 1-7). Geneva: World Meteorological Organization.

SENNINGER. *Agricultural Irrigation | Low Pressure - High Performance*, 2023. Disponível em: <https://www.senninger.com/sites/senninger.hunterindustries.com/files/solid-set-nursery-greenhouse-products-catalog.pdf> Acesso em 10 abr. 2023

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Tendo em vista que o sensor piezoelétrico utilizado no presente trabalho é robusto e preciso para captar as frequências geradas por gotas de diversos tamanhos, é possível a construção de um dispositivo que calcule a uniformidade e um algoritmo que forneça esse valor instantaneamente. Para atingir tal objetivo é necessário o desenvolvimento de várias aplicações tecnológicas em futuros trabalhos de pesquisa.



## APÊNDICE

### Apêndice A: Trajetória da partícula

Descrição matemática do momentum adquirido da gota, conforme aumenta a distância entre o emissor de gotas e o coletor.

Resumo: Para essa descrição foi desenvolvido o movimento da gota quando sai do emissor, para um caso genérico e para o caso específico. Também foram utilizados dados obtidos em laboratório para a realização dos cálculos.

#### Caso genérico: Supondo a gota um corpo pontual

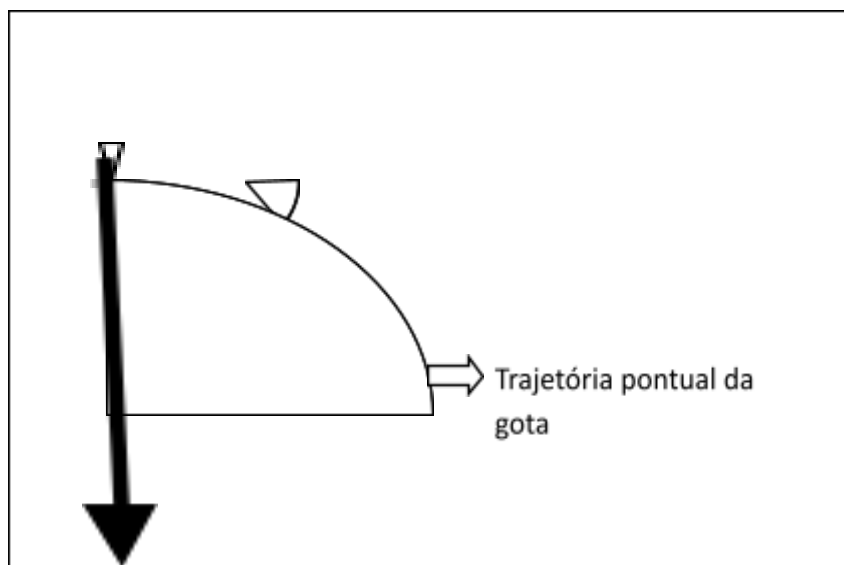


Figura A1: Gota saindo de um emissor

Onde  $x$  é o deslocamento horizontal e  $y$  é o deslocamento vertical da gota, assim que ela sai do emissor, temos o seu equacionamento.

X:

$$a_x = 0 \quad (1)$$

$$V_x(t) = V_0 \cos \alpha \quad (2)$$

$$X(t) = V_0 \cos \alpha t \rightarrow t = \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \quad (3) \text{ e } (4)$$

Y:

$$a_y = -g \quad (5)$$

$$V_y(t) = V_0 \sin \alpha - gt \quad (6)$$

$$Y(t) = V_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (7)$$

Em que:

$g$  - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$t$  - tempo (s)

$V_0$  - velocidade da gota quando sai dos emissores

$\alpha$  - ângulo do aspersor

$y$  - altura do emissor com relação ao chão

$x$  - distância horizontal entre o emissor e o solo

Substituindo (4) em (7):

$$Y(t) = V_0 \operatorname{sen} \alpha \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right) - \frac{1}{2} g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2$$

$$Y(t) = tg \alpha x - \frac{1}{2} g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2 \quad (8)$$

Sendo:

$$\left\{ Y(t)_{\omega k_3} \right\} = \left\{ tg \alpha x_{\omega k_1} \right\} - \left\{ \frac{1}{2} g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2_{\omega k_2} \right\}$$

$$-k_2 x^2 + k_1 x - k_3 = 0 \quad (9)$$

Por Báskara:

$$\Delta = b - 4ac \rightarrow \Delta = k_1 - 4k_2 k_3$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$x_1 = \frac{k_1 - \sqrt{k_1 - 4k_2 k_3}}{2k_2} \quad x_2 = \frac{k_1 + \sqrt{k_1 - 4k_2 k_3}}{2k_2}$$

Substituindo  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  :

$$x_1 = \frac{tg \alpha x - \sqrt{tg \alpha x - 2g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2} Y(t)}{g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2} \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{tg \alpha x + \sqrt{tg \alpha x - 2g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2} Y(t)}{g \left( \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \right)^2} \quad (11)$$

**Caso particular: gota caindo da bomba peristáltica, quanto tempo demora para ela bater no sensor de acordo com a altura:**

A componente  $x = 0$ , logo ficamos com:

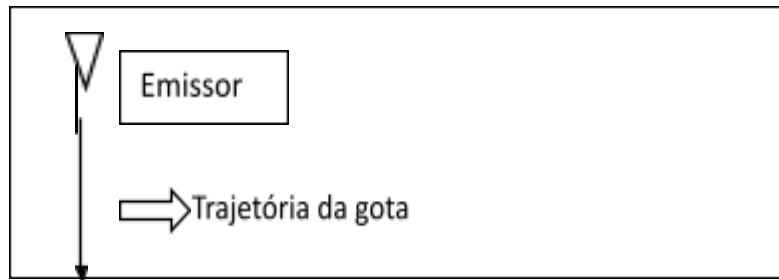


Figura A2: Gota saindo de um emissor (caso particular)

X:

$$a_x = 0 \quad (12)$$

$$V_x(t) = V_0 \cos \alpha, \text{ como } \cos 90 = 0, V_x(t) = 0 \quad (13)$$

$$X(t) = V_0 \cos \alpha t \rightarrow t = \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \quad \text{Como } V_x(t) = 0, X(t) = 0 \quad (14) \text{ e } (15)$$

Y:

$$a_y = -g \quad (16)$$

$$V_y(t) = V_0 \sin \alpha - gt = V_0 - gt \quad (17)$$

$$Y(t) = V_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2}gt^2 = V_0 t - \frac{1}{2}g \quad (18)$$

$$\left\{ Y(t) \right\}_{\omega_{k_3}} = \left\{ V_0 t \right\}_{\omega_{k_1}} - \left\{ \frac{1}{2}gt^2 \right\}_{\omega_{k_2}}$$

$$-k_2 t^2 + k_1 t - k_3 = 0 \quad (19)$$

Por Baskara:

$$\Delta = b^2 - 4ac \rightarrow \Delta = k_1^2 - 4k_2 k_3$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$x_1 = \frac{k_1 - \sqrt{k_1^2 - 4k_2 k_3}}{2k_2}$$

$$x_2 = \frac{k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2 k_3}}{2k_2}$$

Substituindo  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ :



$$t_1 = \frac{V_0 - \sqrt{V_0^2 - 2gY}}{g} \quad (20)$$

$$t_2 = \frac{V_0 + \sqrt{V_0^2 - 2gY}}{g} \quad (21)$$

Caso consideremos que a gota seja um corpo, considerando a queda, serão necessários alguns parâmetros:

- Diâmetro:  $D = 2R$
- Velocidade de impacto normal:  $V$
- Densidade do líquido:  $\rho_l$
- Densidade do gás:  $\rho_g$
- Viscosidade cinemática e dinâmica
- Gás:  $\nu_g = \mu_g / \rho_g$
- Líquido:  $\nu_l = \mu_l / \rho_l$
- Tensão superficial:  $\gamma$
- Aceleração gravitacional:  $g$
- 

Por se tratar somente de uma interação entre água e ar atmosférico, alguns desses parâmetros tornam-se constantes:

- $\rho_l = 997 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_g = 1,2929 \text{ g/l [ } 0^\circ\text{C, } 760 \text{ mmHg]}$
- $\mu_l = 0,001005 \text{ kg/m.s}$
- $\mu_g = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$
- $\nu_l = 1,003 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $\nu_g = 15,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $\gamma = \text{Ar e H}_2\text{O a } 20^\circ\text{C } 0,0074 \text{ kgf/m}$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Basicamente, o que muda é o diâmetro do bocal do aspersor e a velocidade de saída da gota, que foram obtidos em laboratório. Com os mesmos foi calculado o tempo de queda da gota.

Dados:

$$Q \text{ (vazão)} = 3,79 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \pm 2,37 \cdot 10^{-9}$$

$$D_d \text{ (Diâmetro interno)} = 3 \text{ mm ou } 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$V \text{ (velocidade)} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Tabela A1: Variação do tempo de queda de uma gota unitário, de acordo com o aumento da altura

Altura(m)	Tempo (s)
0,2	0,20
0,4	0,29
0,6	0,35
0,8	0,40
1	0,45
1,2	0,50
1,4	0,53
1,6	0,57
1,8	0,61
2	0,64

Como é possível observar na Tabela A1, quanto maior a distância entre o emissor e o chão, maior será o tempo de deslocamento. Para uma melhor visualização, foi construído o gráfico A1, com essas informações:

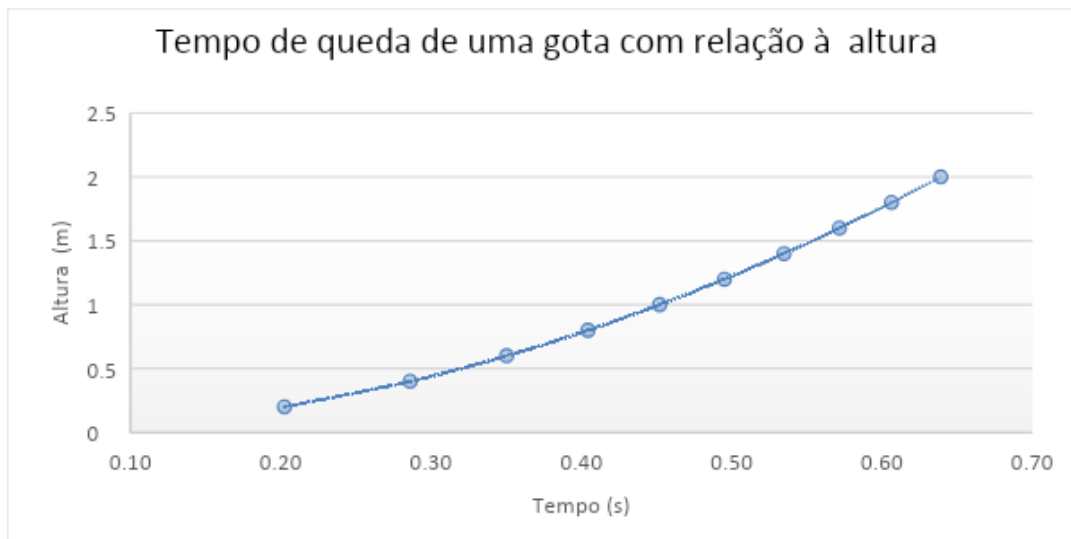


Gráfico A1: Relação entre o tempo de queda da gota e a variação de altura.

Utilizando as equações do movimento retilíneo com aceleração constante (equação 7, neste apêndice), vamos calcular a velocidade final dessa gota a cada altura:

Tabela A2: Variação da velocidade final de uma gota unitária, de acordo com o aumento do tempo

Tempo (s)	Velocidade Final (m/s)
0,20	0,20002
0,29	0,40002
0,35	0,60003
0,40	0,80003
0,45	1,00004
0,50	1,20004
0,53	1,40005
0,57	1,60005
0,61	1,80005
0,64	2,00005

Como é possível observar na Tabela A2, quanto maior o tempo que leva para a gota atingir o chão, maior será a velocidade final. Para uma melhor visualização, foi construído o gráfico A2, com essas informações:

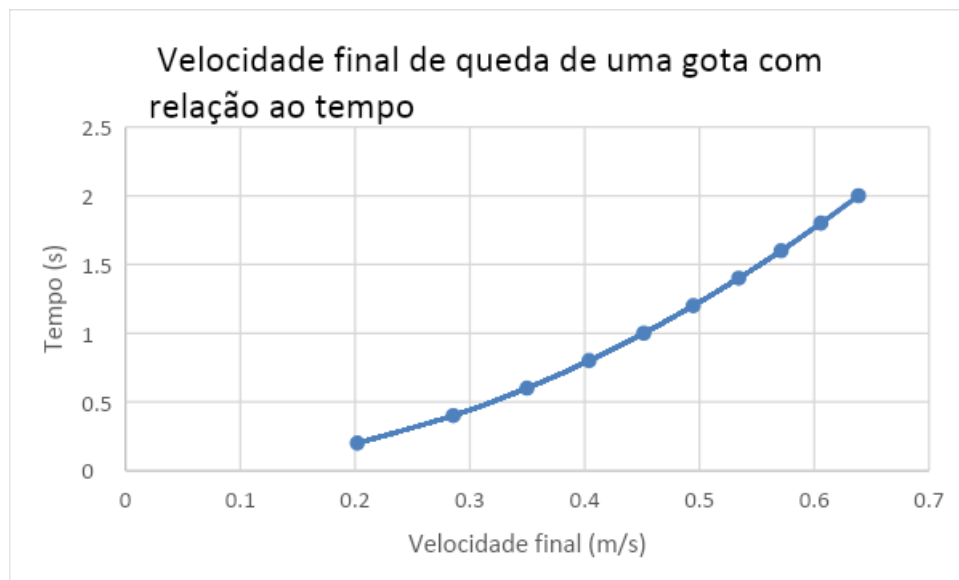


Gráfico A2: Relação entre a velocidade final de queda de uma gota com o tempo.

Com os valores das velocidades e dos tempos, podemos calcular o momento linear de uma partícula, com a seguinte fórmula:

$$P = mV \quad (23)$$

Utilizando os valores da velocidade final e da massa da gota ( $4,6E-02 \pm 2,3E-05$  gramas), encontrada em laboratório, foi calculado o momento linear, os valores estão expressos na Tabela A3.

Tabela A3: Variação do momento linear da gota com relação a sua velocidade final

Velocidade Final (m/s)	Momento Linear (kgm/s)
0,20002	0,00920
0,40002	0,01840
0,60003	0,02760
0,80003	0,03680
1,00004	0,04600
1,20004	0,05520
1,40005	0,06440
1,60005	0,07360
1,80005	0,08280
2,00005	0,09200

Como é possível observar na Tabela A3, quanto maior a velocidade final da gota, maior será o seu momento. Para uma melhor visualização, foi construído o gráfico A3, com essas informações:

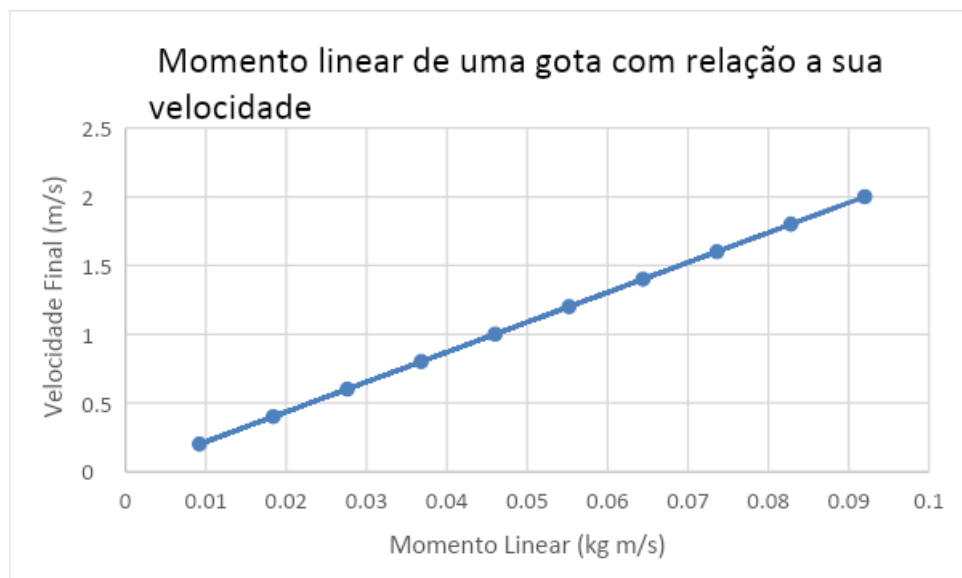


Gráfico A3: Relação entre a velocidade final de queda de uma gota com o momento linear.

E por fim, Newton, em seu famoso Principia, expressou a segunda lei do movimento em termo de momento linear (a qual ele chamou de “quantidade de movimento”). Em terminologia moderna, a

segunda lei de Newton pode ser expressa da seguinte maneira: A taxa de variação do momento linear de um corpo é proporcional à resultante das forças que atuam no corpo e tem a direção desta força. Expressando em termos de equação.

$$F = \frac{dP}{dt} \quad (24)$$

Calculando a variação da força, de acordo com a variação da altura (Tabela A4)

Tabela A4: Variação da força com relação à altura

Altura (m)	F (N)
0,20	0,05
0,40	0,09
0,60	0,14
0,80	0,18
1,00	0,23
1,20	0,28
1,40	0,32
1,60	0,37
1,80	0,41
2,00	0,46

Como é possível observar na Tabela A4, quanto maior distância entre o emissor e o sensor, maior será a força. Para uma melhor visualização, foi construído o gráfico A4, com essas informações:

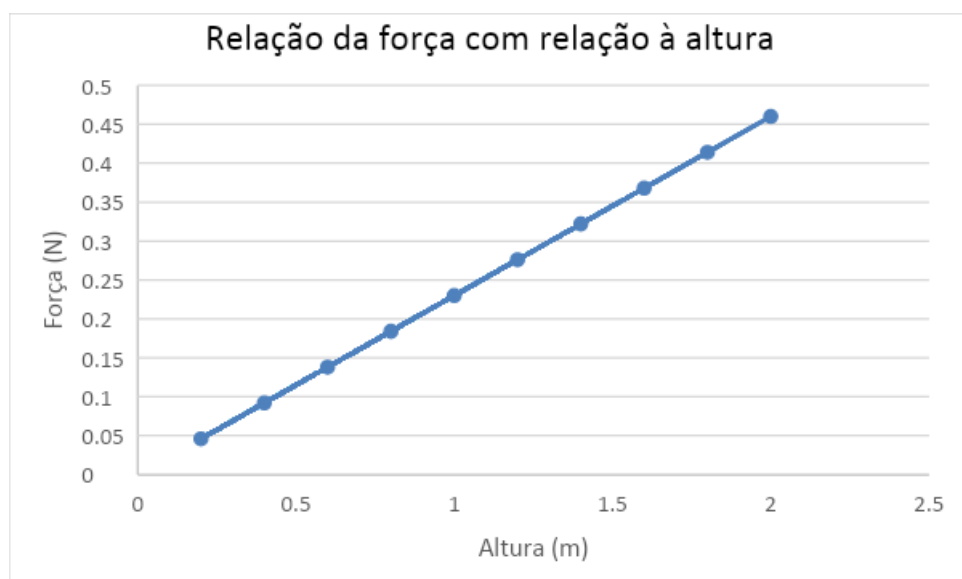


Gráfico A4: Relação entre a força e a altura.