

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO CONTINUO DA UMIDADE DO SOLO E
RADIÇÃO SOLAR**

Juliana Sánchez Benítez

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2021**

SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO CONTINUO DA UMIDADE DO SOLO E RADIAÇÃO SOLAR

Juliana Sánchez Benítez

Tecnóloga em desenho e integração de automatismos Mecatrônicos, 2010

Engenheira Mecatrônica, 2015

Engenheira Agrônoma, 2018

Discente de mestrado em engenharia agrícola

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame

COORIENTADOR:

Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA

S211s	<p>Sánchez Benítez, Juliana. Sensores de baixo custo para monitoramento contínuo da umidade do solo e radiação solar / Juliana Sánchez Benítez. Cruz das Almas, Bahia, 2021. 53f.; il.</p> <p>Orientador: Lucas Melo Vellame. Coorientador: Vital Pedro da Silva Paz.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Mestrado em Engenharia Agrícola.</p> <p>1.Evapotranspiração – Umidade – Análise. 2.Física do solo – Manejo. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 631.47</p>
-------	---

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Antonio Marcos Sarmiento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).
(os dados para catalogação foram enviados pela usuária via formulário eletrônico).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO
CONTINUO DA UMIDADE DO SOLO E RADIAÇÃO SOLAR**

Comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado de
Juliana Sánchez Benítez

Aprovada em 06 de agosto de 2021

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Orientador

Prof. Dr. Christian José Mendoza Castiblanco
Universidad Nacional de Colombia
Examinador externo

Prof. Dr. Gildeberto de Souza Cardoso
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Examinador externo

DEDICATÓRIA

Ofrezco

A mis padres Gloria y Orlando
A mi hermana Estefania
A mi compañero Diego

Dedico

A la estrellita que me acompaña desde el cielo.
En memoria de María Nelly Benítez

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de continuar minha formação acadêmica e profissional.

A CAPES pela bolsa de estudos e pelo apoio financeiro que permitiram a realização desta pesquisa.

A meus pais, avós, irmã, primos e primas, tios e tias, pelo apoio e total confiança. Estamos longe no corpo, mas perto desde o coração.

A meu Orientador Lucas e sua esposa Josenita pelo apoio, amor e acolhimento em sua casa. Obrigada por ser minha família em Brasil todo este tempo.

Aos professores Alisson Jadavi P do IF Baiano, ao Professor José Carlos de Araújo da UFC e ao professor Christian José Mendoza da Universidade Nacional da Colômbia pelos ensinamentos transmitidos dentro e fora das disciplinas em especial durante a o trabalho em campo. São exemplos de conduta e profissão.

Aos professores do PPGEA-NEAS e funcionários em especial a Sueli, pela paciência, apoio e exemplo de profissionalismo.

Aos colegas e amigos Igor, Iumi, Ângela, Francisco, Djalma, Fabio T, Fabio S. Geovana, Javes, Neilon e Lúcio. Pelo apoio, pelas risadas, e toda sua amizade dentro e fora do laboratório de Instrumentação.

Aos estagiários Clara, Bruna, Luiz e pelo grande apoio no desenvolvimento da dissertação e a amizade.

A minhas amigas em Brasil Maize e Tatiane pela convivência, pelo cuidado e acolhimento.

Ao meu companheiro Diego e toda sua família pelo amor incondicional.

A Eros, Katy, Sammy, Chacho e Aidê.

SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO CONTINUO DA UMIDADE DO SOLO E RADIAÇÃO SOLAR

RESUMO: A implementação de sensores de baixo custo permite a realização de estudos de monitoramento, através da aquisição de dados em tempo real da distribuição espaço temporal de uma variável analisada, potencializando a realização de um maior número de pesquisas. A construção e uso destes sensores também possui função didática, uma vez que permite um envolvimento mais direto com as características físicas que definem o processo a ser estudado. Na presente dissertação são caracterizados dois tipos de sensor de baixo custo, um sensor de radiação solar e outro de umidade do solo, construídos e aprimorados com o objetivo de serem usados em múltiplas pesquisas, e práticas acadêmicas. O sensor de umidade reage à variação das propriedades eletromagnéticas do solo, contido entre as hastes metálicas, as quais variam proporcionalmente com as mudanças no teor de água presente nos poros do solo. Foi desenvolvido um modelo matemático que estima a frequência de saída do circuito oscilador do sensor baseado na interação sonda-solo com o intuito de estimar a porcentagem de umidade presente no solo. Aplicando o modelo em um algoritmo computacional conseguiu-se estimar a umidade volumétrica no solo com uma incerteza menor a $\pm 3\%$ em um intervalo de confiança de 95%. O algoritmo tem como parâmetros a porosidade e a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. A medição da radiação solar tem grande importância para estimativa da demanda evapotranspirativa da atmosfera. Apesar de sua importância, a radiação solar não tem sido medida em muitas estações meteorológicas dado o alto custo desse sensor. O piranômetro está baseado em um fotodiodo de silício, que apresenta uma corrente elétrica entre seus terminais proporcional à radiação que o atinge. Foram construídos 16 sensores para avaliação de sua acurácia na estimativa da radiação solar e o efeito das incertezas quanto a estimativa da evapotranspiração de referência. Os sensores foram instalados em campo aberto e em casa de vegetação realizando medições contínuas durante um ano em conjunto com um sensor de termopilha padrão secundário durante este tempo os sensores não apresentaram deterioro físico nem mudanças no desvio padrão $0,04 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. A incerteza na estimativa da ETo pelo algoritmo de Penman-Monteith usando o sensor de baixo custo foi $\pm 0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ com 95% de probabilidade.

Palavras-chave: evapotranspiração, incerteza da medição, oscilador astável, fotodiodo.

LOW-COST SENSORS FOR CONTINUOUS MONITORING OF SOIL MOISTURE AND SOLAR RADIATION

ABSTRACT: The implementation of low-cost sensors allows the realization of monitoring studies through spatial temporal distribution of real time data, enhancing a greater number of researches to be carried out. The construction and use of these sensors also have a didactic function, since it allows the student to get more directly involved in understanding the physical characteristics that define the process being studied. In the present dissertation, two types of low-cost sensors are characterized, a solar radiation sensor and a soil moisture sensor, built and improved with the purpose of being used in multiple research and academic practices. The working principle of the sensor for humidity estimation is capacitive-resistive. This sensor reacts to the variation in the electromagnetic properties of the soil, contained between its metallic rods. These properties vary proportionally with changes in the water content present in the soil pores. It was developed a mathematical model that estimates the output frequency of the sensor oscillator circuit based on the probe-soil interaction in order to estimate the percentage of moisture present in the soil. By applying the model in a computer algorithm, it was possible to estimate the volumetric soil moisture with an uncertainty of less than $\pm 3\%$ at a 95% confidence interval. The algorithm can be used for different soil textures by entering the porosity and the electrical conductivity of the saturation extract of the soil as parameters. With regard to the pyranometer, the measurement of solar radiation is of great importance for estimating the evapotranspiration demand of the atmosphere. Despite its importance, solar radiation has not been measured at many weather stations due to the high cost of this sensor. The pyranometer is based on a silicon photodiode, which induces an electric current proportional to the radiation reaching it. Sixteen sensors were built to evaluate their accuracy in estimating solar radiation and the effect of uncertainties in estimating reference evapotranspiration. The sensors were installed in the open field and in the greenhouse, performing continuous measurements for one year in conjunction with a secondary standard thermopile sensor. During this time the sensors showed no physical deterioration nor changes in standard deviation ($0,04 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$). The uncertainty in the estimation of ETo by the Penman-Monteith algorithm using the low-cost sensor was $\pm 0,22 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ for 95%.

Keywords: evapotranspiration, measurement uncertainty, astable oscillator, photodiode.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERENCIAS	2
HIPÓTESE.....	4
OBJETIVO GERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
SENSOR DE BAIXO CUSTO PARA UMIDADE DO SOLO:.....	5
Resposta de um oscilador astável à umidade e condutividade elétrica do solo.....	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO.....	7
3. MEDIDAS DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA	9
4. EFEITO DA TEXTURA DO SOLO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE	9
5. EFEITO DA TEMPERATURA E CONDUTIVIDADE ELETRICA DO SOLO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE	10
6. MODELO DE RESPOSTA DO CIRCUITO OSCILADOR	11
6.1 Propriedades eletromagnéticas do solo.....	12
6.2 Frequência de saída do circuito oscilador	13
6.3 Calibração do modelo	18
6.4 Validação do modelo.....	20
7. CONCLUSÃO	23
8. AGRADECIMENTOS	23
8. REFERENCIAS	23
3. ANEXOS.....	25
PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO NA ESTIMATIVA DA DEMANDA EVAPOTRANSPIRATIVA DA ATMOSFERA.....	28
1. INTRODUÇÃO	28
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
2.1. Seleção do fotodiodo	30
2.2. Construção do sensor.....	30
2.3. Calibração do sensor	31
2.4. Incerteza na medição.....	32
2.5. Estimativa da demanda evaporativa da atmosfera usando os sensores de baixo custo.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
3.3. Estimativa da evapotranspiração de referencia	37
3.4. Teste do piranômetro associado a leituras com HX711	38
3.5. Custos de construção	39

4.	RESUMO DOS RESULTADOS.....	40
5.	AGRADECIMIENTOS	41
6.	REFERENCIAS.....	41
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43

INTRODUÇÃO GERAL

Publicações recentes mostram o aumento no uso de plataformas de hardware e software livre, que facilitam o desenvolvimento de soluções em instrumentação em geral (RAVAZZANI, 2017). Esta modalidade de trabalho facilita a apropriação da tecnologia em torno de diversas áreas do conhecimento, incluindo a engenharia agrícola. Através do desenvolvimento de instrumentos de medição artesanais a custos reduzidos em comparação com os instrumentos presentes no mercado.

Embora não haja uma definição universalmente aceita do que é um sensor de “baixo custo”, este refere-se a qualquer tipo de sensor que custe menos do que o custo da instrumentação convencional. No presente documento, este termo refere-se ao baixo custo de aquisição dos componentes constituintes dos sensores e à facilidade para serem construídos.

A construção e uso destes instrumentos chamados comumente como “sensores de baixo custo” tem sido acolhido tanto no ensino como na pesquisa, por conta do caráter didático dos mesmos. A construção de um sensor desenvolve habilidades e competências que potencializam a criatividade e facilitam o entendimento dos princípios físicos e das interações destes com os fenômenos estudados. Os sensores de baixo custo são construídos comumente empregando elementos de fácil acesso, de custo reduzido, com uso de técnicas simples.

O uso de sensores de baixo custo pode revolucionar potencialmente a área da instrumentação agrícola e o monitoramento ambiental, fornecendo dados espaço-temporais de alta densidade (CASTELL et al., 2017), ajudando em processos como a medição da taxa de radiação global incidente sobre a superfície da terra (NWANKWO et al, 2012), ou no monitoramento da umidade do solo (DENG et al., 2020), entre outros.

Na presente dissertação são apresentados dois instrumentos de medição de baixo custo, o sensor de umidade do solo e o sensor de irradiância global ou piranômetro (Figura 1). A concepção destes sensores foi iniciada desde o ano 2018 na UFRB-PPGEA como uma alternativa própria para realizar estimativa destas variáveis. O objetivo da construção destas ferramentas é viabilizar um maior número de pesquisas com alta densidade espaço-temporal de medição na área de Engenharia de Água e Solo.

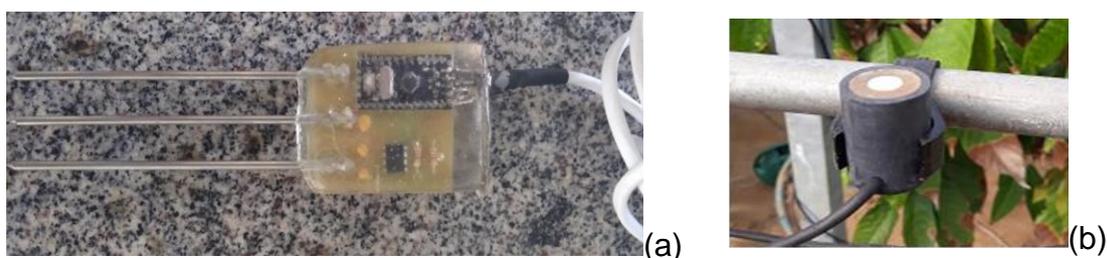


Figura 1. Sensor de umidade do solo (a) e piranômetro de baixo custo (b)

O sensor de umidade do solo (Figura 1a) fisicamente está constituído por três hastes de metal que sobressaem do corpo do sensor, um circuito analógico e um microcontrolador, embebidos em resina epóxi. Este recobrimento protege o sensor das características corrosivas do solo. Com objeto de difundir o uso do sensor entre a comunidade foi disponibilizado com acesso gratuito pelo site <https://www.ufrb.edu.br/pgea/produtos-e-servicos>, toda a documentação necessária para construção, programação, calibração e leitura deste sensor. Buscando com isso que a comunidade se aproprie do sensor realizando aportes que possam melhorar sua usabilidade.

O piranômetro apresentado na Figura 1b internamente possui um fotodiodo, que é o elemento que reage proporcionalmente a incidência da radiação solar que o atinge, permitindo assim estimar a radiação global que chega sobre a terra por metro quadrado. Por conta do elevado custo de aquisição dos piranômetros comerciais é comum que este tipo de sensor se encontre em falta nas estações meteorológicas usadas em projetos de irrigação e monitoramento ambiental.

Até o presente os dois sensores estão sendo usados em diferentes pesquisas orientadas dentro e fora do PPGEA-NEAS com resultados promissores. Portanto, o objetivo principal do presente documento é caracterizar os princípios de funcionamento dos sensores de umidade do solo e piranômetro de baixo custo, analisando sua empregabilidade como parte de estações de monitoramento contínuo.

REFERENCIAS

CASTELL, N.; DAUGE, F. R.; SCHNEIDER, P.; VOGT, M.; LERNER, U.; FISHBAIN, B.; BARTONOVA, A. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. **Environment international**, v. 99, p. 293-302, 2017.

DENG, X.; GU, H.; YANG, L.; LYU, H.; CHENG, Y.; PAN, L.; FU, Z.; CUI, L.; ZHANG, L. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, Elsevier, v. 150, p. 107052, 2020.

NWANKWO, S.; NNABUCHI, M.; EKPE, J. Construction and characterisation of a pyranometer using locally available materials for global solar radiation measurements. **Asian Transactions on Basic and Applied Sciences**, Citeseer, v. 2, n. 4, p. 26, 2012.

RAI, A. C.; KUMAR, P.; PILLA, F.; SKOULLOUDIS, A. N.; Di SABATINO, S.; RATTI, C.; RICKERBY, D. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. **Science of The Total Environment**, v. 607, p. 691-705, 2017.

RAVAZZANI, G. Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content. **Computers and electronics in agriculture**, Elsevier, v. 133, p. 9–14, 2017.

HIPÓTESE

- (i) Usando um circuito oscilador simples é possível estimar a umidade do solo a partir da modelagem de sua frequência de saída em função das características eletromagnéticas da relação sonda-solo.
- (ii) O uso de piranômetros construídos com elementos de fácil aquisição no mercado, pode estimar com acurácia a radiação global diminuindo as incertezas da estimativa da evapotranspiração de referência comparado a equações empíricas de estimativa de radiação.

OBJETIVO GERAL

Caracterizar os princípios de funcionamento dos sensores de umidade do solo e piranômetro de baixo custo, analisando a empregabilidade destes dispositivos como parte de estações de monitoramento contínuo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Caracterizar por meio de modelo matemático o funcionamento do sensor para estimativa da umidade do solo
- (ii) Avaliar o sensor para estimativa da umidade do solo sob diferentes teores de salinidade, temperatura.
- (iii) Construir e calibrar um piranômetro de baixo custo, avaliando a acurácia e empregabilidade na estimativa da demanda evaporativa da atmosfera.

**SENSOR DE BAIXO CUSTO PARA UMIDADE DO SOLO:
Resposta de um oscilador astável à umidade e condutividade elétrica do solo**

RESUMO: A umidade do solo é uma variável de interesse para diferentes campos de estudo que pode ser estimada por meio de sensores que tem como princípio físico a variação das propriedades eletromagnéticas geradas na associação sonda-solo, que ocorrem em função da quantidade de água no meio. Na última década se desenvolveram diversas propostas de sensores como alternativa para realização destas medições, com o intuito de diminuir os custos dos sistemas de medição. O circuito eletrônico da sonda estudada apresenta uma etapa formada por um circuito oscilador compostos pelo CI555, elementos passivos fixos (resistores e capacitores), e três hastes de aço inoxidável que atuam como eletrodos quando entram em contato com o solo. De acordo com as variações de umidade do solo ao redor das hastes, são geradas mudanças tanto na constante dielétrica quanto na resistividade elétrica do solo que influenciam a frequência de saída do circuito oscilador. Esta frequência é estimada por um microcontrolador presente no sensor, o qual gera uma saída serial da frequência relativa. Foi desenvolvido um modelo baseado em equações que estima a frequência de saída do oscilador em função da umidade do solo e da condutividade elétrica do extrato de saturação. O modelo foi sensível às variações de umidade e condutividade elétrica apresentando na etapa de validação um desvio inferior a $\pm 3,1\%$ de umidade volumétrica em 95% das observações.

Palavras chaves: umidade volumétrica, circuito oscilador, constante dielétrica, condutividade elétrica do solo.

**LOW-COST SENSOR FOR SOIL MOISTURE:
Response of an astable oscillator to soil moisture and electrical conductivity**

ABSTRACT: Soil moisture is a variable of interest to different fields of study. It can be estimated by means of sensors that have as their physical principle the variation of electromagnetic properties generated in the probe-soil association, as a function of the amount of water in the medium. In the last decade, several proposals for sensors have been developed as an alternative for carrying out these measurements, with the aim of reducing the costs of measurement systems. The electronic circuit of the probe studied presents an analog stage formed by an integrated circuit CI555, fixed passive elements (resistors and capacitors) and three stainless steel rods that act as electrodes when in contact with the soil. According to the variations in soil moisture around the rods, changes are generated in both the dielectric constant and the electrical resistivity of the soil, which influences the output frequency of the sensor's oscillator circuit. This frequency is estimated by a microcontroller in the sensor, which generates a serial output of the relative frequency. An equation-based model was developed to estimate the oscillator output frequency as a function of soil moisture and electrical conductivity of saturation extract. The model was sensitive to moisture

and electrical conductivity variations, presenting an uncertainty of less than $\pm 3.1\%$ of volumetric moisture in 95% of the observations at the validation stage.

Keywords: volumetric moisture, oscillator circuit, dielectric constant, soil electrical conductivity.

1. INTRODUÇÃO

Para as ciências agrárias e ambientais estimar umidade do solo é útil em múltiplas situações como no manejo de irrigação, no estudo da dinâmica e armazenamento de água no solo, na avaliação de processos hidrológicos em uma região, entre outros (GARG et al., 2016). Esta informação pode ser obtida por meio de métodos diretos e indiretos. O método que mensura diretamente o volume de água presente em uma amostra de solo é o gravimétrico, em que o teor de água é calculado considerando a massa de água (diferença de massa entre solo úmido e seco a 105 °C) em uma amostra de solo com volume conhecido. Neste procedimento, assume-se a densidade da água igual a 1 g cm⁻³.

Os métodos indiretos se baseiam no uso de dispositivos que empregam uma ou várias propriedades do solo relacionadas a seu conteúdo hídrico. Um exemplo destes são as modificações da constante dielétrica e da condutividade elétrica em decorrência da variação do teor de água no solo (COELHO et al., 2005; CRUZ, 2010). Estas mudanças são usadas como princípios de funcionamento de alguns sensores de umidade do solo, os quais baseiam seu funcionamento nas características eletromagnéticas geradas entre as placas metálicas do sensor e o meio em questão (solo, água e ar).

Os sensores se caracterizam por serem métodos não destrutivos, que permitem realizar medições *in situ*, facilitando a supervisão da distribuição espacial e temporal do teor de água no perfil do solo a partir das medições contínuas realizadas em pontos de observação (SKIERUCHA; WILCZEK, 2010). Para o monitoramento contínuo da umidade do solo é sugerido o uso de mais de um sensor instalado em campo de acordo com o padrão de distribuição espaço-temporal de extração de água do solo na região explorada pelas raízes das plantas. O local onde se realiza uma observação de umidade é submetido a variações na distribuição de água tanto no espaço como no tempo, perdendo representatividade do fenômeno à medida que o sistema radicular das plantas se desenvolve. Assim, muitos pontos de observações localizados em uma área representam melhor a variação espaço-temporal que a simples observação de um ponto isolado.

Na prática, maximizar o número de observações está limitado pelo alto valor de aquisição dos sensores de umidade do solo nos mercados nacional e mundial (NAVARRO-HELLÍN et al., 2016). Como alternativa, são realizadas pesquisas focadas no desenvolvimento de metodologias de construção de protótipos que permitam estimar o percentual de água contida nos poros do solo. Essas iniciativas buscam gerar sensores economicamente acessíveis para a comunidade, sem descuidar a confiabilidade dos dispositivos. Uma das técnicas mais usadas são os sensores capacitivos, que indicam a porcentagem de umidade a partir das características eletromagnéticas do solo contido entre duas ou mais placas metálicas nas quais é aplicado um diferencial de potencial

Na união entre o pino de disparo (2) e o pino limiar de voltagem (6) do CI555 (Figura 1) estão ligados os capacitores C2 e C3 com os eletrodos da sonda, em série e em paralelo, respectivamente. Estes visam estabelecer uma faixa de frequência de saída para as condições de umidade no solo, de saturado até seco.

No segundo bloco, no microcontrolador é estimada a frequência da onda quadrada na saída do oscilador, usando um pino digital para contar os pulsos que chegam em um período de 500 ms. Com o valor de frequência estimada (f - Hz) é calculada uma relação proporcional entre dois limiares de frequência preestabelecidos na memória não volátil do microcontrolador (EEPROM), os quais, de acordo com a equação 1, correspondem aos valores de frequência medidos com o sensor com as hastes no ar (f_A) e com as hastes submersas em uma solução de cloreto de sódio com 2 dS m^{-1} de CE (f_S). Esta solução é usada em razão de que a salinidade natural dos solos sazonalmente secos, como os da região semiárida do nordeste do Brasil, varia comumente entre 2 e 4 dS m^{-1} (MUNNS et al., 2005).

$$fr = \frac{f - f_A}{f_S - f_A} \quad (1)$$

No microcontrolador é realizada uma rotina de cálculo que inicia consultando os valores previamente armazenados na memória EEPROM correspondentes a f_A e f_S . Para inserir os limiares basta digitar na porta seral o comando #AR e realizar a leitura no ar, ou #H2O e realizar a leitura na solução (Figura 2).

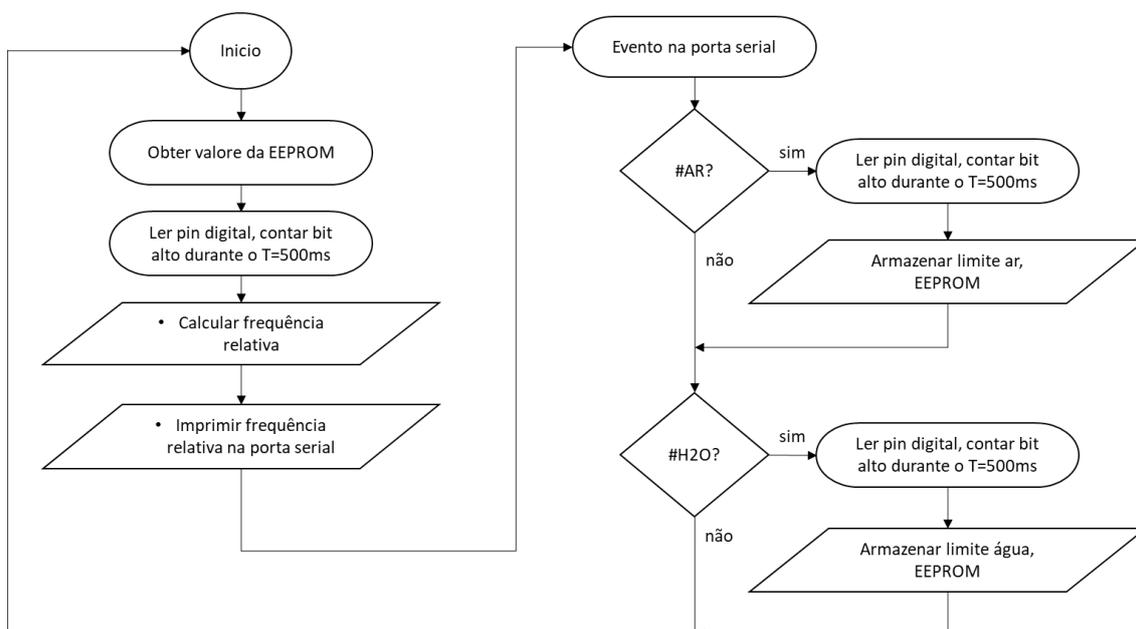


Figura 2. Diagrama de fluxo do programa no microcontrolador.

O dado estimado de frequência relativa é enviado na saída TTL do sensor em forma serial. O uso deste protocolo permite que a sonda seja instrumentalizada por múltiplos sistemas de medição e armazenamento de dados, incluindo a ligação direta com a porta serial de telefones celulares. Usar este tipo de comunicação digital implica menor perda de informação no percurso do comprimento do cabo, o qual, de acordo com o protocolo, pode ter um alcance

de até 15 m, visto que há limitações impostas pelas condições de interferência eletromagnética do ambiente e taxa de transmissão (HAN; KONG., 2010).

3. MEDIDAS DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA

Os sensores foram avaliados em monólitos com substratos que foram secos ao ar e em seguida peneirados em malha com abertura de 2 mm de diâmetro. Depois, com o material seco foram preenchidos tubos de 0,15 m de altura e 0,075 m de diâmetro, os quais no fundo contavam com um tecido de malha fina para permitir a drenagem, porém evitar a perda de solo.

A saturação dos monólitos foi realizada por aproximadamente 24 h; após saturados, em cada monólito foram inseridas as sondas e, na maioria dos casos, deixados para a secagem natural em temperatura ambiente. A massa média das sondas é 162 g incluindo o cabo de 2 m. Com ajuda de uma balança com incerteza de $\pm 0,01$ g, foram pesadas as amostras até atingir massa e frequência estável no tempo, finalizando o procedimento com o solo seco ao ar a fim de conhecer a sua umidade residual.

Ao final da coleta de dados, todos os monólitos foram levados à estufa durante 24 horas, em temperatura de 105°C, para a obtenção do peso de solo seco (*PSS*) e, então, determinar a umidade volumétrica registrada durante o processo de medição (Equação 2).

$$\theta_o = \left(\frac{PSU - PSS}{v} \right) \left(\frac{1}{da} \right) \quad (2)$$

Em que, θ_o é a umidade volumétrica observada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); *PSU* é peso do solo úmido mensurada durante todo o processo (g); *v* é o volume de solo em cada amostra (cm^3); *da* é a densidade da água (g cm^{-3}).

4. EFEITO DA TEXTURA DO SOLO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE

Com o objetivo de avaliar a estimativa da umidade pelo sensor quanto à textura do solo foram testados dois monólitos com areia e vermiculita seguindo a metodologia apresentada no item 3. Foram realizadas medições de frequência relativa de cada sensor e paralelamente foi mensurada a umidade das amostras usando o método gravimétrico (Equação 2) até os substratos dos monólitos secarem em temperatura ambiente.

De acordo com a Figura 3, observa-se uma relação entre a umidade volumétrica e a frequência relativa para os dois substratos, que pode ser representada com um modelo polinomial de grau três ($R^2 = 0,98$). Observa-se também, sobreposição e continuidade nas medições realizadas com os sensores nos dois substratos, só se diferenciando na capacidade mínima e máxima de armazenamento de água. Portanto, pode-se inferir que é possível apresentar um modelo de resposta de frequência independente da classe de textura do solo.

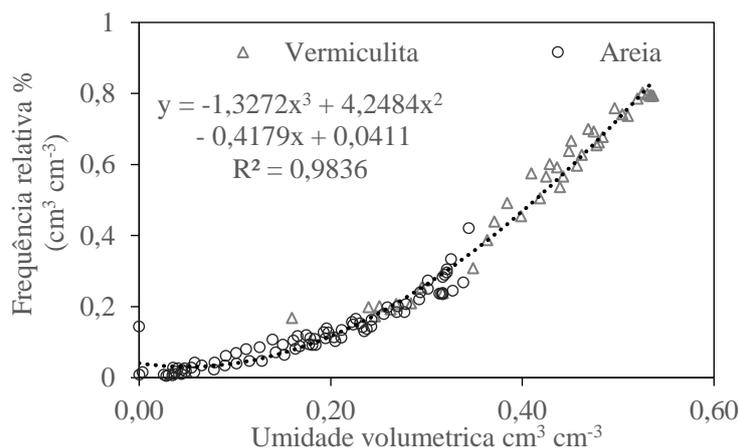


Figura 3. Resposta do sensor de umidade em substratos de areia e vermiculita.

5. EFEITO DA TEMPERATURA E CONDUTIVIDADE ELETRICA DO SOLO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE

A fim de identificar a sensibilidade do sensor às variações de temperatura e condutividade elétrica, foi conduzido um teste com três monólitos preenchidos com solo de textura fraco-arenosa seguindo os passos indicados no item 3. Os monólitos foram saturados mergulhando-os em soluções de diferentes condutividades elétricas (0,3; 2,0 e 3,0 dS m⁻¹) por 24h; após este tempo, os monólitos drenaram o excesso de água por mais um dia em temperatura ambiente e, posteriormente, foram levados à estufa a 50 °C por 12 h até atingir umidade média aproximada de 0,22 cm³ cm⁻³, próxima do limite de capacidade de campo (0,25 cm³ cm⁻³) identificado para este solo (FREITAS, 2019). Após a drenagem foram impermeabilizados com parafina para manter a umidade estável.

Os três monólitos foram submetidos a variações de temperatura de 5 a 50 °C. Durante o experimento foram coletadas observações de frequência relativa e temperatura em cada amostra em intervalos de 2 minutos. A umidade foi mensurada usando o método gravimétrico (Equação 2), e a temperatura foi estimada usando termopar tipo K dentro de cada monólito acompanhando os sensores de umidade. Usando as Equações 3 e 4, a condutividade elétrica do estrato de saturação de cada amostra foram corrigidos em relação a temperatura (KIZITO et al., 2008).

$$CE_T = CE_{ref} [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (3)$$

Em que, CE_T é a condutividade elétrica corrigida pela temperatura; T_{ref} é a temperatura de referência (26 °C); T é a temperatura atual; α é um coeficiente ajustado $\alpha = 0,006$ (KIZITO et al, 2008); CE_{ref} é a condutividade elétrica de referência medida ou corrigida para 26 °C empregando a relação especificada pelo U.S. Salinity La. Staff, (1954) (Equação 4).

$$CE_{26^\circ C} = fc * CE_p \quad (4)$$

Em que, fc fator de correção 0,979 para 26 °C; CE_p condutividade elétrica particular.

Finalizada a coleta de dados de frequência e umidade, de cada um dos monólitos foram extraídas amostras de 100 g de solo seco para realizar análise

de condutividade elétrica da pasta de saturação (CEe). As amostras foram dispostas em bécher para serem saturadas com água destilada até fazer uma pasta espelhada, deixando-as descansar durante uma noite antes de serem filtradas com sucção, usando um funil de Buchner contendo papel de filtro e adaptado a um kitasato de 500 ml. A condutividade elétrica do extrato obtido foi estimada com condutímetro de bancada (TEIXEIRA, 2017). Os valores de CEe obtidos para cada amostra foram $A1 = 1,34 \text{ dS m}^{-1}$; $A2 = 3,70 \text{ dS m}^{-1}$; $A3 = 4,79 \text{ dS m}^{-1}$.

Na Figura 4, observa-se o efeito da condutividade elétrica na saída do sensor. Embora o conteúdo de sais em cada monólito não varie, as variações de temperatura causaram efeito sobre a resposta em frequência relativa do sensor. As mudanças de temperatura facilitam (temperaturas altas) ou dificultam (temperaturas baixas) a condução de energia do meio para uma dada concentração de sais e umidade. Portanto, o efeito da CE e da temperatura podem ser um fator limitante para mensurar a umidade do solo usando sondas como observado por Dean (1994) com sensores capacitivos.

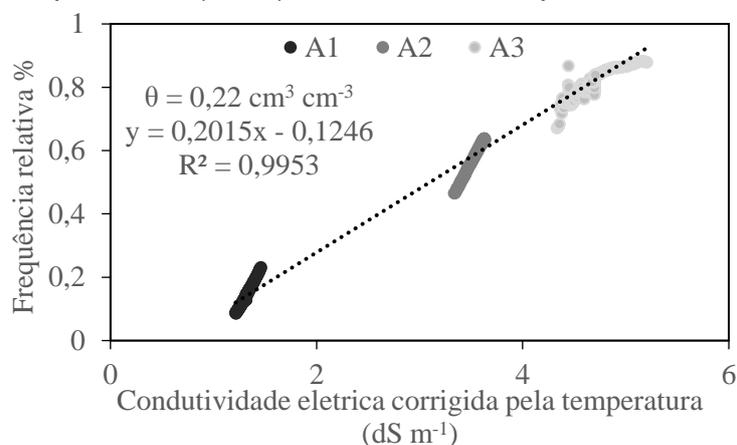


Figura 4. Sinal de saída do sensor em frequência relativa para umidade constante $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, de acordo com a variação da temperatura em cada amostra $A1 = 1,34 \text{ dS m}^{-1}$; $A2 = 3,70 \text{ dS m}^{-1}$; $A3 = 4,79 \text{ dS m}^{-1}$.

6. MODELO DE RESPOSTA DO CIRCUITO OSCILADOR

O sinal de saída do circuito oscilador se mostrou independente da textura do solo e dependente da capacidade condutiva da solução, por conseguinte, foram estudadas as características eletromagnéticas do solo entendendo como estas se refletem na frequência de saída do circuito oscilador. A partir deste entendimento foi desenvolvido um modelo que permite estimar a frequência relativa do sensor em função das características capacitivo-resistiva da interação sonda-solo e os componentes fixos do circuito (Figura 5).

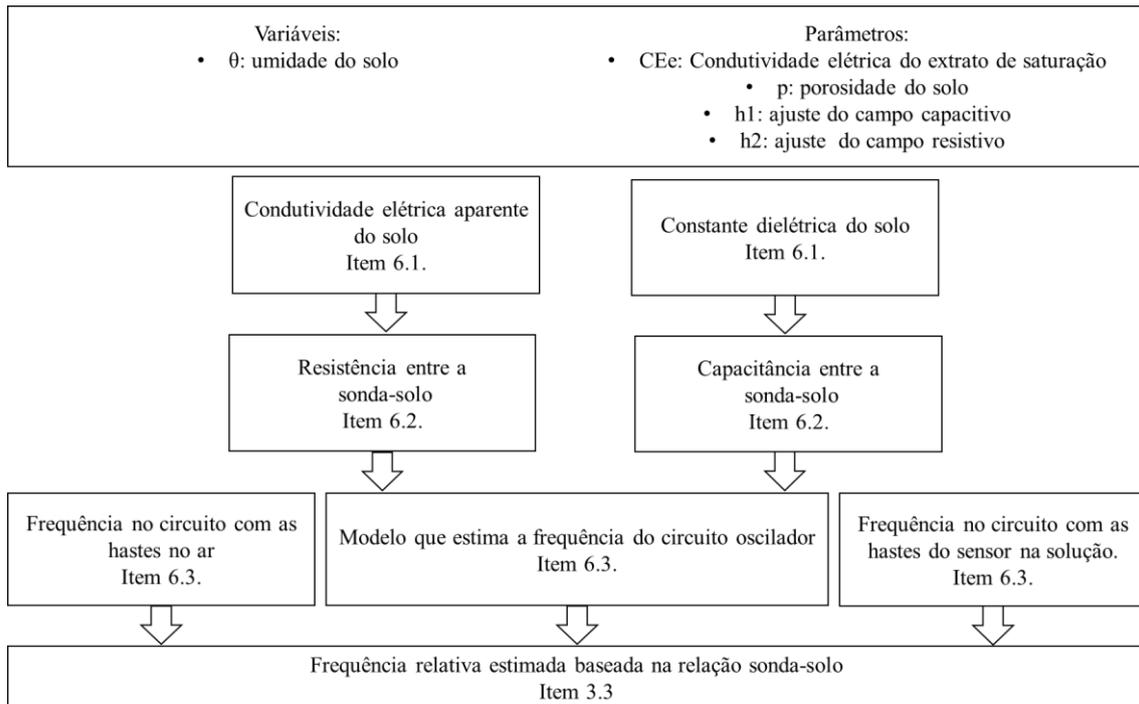


Figura 5. Modelo da saída em frequência relativa.

6.1 Propriedades eletromagnéticas do solo

Quando as hastes do sensor entram em contato com o solo, entre estas é aplicada uma diferença de potencial elétrico que provoca o acúmulo de cargas elétricas polarizadas a partir dos íons presentes na solução do solo, conformando um capacitor. Simultaneamente, entre estas hastes também existe passagem de corrente através do solo, já que estas não são isoladas. A passagem de corrente elétrica através do solo é limitada pela quantidade de ar e a tortuosidade da condução elétrica, o que caracteriza o solo como um resistor elétrico.

A capacitância entre as hastes (C_s) pode ser explicada em função da relação entre a constante dielétrica do solo, o fator geométrico do campo que depende da área da seção condutora, do material e da forma das hastes da sonda (Equação 5).

$$C_s = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{A \cdot h1}{d} \quad (5)$$

Em que, C_s é a capacitância do solo ($F \cdot m^{-1}$); ε_0 é a constante dielétrica no vácuo $8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$; ε é a constante dielétrica para a solução do solo; A é a área da seção condutora; d é a distância entre os condutores e $h1$ é a constante de geometria do campo elétrico em função da capacitância.

O solo existente entre as hastes da sonda se comporta como um material dielétrico variável à razão da relação dinâmica entre as frações do solo. A fração gasosa ou atmosfera dos poros do solo, a fração sólida e a fração líquida composta por íons minerais dissolvidos na água. A interação entre estas frações conforma um único material com características dielétricas que variam no tempo proporcionalmente com as mudanças na quantidade de água nos poros do solo. Esta relação foi descrita por Roth et al, (1990) pela Equação 6.

$$\varepsilon = (\theta \varepsilon_w^\alpha + (1 - P) \varepsilon_s^\alpha + (P - \theta) \varepsilon_a^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

Em que, P é a porosidade do solo, $P = (1-ds/dp)$, ds é a densidade do solo (g cm^{-3}), dp é a densidade das partículas do solo ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$); θ é umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); α é um fator ajustável que define a geometria do meio em relação ao campo elétrico conformado ao redor das hastes. As constantes dielétricas para as fases do solo de acordo com Coelho et al. (2006) são: $\epsilon_w = 75$ para água pura; $\epsilon_s = 5$ para os minerais do solo seco; e para o ar $\epsilon_a = 1$.

A depender do conteúdo de água e sais, a solução do solo possui características isolantes ou condutoras particulares em função de sua concentração de íons, textura, estrutura, entre outras características. Por conseguinte, pode-se estimar a resistência R_s pela relação inversa da resistividade e a condutividade elétrica do solo (Equações 7 e 8).

$$R_s = \frac{\rho \cdot d \cdot h^2}{A}; \quad (7)$$

$$\rho = \frac{1}{CE\alpha} \quad (8)$$

Em que, R_s é a resistência do solo (Ω); ρ é a resistividade do material ($\Omega \text{ m}^{-1}$); $CE\alpha$ é a condutividade elétrica aparente do solo (S m^{-1}); d distancia entre as hastes (m); A é a área transversal da seção condutora (m^2) e h^2 é a constante de geometria do campo elétrico em função da resistência.

Para estimar a condutividade elétrica aparente do solo foi usada a metodologia proposta por Rhoades et al., (1989) (Equação 9).

$$CE\alpha = \left(\frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2}{\theta_s} CE_s \right) + (\theta_w - \theta_{ws}) CE_w; \quad (9)$$

Em que, $CE\alpha$ é a condutividade elétrica aparente em função da umidade do solo; CE_s , condutividade elétrica nos sólidos; $\theta_s = \frac{\rho b}{2,65}$ é volume de sólidos; θ_{ws} é volume de umidade residual; θ_w é o volume de água. O valor de CE_w pode ser estimado em função da condutividade elétrica da pasta de saturação pela Equação 10.

$$CE_w = \left(\frac{CE_e SP}{\theta_w} \right) \quad (10)$$

Em que, CE_w é a condutividade elétrica da solução do solo; CE_e é a condutividade elétrica da pasta de saturação realizada em laboratório com condutímetro de bancada; SP é o percentual de saturação da pasta.

6.2 Frequência de saída do circuito oscilador

Um oscilador astável típico usando o CI555 funciona pela carga de um capacitor por meio de dois resistores (R_1 e R_2) e descarga por um deles (R_2), oscilando entre 1/3 e 2/3 da tensão de alimentação. Durante o tempo de carga a saída do circuito é fixada no estado alto (TH - s) e durante o tempo de descarga a saída é fixada no estado baixo (TL - s). Dessa forma a frequência de saída (f-Hz) pode ser estimada pela Equação 11.

$$f = \frac{1}{TH + TL} \quad (11)$$

Na Figura 6 é apresentado o circuito oscilador da sonda de umidade no qual é representada a resistência elétrica entre os eletrodos da sonda por R_s (Ω) e a capacitância entre esses mesmos eletrodos é representada por C_s (F). As

setas representam o sentido de fluxo da corrente elétrica para o tempo de carga (vermelho) e descarga (verde) do circuito.

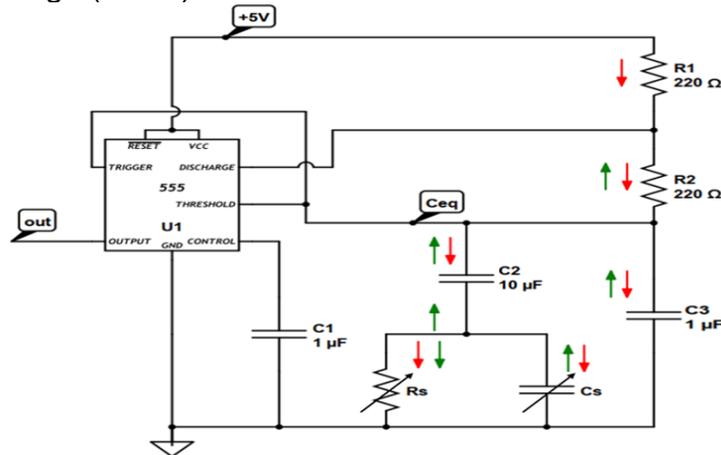


Figura 6. Circuito oscilador da sonda de umidade do solo.

No circuito oscilador durante o ciclo de carga a corrente circula a através dos resistores R1 e R2 carregando os capacitores C2, C3 e Cs. Entretanto a corrente que carrega C2 é limitada não só pelos resistores R1 e R2, mas também pelo resistor Rs. Sendo assim, utilizou-se para a estimativa do tempo de carga (Equação 12) as Equações 13 a 15.

$$TH = TC = K_1 \cdot (TC_{Ceq} + TC_2) \quad (12)$$

$$TC_{Ceq} = Ceq \cdot (R1 + R2) \quad (13)$$

$$TC_{C2} = K_2 e^{\frac{K_3}{C2 \cdot (R1 + R2 + Rs)}} \quad (14)$$

$$Ceq = C3 + \frac{C2 \cdot Cs}{C2 + Cs} \quad (15)$$

Em que, TC é o tempo de carga do sistema (s); TC_{Ceq} é o tempo de carga do capacitor equivalente (s); Ceq é o capacitor equivalente segundo a configuração em que estão ligados os capacitores (F); TC_{C2} é diferença para o tempo de carga do capacitor C2 (s); K1, K2, K3 são constantes.

Para o ciclo de descarga, os capacitores são descarregados por R2. O capacitor C2, entretanto, leva um maior tempo para descarregar uma vez que sua corrente de descarga também é limitada por Rs. Para a estimativa do tempo de descarga (Equação 16) utilizamos as Equações 17 a 19.

$$TL = TD = K_1 \cdot (TD_{Ceq} + TD_{C2} + TD_{Cs}) \quad (16)$$

$$TD_{Ceq} = Ceq \cdot R2 \quad (17)$$

$$TD_{C2} = K_4 e^{\frac{K_5}{C2 \cdot (R2 + Rs)}} \quad (18)$$

$$TD_{Cs} = Cs \cdot \frac{R2 \cdot Rs}{R2 + Rs} \quad (19)$$

Em que, TD é o tempo de descarga do conjunto sistema (s); TD_{Ceq} é o tempo de descarga do capacitor equivalente (s); TD_{C2} é a diferença de tempo para descarga do capacitor C2 (s); TD_{Cs} é a diferença de tempo para descarga do capacitor Cs (s); K1, K4, K5 são constantes.

A fim de estimar os coeficientes empíricos das constantes K1 (Equações 12 e 16); K2 e K3 (Equação 14); K4 e K5 (Equação 18) foram realizadas

simulações em laboratório com diferentes combinações de capacitores (Cs) e resistores (Rs). Essas combinações permitiram induzir no circuito oscilador variações de frequência no intervalo de 1196Hz até 2500Hz, correspondentes ao valor aproximado de frequência de saída da sonda na solução e no ar. Quando o resistor tende a infinito os capacitores Cs, que satisfazem a faixa de frequência, variaram entre 1 μ F e 10 η F. Os resistores Rs, que satisfazem a faixa de frequência, quando o capacitor Cs é zero variam entre 200 Ω e 700 Ω . Resistores maiores não representam efeito significativo sobre a frequência do circuito (Tabela 1).

Para estimar o valor de K1 (Equações 12 e 16) utilizou-se um valor de Rs tendendo ao infinito e variou-se o valor de Cs entre 1 μ F e 10 η F (Tabela 1), dessa forma observou-se que o tempo de carga e descarga do circuito tende a ser igual ao tempo de carga do capacitor equivalente. Os valores estimados de tempo de carga de Ceq apresentam uma relação linear com o tempo de carga observado ($R^2 = 0,99$), com o coeficiente angular ajustado próximo a 2/3, como apresentado nas especificações do CI555. Dessa forma admitiu-se o valor de 0,67 como valor de K1 (Figura 7).

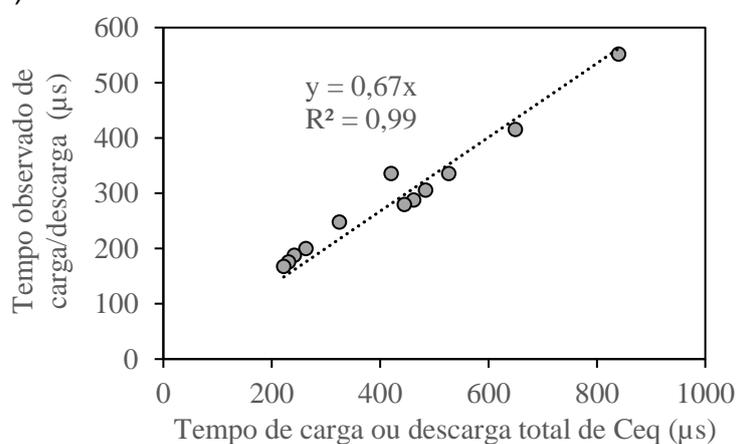


Figura 7. Relação entre a estimativa de tempo alto ou baixo da onda quadrada na saída do oscilador variando o Cs.

Tabela 1. Valores de capacitores e resistores e seu efeito correspondente sobre o circuito oscilador. Cs, capacitor que simula capacitância do solo; Rs, resistor que simula resistência do solo; Ceq Capacitor equivalente; TH est, tempo alto estimado; TL est, tempo baixo estimado; f est, frequência estimada; f med frequência medida.

Cs (F)	Rs (ohm)	f (kHz)	Ceq (F)	TH est (s)	TL est (s)	f est (Hz)	f med (Hz)	desvio (%)
0,0	123	1,12	1,00E-06	5,46E-04	3,62E-04	1102	1120	-1,58
0,0	217	1,5	1,00E-06	3,99E-04	2,33E-04	1584	1500	5,58
0,0	468	1,98	1,00E-06	3,12E-04	1,85E-04	2011	1980	1,56
0,0	562	2,05	1,00E-06	3,03E-04	1,82E-04	2061	2050	0,56
0,0	762	2,12	1,00E-06	2,94E-04	1,78E-04	2117	2120	-0,15
0,0	2930	2,21	1,00E-06	2,84E-04	1,74E-04	2186	2210	-1,08

1,00E-06	1E+08	1,13	1,91E-06	5,38E-04	3,29E-04	1153	1130	2,02
5,00E-07	1E+08	1,51	1,48E-06	4,17E-04	2,55E-04	1490	1510	-1,33
2,00E-07	1E+08	1,87	1,20E-06	3,38E-04	2,06E-04	1838	1870	-1,73
1,00E-07	1E+08	2,02	1,10E-06	3,10E-04	1,90E-04	1999	2020	-1,02
5,00E-08	1E+08	2,16	1,05E-06	2,97E-04	1,81E-04	2093	2160	-3,11
1,00E-08	1E+08	2,23	1,01E-06	2,85E-04	1,74E-04	2175	2230	-2,47
1,00E-08	200	1,37	1,01E-06	4,18E-04	2,46E-04	1508	1370	10,05
1,00E-07	200	1,29	1,10E-06	4,43E-04	2,61E-04	1421	1290	10,17
5,00E-07	200	1,03	1,48E-06	5,49E-04	3,26E-04	1143	1030	11,00
1,00E-06	200	0,871	1,91E-06	6,71E-04	4,00E-04	934	871	7,21
1,00E-08	507	2	1,01E-06	3,11E-04	1,85E-04	2016	2000	0,81
1,00E-07	507	1,82	1,10E-06	3,36E-04	2,00E-04	1865	1820	2,45
5,00E-07	507	1,39	1,48E-06	4,42E-04	2,65E-04	1414	1390	1,71
1,00E-06	507	1,12	1,91E-06	5,64E-04	3,40E-04	1107	1120	-1,19
1,00E-08	720	2,08	1,01E-06	2,99E-04	1,80E-04	2089	2080	0,42
1,00E-07	720	1,91	1,10E-06	3,24E-04	1,95E-04	1926	1910	0,86
5,00E-07	720	1,44	1,48E-06	4,30E-04	2,60E-04	1449	1440	0,63
1,00E-06	720	1,15	1,91E-06	5,52E-04	3,35E-04	1128	1150	-1,90

Para estimar o valor de K2 e K3 (Equação 14), K4 e K5 (Equação 18) utilizou-se um valor de Cs igual a zero e variou-se os valores do resistor Rs entre 200Ω e 700Ω (Tabela 1), dessa forma assume-se que, o capacitor equivalente do circuito é igual ao capacitor C3 e a frequência de saída depende apenas do valor empregado em Rs.

Em função do tempo de carga medido (TH) e do tempo de carga para Ceq (Equação 15 com Ceq igual a C3) foi calculado a diferença do tempo de carga de C2 (TC_{C2}) pela Equação 20 e relacionado com uma base de tempo (τ) calculada pela Equação 21. De acordo com o ajuste de uma equação exponencial aos dados (R2 = 0,95) admitiu-se o valor de 2.10⁻⁸ como valor de K2 e 0,0617 como valor de K3 (Figura 8).

$$TC_{C2} = \frac{TH}{K_1} \cdot -TC_{Ceq} \quad (20)$$

$$\tau = C2 \cdot (R1 + R2 + Rs) \quad (21)$$

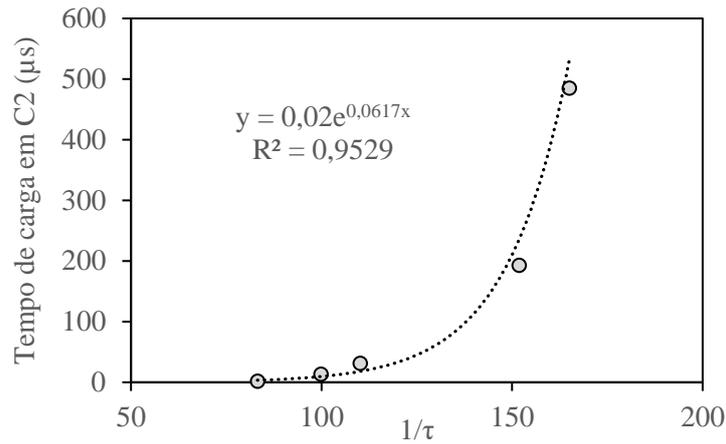


Figura 8. Relação entre a diferença do tempo de carga de C2 e a base de tempo (τ).

Similarmente, a diferença do tempo de carga a descarga de C2 foi estimada em função do tempo de descarga medido (TL) e do tempo de descarga para Ceq (Equação 17 com Ceq igual a C3) pela Equação 22 e relacionado com uma base de tempo (τ) calculada pela Equação 23. Com base no ajuste de uma equação exponencial aos dados ($R^2 = 0,95$) admitiu-se o valor de $1,1 \cdot 10^{-5}$ como valor de K4 e 0,0125 como valor de K5 (Figura 9).

$$TC_2 = \frac{TD}{K_1} \cdot -TC_{ceq} \quad (22)$$

$$\tau = C2 \cdot (R2 + Rs) \quad (23)$$

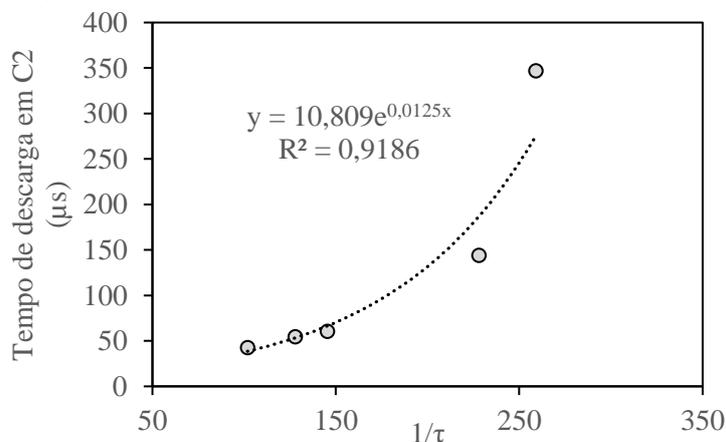


Figura 9. Relação entre o tempo de descarga de C2 e a base de tempo.

Os valores de tempo de carga e descarga foram calculados a partir dessas relações e calculada a frequência de saída (Equação 11) para as diversas associações de Cs e Rs (Tabela 1). O modelo teórico de frequência teve ajuste linear com os dados de frequência observados nos testes de bancada com desvio médio absoluto de 4% (Figura 10). Pode-se considerar que o modelo matemático do circuito é bastante acurado, dada as tolerâncias dos valores dos componentes utilizados na simulação (5%).

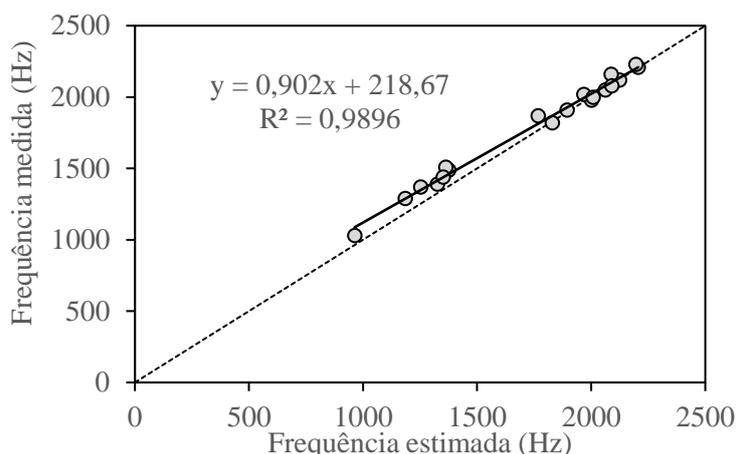


Figura 10. Relação entre a frequência de saída medida do circuito e a estimada em função de valores de R_s e C_s .

6.3 Calibração do modelo

Para realizar a calibração do modelo foram construídos 10 monólitos, com densidade aparente do solo de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$, que foram saturados por ascensão capilar usando cinco soluções de CE (0,3; 1,3; 1,6; 2,0; 2,5 dS m^{-1}). Os dados coletados foram usados em proporções iguais para realizar a calibração e a validação do modelo.

O solo empregado para este estudo foi coletado na UFRB ($12^{\circ}39'24,123''$ de latitude Sul, $39^{\circ}05'17,44''$ de longitude Oeste, altitude média de 220 m). Este solo foi classificado por Cazuzza (2019) como Latossolo Amarelo Distrocoeso com textura franco-arenosa. A caracterização do solo é apresentada nas Tabelas 2 a 4. O limite de capacidade de campo estimado para este solo é $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ o equivalente a 0,1 atm de potencial matricial (FREITAS, 2019).

Tabela 2. Frações granulométricas do solo. Fonte: (CAZUZA, 2019)

Profundidade (m)	Areia	Silte	Argila
0,00 -1,00	68	20	11

Tabela 3. Caracterização química do solo. Fonte: (CAZUZA, 2019)

Profundi (m)	pH	MO (g kg ⁻¹)	P (mg dm ⁻¹)	K	Ca	Mg	Al (cmol _c dm ⁻³)	Na	H+Al	S	CTC	V (%)
0,00-0,20	4,9	9	3	0,04	0,37	0,17	0,50	0,01	2,68	0,59	3,28	18
0,20-0,40	4,7	9	1	0,02	0,30	0,08	0,70	0,01	2,63	0,41	3,04	14
0,40-1,00	4,7	7	3	0,03	0,31	0,11	0,60	0,01	2,65	0,46	3,11	15

Nota: MO, matéria orgânica; P, fósforo; K, potássio; Ca, cálcio; Mg, magnésio; Al, alumínio; Na, sódio; H+Al, acidez total; S, soma de bases; CTC, capacidade de troca catiônica; V, saturação por bases.

Tabela 4. Parâmetros hidráulicos do solo. Fonte: (FREITAS, 2019)

θ_s	θ_r	α	η	λ	Ks	R ²	RMSE
(m ³ m ⁻³)		(m ⁻¹)			(m h ⁻¹)		
0,472	0,022	5,5	1,52	0,008	3.10 ⁻³	0,93	0,006

Nota: θ_s é o volume de sólidos; θ_r é a umidade residual; α, η, λ são parâmetros empíricos do modelo de Mualem-van Genuchten; Ks condutividade hidráulica do solo saturado.

Os valores de constante dielétrica (ϵ) foram estimados para cada valor de umidade segundo a metodologia de Topp et al (1980); de acordo com os resultados obtidos por Freitas (2019), para o tipo de sonda de TDR (Reflectometria no domínio do tempo) existe uma relação expressa por um modelo polinomial cúbico, entre a constante dielétrica e o conteúdo volumétrico de água no solo, que para o solo tratado neste estudo corresponde a (Equação 24)

$$\theta = 0,0000052\epsilon^3 + 0,0002\epsilon^2 + 0,0064\epsilon + 0,0405 \quad (24)$$

A partir dos dados de umidade coletados durante o período de secagem dos monólitos usados para calibração foi estimada a constante dielétrica (Equação 24), o que serviu para ajustar o parâmetro α do modelo de Roth et al., (1990) (Equação 6), o qual representa a relação geométrica entre as frações (minerais, água, ar) que compõem a solução do solo. O valor de α resultante foi de 0,58. A porosidade usada para este cálculo foi $p = 0,45\%$.

Em relação ao ajuste dos parâmetros da equação de CEa proposta por Rhoades et al. (1989) (Equação 9), o volume de sólidos estimado em média para todos os monólitos é $\theta_s = 0,547 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A umidade residual média das amostras foram $\theta_{ws} = 0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e a condutividade elétrica para a massa de sólidos CEs foi ajustada minimizando o valor mantendo os demais parâmetros constantes na equação, CEs = $0,083 \text{ dS m}^{-1}$.

Os parâmetros h1 (Equação 5) e h2 (Equação 7) correspondem à relação geométrica do campo capacitivo Cs e resistivo Rs respectivamente. Estes foram ajustados com solver minimizando a soma dos desvios quadrados entre os valores de frequência estimados e observados, obtendo-se valores de $h1 = 3,33$ e $h2 = 1144519$.

A relação entre frequência relativa medida no circuito oscilador e a frequência relativa estimada a partir da aplicação do modelo ajustado é observado na Figura 11, os valores do eixo x referem-se a cada uma das observações realizadas por sensor.

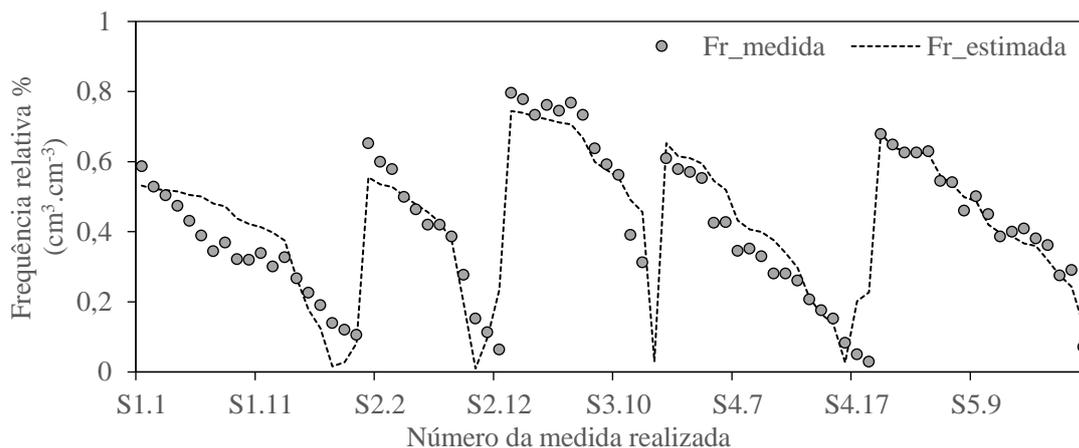


Figura 11. Relação entre frequência medida no oscilador e frequência estimada usando o modelo teórico para cada tipo de sensor.

O modelo teve ajuste linear ($R^2 = 0,88$) com os valores frequência relativa observados a partir dos sensores instalados nos monólitos de solo. O valor estimado acompanha as mudanças da frequência relativa com um desvio médio de 7% (Figura 12).

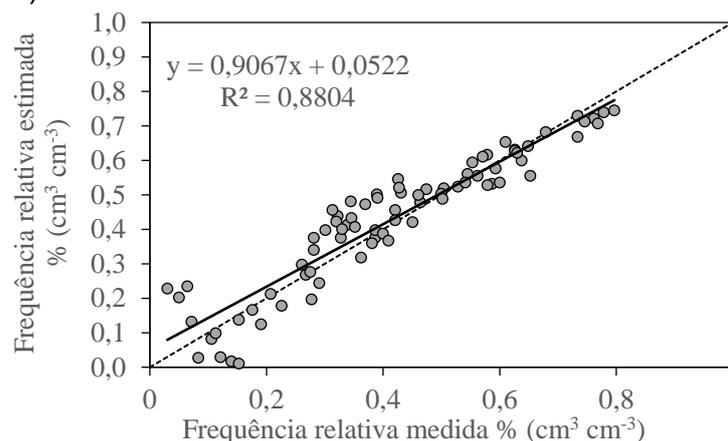


Figura 12. Relação entre frequência medida no oscilador e frequência estimada usando o modelo ajustado.

6.4 Validação do modelo

Foi desenvolvida uma rotina computacional na linguagem Python, em que usando o método numérico iterativo da secante consegue-se estimar a umidade volumétrica nas amostras a partir da aplicação do modelo previamente ajustado (Anexo 2). Este método é usado para resolução de equações algébricas não lineares, com objeto de determinar os valores de x que pertencem aos reais e que anulam a função objetivo.

No algoritmo, a solução aproximada é encontrada após um número máximo de 100 iterações; portanto o processo de cálculo é interrompido quando se satisfaz o critério de parada (MONTEIRO et al., 2012). Para este método de cálculo precisa-se conhecer duas aproximações iniciais, a saber x_1 e x_2 , as quais configuram um intervalo no qual está contido o valor desconhecido. O valor pretendido pelo algoritmo é x , que corresponde ao ponto de interseção da reta

secante com o eixo das abcissas, cumprindo-se que x corresponde ao valor tal que $y = 0$ (MONTEIRO et al., 2012) (equação 25).

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - g(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{g(x^{(n)}) - g(x^{(n-1)})}, n \geq 2 \quad (25)$$

Para o caso da estimativa da umidade, a função objetivo corresponde ao modelo para estimativa da frequência no circuito oscilador; as duas aproximações iniciais correspondem à umidade residual média das amostras ($x_1 = 0,01$) e ao valor máximo de umidade que podem ser armazenados nos poros do solo ($x_2 = 0,55$).

Cada valor de frequência relativa medido é acompanhado por um valor de umidade volumétrica medido durante a coleta de observações usando o método gravimétrico (Equação 2). Assim, este valor de umidade volumétrica medida (U_{med}) foi relacionado com o valor de umidade volumétrica estimada (U_{est}) aplicando a rotina computacional (Anexo 2) em cada grupo de observações coletadas para cada um dos cinco sensores analisados (S1.1)(Figura 13).

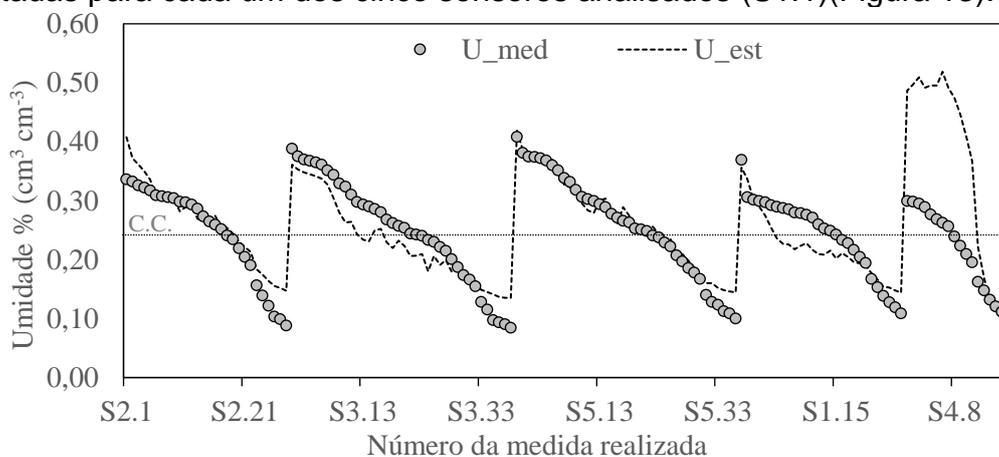


Figura 132. Relação ente umidade mensurada com o sensor e a umidade estimada com o algoritmo.

Na figura 13, no eixo x são aparentados os sensores em ordem crescente de acordo com a condutividade elétrica do estrado de saturação ($S_2 = 1,28$; $S_3 = 1,3$; $S_5 = 1,3$; $S_1 = 1,4$; $S_4 = 1,89 \text{ dS m}^{-1}$). Quando o modelo foi aplicado no sensor S_4 , este superestimou os valores de umidade superiores a capacidade de campo. Isto porque, embora todos os monólitos de solo tenham sido saturados usando diferentes soluções de condutividade elétrica, a condutividade elétrica do estrato de saturação final da maioria das amostras esteve abaixo de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$; destas o monólito S_4 teve a máxima condutividade elétrica do estrato de saturação, acima de $1,89 \text{ dS m}^{-1}$. Apesar de que a relação entre umidade estimada e umidade medida para este sensor (S_4) foi linear para os valores abaixo da capacidade de campo, o algoritmo não explica o comportamento dos dados acima deste limiar. A umidade estimada para os sensores S_1 , S_2 , S_3 e S_5 consegue uma relação linear aceitável ($R^2 = 0,8666$) com desvio médio de $5,4\%$ (Figura 14).

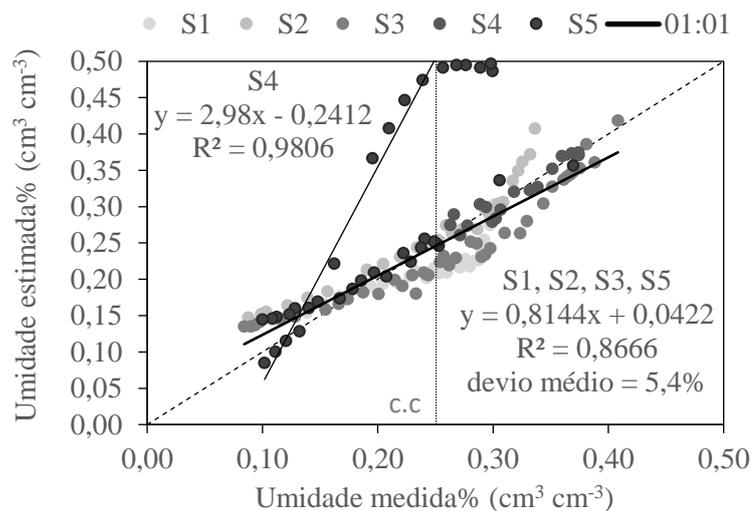


Figura 14. Relação entre umidade medida e umidade estimada usando o modelo algoritmo.

De acordo com Santana et al. (2006), a equação de Rohades et al. (1989) (Equação 9) usada no modelo para estimar a condutividade elétrica aparente, apresentou o pior ajuste em relação a outros modelos por ele calibrados. Isto ocorre por conta da falta de parâmetros de ajuste das propriedades do solo e, por conseguinte, recomenda-se que para o uso do sensor em solos com condutividade elétrica do estrato de saturação maiores que $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ seja empregado um outro modelo que contorne melhor as condições de salinidade preexistentes no solo.

O algoritmo conseguiu estimar a umidade volumétrica com uma incerteza menor que $\pm 3,1\%$ para o 95% das medições realizadas em um intervalo de 10 até 45% de umidade volumétrica (Figura 15), para os cinco sensores diferentes. De acordo com Santos (2021) o sensor capacitivo-resistivo ajustou-se individualmente a uma equação polinomial de terceiro grau para os valores de 0,06 até $0,35 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, ou seja, desde solo seco até o limite de capacidade de campo.

Outros autores relatam a construção de sensores capacitivos com terminais coplanares isolados, os quais conseguiram estimar a umidade usando equações polinomiais de segundo (CRUZ, 2013) e terceiro grau (SILVA, 2005). Embora representem bom ajuste entre a umidade e a frequência, também são equações exclusivas para cada elemento de medição. Autores como Kojima et al (2016) e Cruz et al (2010) desenvolveram curvas de calibração focadas no tipo de solo, assim realizaram uma média entre os resultados de calibração de diferentes sensores sobre o mesmo substrato e geraram uma equação de calibração específica para uma dada profundidade do perfil estudado (KOJIMA et al., 2016), ou uma equação polinomial de terceiro grau que representativa para o tipo de solo usado (CRUZ et al, 2010).

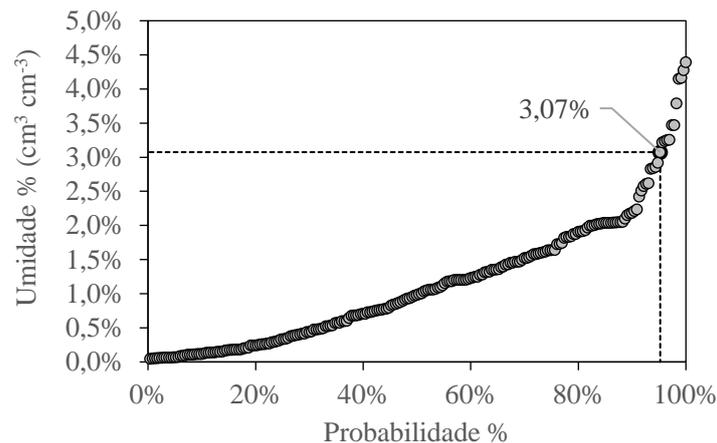


Figura 15. Incerteza para o 95% das medições em relação à umidade.

7. CONCLUSÃO

O modelo matemático tendo como parâmetros de entrada a porosidade e a condutividade elétrica da pasta de extrato de saturação do solo estimou a umidade com uma incerteza menor a 3,07% de umidade volumétrica para o 95% das estimativas realizadas.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelas bolsas de estudo e o financiamento desta pesquisa.

8. REFERENCIAS

CAZUZA, A. Aclimação do cacaueteiro à redução do volume de solo molhado. **Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Curso de mestrado. 2019.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 475-480, 2005.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; FILHO, M. A. C.; LEDO, C. A. d. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 23–30, 2006.

CRUZ, J. A. B. Desenvolvimento de um sensor de umidade do solo para determinação da frente de molhamento. **Universidade Estadual de Ponta Grossa**. Mestrado Em Computação Aplicada. 2013.

CRUZ, T. M.; TEIXEIRA, A. D. S.; CANAFÍSTULA, F. J.; SANTOS, C. C. D.; OLIVEIRA, A. D. D.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 33–45, 2010.

DEAN, T. The IH capacitance probe for measurement of soil water content. **Institute of Hydrology**, 1994.

DENG, X.; GU, H.; YANG, L.; LYU, H.; CHENG, Y.; PAN, L.; FU, Z.; CUI, L.; ZHANG, L. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, Elsevier, v. 150, p. 107052, 2020.

FREITAS, F. T. Oliveira. Critério para o manejo da irrigação via solo no cultivo de maracujazeiro. **Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**, 2019.

GARG, A.; MUNOTH, P.; GOYAL, R. Application of soil moisture sensors in agriculture: A review. In: **Proceedings of the International Conference on Hydraulics**, Water Resources and Coastal Engineering (Hydro 2016), Pune, India, 2016. p. 8–10.

HAN, Xinghai; KONG, Xiangxin. The designing of serial communication based on RS232. In: 2010 First ACIS International Symposium on Cryptography, and Network Security, Data Mining and Knowledge Discovery, E-Commerce and Its Applications, and Embedded Systems. **IEEE**, 2010. p. 382-384.

KIZITO, F.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B.; HOPMANS, J. W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 352, n. 3-4, p. 367–378, 2008.

KOJIMA, Y.; SHIGETA, R.; MIYAMOTO, N.; SHIRAHAMA, Y.; NISHIOKA, K.; MIZOGUCHI, M.; KAWAHARA, Y. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 8, p. 1292, 2016.

LINMAO, Y.; JIN, Y.; QI, J. et al. FDR soil moisture sensor for environmental testing and evaluation. **Physics Procedia**, Elsevier, v. 25, p. 1523–1527, 2012.

MONTEIRO, M. Teresa T. Métodos Numéricos: exercícios resolvidos aplicados à Engenharia e outras Ciências. 2012.

MUNNS, R.; GOYAL, S. S.; PASSIOURA, J. Salinity stress and its mitigation. 2005.

NAVARRO-HELLÍN, H.; RINCON, J. MARTÍNEZ; DOMINGO-MIGUEL, R.; SOTO-VALLES, F.; TORRES-SÁNCHEZ, R. A decision support system for managing irrigation in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 124, p. 121–131, 2016.

RHOADES, J.; MANTEGHI, N.; SHOUSE, P.; ALVES, W. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Wiley Online Library, v. 53, n. 2, p. 433–439, 1989.

ROTH, K.; SCHULIN, R.; FLÜHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 26, n. 10, p. 2267–2273, 1990.

SANTANA, G. D. S; COELHO, E. F; da SILVA, T. S; RAMOS, M. M. Estimativa da condutividade elétrica da solução do solo a partir do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 672-685, 2006.

SANTOS, M. A. C. M. dos. Terraços com cultivo irrigado na recuperação de áreas degradadas na geração de serviços ambientais. **Universidade Federal Do Recôncavo Da Bahia**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Curso de mestrado. 2021.

SILVA, I. de O. Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo. **Universidade Federal do Ceará**. Pós-graduação em Agronomia. Dissertação de mestrado. 2005.

SKIERUCHA, W.; WILCZEK, A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. **Sensors, Molecular Diversity Preservation International**, v. 10, n. 4, p. 3314–3329, 2010.

TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, **Embrapa**. 573p, 2017.

TOPP, G. C; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water resources research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.

U.S. Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agric. Handbook No. 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 1954

VELLAME L. M.; SILVA, N. D.; NACIMIENTO, F. A. L. Construção de uma sonda eletrônica de umidade do solo. **Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola UFRB, Bahia, Brasil, UFRB PPGEA-NEAS**, p. 1–10, 2019.

3. ANEXOS

3.1. Custos dos componentes para construção de um sensor de umidade do solo.

Insumos Sensor de umidade do solo	Valor R\$	Valor US\$
Item		*
01 Arduino Pro Mini	35,00	6,98

02 Resistores de 220Ω	0,29	0,058
02 Capacitor de Tântalo 10uf	3,56	0,711
01 Capacitor de Tântalo 1uf	1,78	0,355
01 placa impressa com o circuito	11,00	2,19
01 cabo manga de 5 vias - 2m	6,50	1,29
termo contráctil, estanho insumos	2	0,399
resina epóxi	4	0,798
Total	64,130	12,772

* Um dólar equivale a R\$ 5,01 na cotação do 17 de junho de 2021.

3.2. Algoritmo para estimativa da umidade baseado no modelo teórico do circuito oscilador, implementado na linguagem python.

```
import numpy as np
import math
import sympy
from sympy import exp
dados = pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/sondasCE.csv',
sep =';', decim)
x = sympy.symbols('x')

#parametros
p=0.45          #porosidade
far= 2326.12    #frequencia no ar
fsln= 1162      # frequência na solução

for i in dados:
    dados['fmedida'] = far + (dados ['F relativa medida'] * (fsln-far))
    dados['t'] = (1/dados['fmedida']) * 10

CEw = dados ['CE estrato satura'].astype(float)
t = dados['t']
fr = dados['F relativa medida']
H1 = 3.33
H2 = 1144519.68

# Calcular umidade usando o método da secante
def g(x, cee, tt, a1, a2):
    c =(1.19e-12 * a2 * ((x*12.23) + (1-p) * 2.54 + (p-x)) ** (1.724))
    cea = 0.04313 + (x-0.01) * ((cee*p) /x)
    r = (18.75*a1) / cea
    t1 = (4.3955e-7 * (exp (0.0385/(1e-5*(440+r))))))
    t2 = ((2.9348e-3*c) / (1e-5+c))
    t3 = ((146.74*c*r) / (r+220))
    t4 = (7.39e-7 * (exp (0.0215 / (1e-5*(220+r))))))
    t5 = ((1.4674e-3*c) / (1e-5+c))
    g = t1 + t2 + t3 + t4 + t5 + 0.00044022 - tt
return g
def secante (g,x1,x2,tol,CE,T,hh1,hh2):
    erro=1e3
```

```
x3=0
n=0
while (erro > tol) :
    a = g(x2,CE,T,hh1,hh2)
    b = g(x1,CE,T,hh1,hh2)
    x3 = x1-((x2-x1)/(a-b))*b
    x1 = x2
    x2 = abs(x3)
    erro = abs(g(x3,CE,T,hh1,hh2))
    n += 1
    if n > 100:
        print ('mais de 100 n')
        u_est.append(0)
    return
print ("solução aprox: {:.4}".format (x3))
print ("numero iterações: {:d}".format (n))
if x3 <= 0:
    x4 = (x3*(-1))
    u_est.append(x4)
else:
    u_est.append(x3)

for i in range(len(t)):
    secante(g,0.1,0.5,1e-4, CEw[i],t[i],H1,H2)
```

PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO NA ESTIMATIVA DA DEMANDA EVAPOTRANSPIRATIVA DA ATMOSFERA.

RESUMO: O piranômetro é um sensor importante para estimar a demanda evapotranspirativa da atmosfera. Mas, por seu alto custo de aquisição, normalmente se encontra em falta nas estações meteorológicas, por isso para calcular ETo ainda são usadas equações como Hargraves-Samani, que estimam a radiação global indiretamente com incerteza elevada quando carecem de adequada calibração. Como alternativa para este problema é proposto o uso de um sensor de baixo custo e fácil reprodução, baseado no uso de um fotodiodo de silício. Este sensor pode ser usado em estações meteorológicas automatizadas, instaladas em ambiente protegido ou em campo aberto. A partir de um teste realizado com 16 destes sensores foi concluído que a incerteza do instrumento para estimar radiação global é de $\pm 0,04 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e a incerteza para estimar a ETo (Penman-Monteith) causou desvios menores que $0,4 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ em 95% das observações realizadas. Este sensor tem custo de fabricação aproximado de R\$ 248,47. O período de calibração para uma confiança de 99,7 % foi de 32 dias.

Palavras-chave: Radiação solar, irradiância, baixo custo, estação meteorológica.

LOW-COST PYRANOMETER AS AN ALTERNATIVE IN ESTIMATING THE EVAPOTRANSPIRATION DEMAND OF THE ATMOSPHERE.

ABSTRACT: The pyranometer is an important sensor for estimating the evapotranspiration demand of the atmosphere. However, due to its high acquisition cost it is usually not present at meteorological stations. To estimate ETo, equations such as Hargraves-Samani are used, which estimate global radiation indirectly with high uncertainty when lacking proper calibration. As an alternative to this problem is proposed the use of a low-cost and easy to reproduce sensor, based on the use of a silicon photodiode. This sensor can be used in automated weather stations and installed in a protected environment or in an open field. From a test performed with 16 of these sensors it was concluded that the instrument uncertainty to estimate global radiation is $\pm 0,04 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ and the uncertainty to estimate ETo (Penman-Monteith) caused deviations smaller than $0.4 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ in 95% of the observations. This sensor has a manufacturing cost of approximately R\$248,47. The calibration period for 99.7% confidence was 32 days.

Keywords: Solar radiation, irradiance, low cost, weather station.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar pode ser realizado para diferentes finalidades que abrangem a meteorologia, hidrologia, agricultura, entre outras áreas da engenharia. Um destes possíveis estudos é a estimativa da evapotranspiração (ET), usualmente realizada para determinação das necessidades hídricas de

uma cultura com a finalidade de planejamento agrícola e realizar manejo de irrigação (RAFI et al., 2019).

Devido à grande dificuldade de estimar a ET usando medições diretas em campo, a FAO propôs em 1990 um método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) usando a equação de Penman-Monteith, a qual toma como base os dados temporais provenientes de uma estação meteorológica, que pode ser manual ou automatizada (BORNHOFEN et al., 2015).

Uma estação meteorológica automatizada (EMA) é caracterizada pela autonomia energética e coleta de dados em intervalos de tempo estabelecidos. Os dados são armazenados localmente em uma memória não volátil e podendo ser transmitidos até uma estação central (INMET, 2011). Os sensores comumente utilizados em uma EMA possuem custos de implantação e manutenção que fogem das mãos dos consumidores comuns, o que motiva o desenvolvimento de estações meteorológicas de baixo custo. No mercado nacional estão disponíveis algumas EMAs construídas com sensores confeccionados a partir de elementos acessíveis no mercado local, o que permite sua comercialização a custos reduzidos em comparação com sensores importados. Entretanto, a maioria dessas EMA de baixo custo não medem a radiação solar.

O desenvolvimento de sensores e a difusão de estações meteorológicas de baixo custo é crescente no Brasil, porém o piranômetro ainda é um instrumento pouco ofertado pela indústria nacional, mesmo com o desenvolvimento de diversos estudos no país propondo piranômetros de fácil reprodutibilidade e baixo custo (FREIRE, 2008; VILELA, 2010; BOLZAN, 2014). Assim, a disponibilidade de dados medidos de radiação solar é ainda limitada. O que leva em muitos casos a prescindir do piranômetro para mensurar a radiação solar e fazer uso de modelos matemáticos como Hargreaves-Samani, que estimam a radiação solar baseado na variação da temperatura do ar (BORGES et al., 2010).

Existem dois tipos de piranômetros, os térmicos e os fotovoltaicos. Estes últimos são uma opção econômica frente à os piranômetros térmicos, apesar de apresentar uma resposta limitada do espectro de radiação solar. Como exemplo disto o sensor comercial CS300 da Campbell SC® abrange um intervalo de sensibilidade entre 360 a 1120 nm (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2018), em comparação com o piranômetro térmico LP02 da Campbell SC®, que abrange um intervalo de sensibilidade mais amplo, de 285 até 3000 nm (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2012).

O piranômetro fotovoltaico pode ser construído usando fotodiodos de silício como elemento sensor. O fotodiodo é um sensor empregado comumente em aplicações de detecção de infravermelho, sistemas de transmissão de dados por controle remoto, fotômetros ou aplicações de controle óptico infravermelho na indústria. O fotodiodo possui como vantagem para a construção de piranômetros a sua faixa de medição do espectro eletromagnético, que se encontra dentro da zona de maior sensibilidade do sensor comercial. Além de ser um dispositivo de rápida resposta, praticamente instantânea ante as mudanças da intensidade de radiação (GÓMEZ et al., 2018).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a empregabilidade de um piranômetro construído com materiais de baixo custo, na estimativa de ET_o pelo

modelo de Penman-Monteith mediante sua integração com os sensores de uma estação meteorológica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

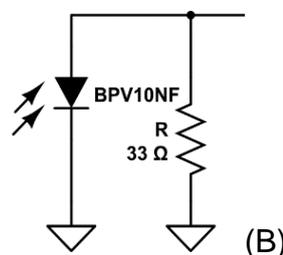
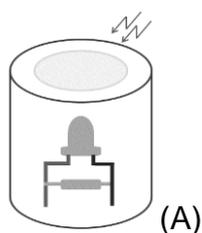
2.1. Seleção do fotodiodo

Foram construídos dois protótipos de piranômetro usando como elementos de medição os fotodiodos de modelo BPW20RF e BPV10NF. A faixa de sensibilidade do BPW20RF varia de 400 a 1100 nm, caracterizado por ter um amplo ângulo de incidência para captar a luz de $\pm 50^\circ$ (VISHAY, 2011). Por sua vez o BPV10NF possui um intervalo de sensibilidade que varia entre 790 e 1050 nm com um filtro de luz entre os 870 e 950 nm para evitar saturação do componente (VISHAY, 2011).

Para selecionar o elemento sensor foi realizada uma coleta de dados em condições de pleno sol, localizando dois protótipos sobre uma barra horizontal disposta a 2m de altura evitando o sombreamento entre os piranômetros. Foi utilizado o piranômetro secundário de termopilha, Campbell SC® LP02, como piranômetro padrão para fins de comparação. A comparação entre os dispositivos foi realizada pela estimativa do desvio relativo, com relação à média das leituras realizadas com cada protótipo. Os dois instrumentos (protótipos e padrão) foram conectados a um sistema de aquisição de dados CR1000 Campbell Sci®. Realizando medições a cada 30 segundos, com médias armazenadas em intervalos de cinco minutos, para condição de céu aberto, durante cinco dias.

2.2. Construção do sensor.

O piranômetro fotovoltaico proposto é composto por um fotodiodo de silício conectado em paralelo a um resistor de 33Ω e fixado dentro uma luva preta roscável de $\frac{1}{2}$ polegada (Figura 1B). Nas extremidades da luva foram roscados dois caps de Policloreto de Vinila (PVC) de $\frac{1}{2}$ polegada. O cap da extremidade superior, serve como filtro de luz limitando o intervalo de radiação que atinge o elemento de medição. O cap superior teve a superfície lixada para evitar o acúmulo de água na superfície do sensor, diminuindo a possibilidade de erros grosseiros nas observações (Figura 1C)



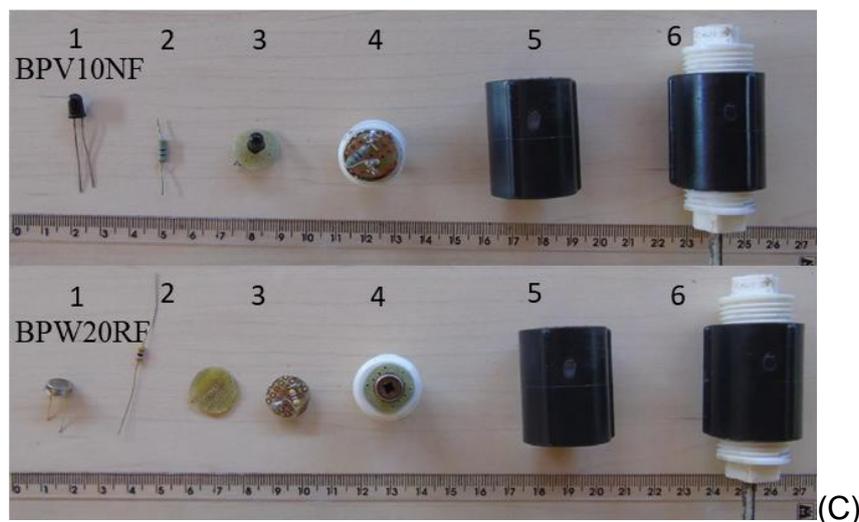


Figura 1. Esquema de funcionamento do sensor (A), circuito eletrônico (B), e sequência de montagem dos piranômetros com fotodiodos BPV10NF e BPW20RF (C). Na sequência (1) corresponde ao fotodiodo; (2) é o resistor de 33Ω ; (3) é o sensor e resistor soldados sobre uma placa de protótipo universal; (4) o conjunto soldado é unido ao plug roscado; (5) luva de PVC; (6) união de todas as partes conformando o sensor.

2.3. Calibração do sensor

A calibração do sensor foi realizada de acordo com a norma ISO 6090 de 1990, que faz referência à calibração do dispositivo experimental com relação a um dispositivo padrão. O dispositivo de referência deve ser um piranômetro térmico padrão secundário como o LP02. O processo de calibração consiste em realizar um modelo matemático para a correlação da resposta em voltagem do piranômetro fotovoltaico e a resposta em irradiância do sensor de referência.

O experimento foi conduzido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) na cidade de Cruz das Almas-Ba, localizado nas coordenadas geográficas Latitude: $12^{\circ} 39' 29,4''$ Sul, Longitude: $39^{\circ} 5' 45''$ Oeste. Os 16 sensores construídos foram fixados em uma barra metálica a 2 m sobre o solo, disposta em direção norte e em posição perpendicular aos raios do sol, sobre uma pastagem homogênea em um terreno livre de árvores (Figura 2). Além do sensor padrão foi adicionado um sensor comercial CS300.

Todos os sensores foram conectados a um Datalogger CR1000 (Campbell SC®) para a coleta e armazenamento de dados. A coleta de dados foi realizada no período entre 13/04/2018 e 01/06/2019, com intervalo de observações de 30 segundos e médias armazenadas a cada 15 minutos. Os dados coletados dos protótipos foram valores em milivolt (mV), que após modelagem foram expressos em Wm^{-2} .



Figura 2. Sensores localizados acima da barra horizontal durante o período de coleta de dados.

Ao finalizar a coleta de dados em campo aberto, a estrutura de calibração e os sensores foram instalados no interior de uma casa de vegetação com o intuito de realizar a calibração dos sensores para ambiente protegido. A estação de teste foi instalada na área experimental da mesma universidade (Latitude: 12° 39' 22" Sul, Longitude: 39° 5' 16.5" Oeste), no período 01/11/2019 até 10/12/2019. Foi utilizada a mesma unidade de coleta e armazenamento de dados, programado para armazenar os valores médios a cada 15 minutos.

2.4. Incerteza na medição

A incerteza no valor medido no piranômetro de baixo custo está definida como uma indicação de quanto o valor estimado difere do valor verdadeiro do mensurando, em termos de probabilidade, e é estimado como o intervalo de confiança para o 95% das medições, de acordo com a incerteza padrão, equação 1.

$$\sigma = \sum_{j=1}^k \sqrt{\frac{(\bar{y}_j - y_j)^2}{k}}; \quad (1)$$

Em que, σ é a incerteza padrão; k é a quantidade de pontos observados; y_j é cada uma das observações realizadas com o piranômetro de baixo custo; \bar{y}_j é o valor observações realizadas com o piranômetro padrão LP02.

A partir da incerteza padrão do instrumento pode ser estimado o número mínimo de observações necessárias para garantir a confiabilidade e reduzir o tempo em campo durante as calibrações das reproduções futuras (Equação 2).

$$n = \left(\frac{3\sigma}{le}\right)^2 \quad (2)$$

Em que, n é o número de observações para estimar o limite do erro estatístico, σ é a incerteza padrão do instrumento, le é o limite do erro estatístico 99,7%.

2.5. Estimativa da demanda evaporativa da atmosfera usando os sensores de baixo custo

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

Em que, ET_o é a evapotranspiração de referência ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Rn é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G fluxo de calor ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T é

a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento a 2m altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa); $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os demais dados meteorológicos necessários para o cálculo da ETo foram obtidos da estação metrológica que acompanhou o desenvolvimento do experimento (Termo-higrômetro CS215-L, anemômetro 034B-L, sistema de armazenamento de dados CR1000. Campbell Sci®). A partir dos resultados obtidos foram estimados os desvios dos sensores de baixo custo, em relação ao sensor padrão e o sensor comercial. Além disso, foi realizada a estimativa de ETo com dados estimados de radiação solar usando o modelo de Hargreaves-Samani (Equação 4), de acordo ao recomendado por Borges et al., (2010) para a cidade de Cruz das Almas, Bahia.

$$Rs = K_{Rs} (T_{max} - T_{min})^{0,5} Ra \quad (4)$$

Em que, Rs é a radiação solar calculada usando o modelo; K_{Rs} coeficiente de calibração 0,19 sugerido por Borges et al., (2010) para cidade de Cruz das Almas, região do Recôncavo da Bahia, Brasil; T_{max} temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); Ra é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

2.6. Integração do piranômetro com um SAD de baixo custo

O sistema de armazenamento de dados (SAD) utilizado durante a calibração dos piranômetros possui internamente um Conversor Analógico Digital (CAD) de 13 bit (CR1000 Campbell Sci®). Com o intuito de analisar a viabilidade de usar este sensor acoplado com um sistema de armazenamento de dados de baixo custo, foi realizada avaliação do módulo CAD HX711. Para isso foi instalado em campo aberto um sensor LP02 e um piranômetro de baixo custo de acordo como o esquematizado na Figura 3.

As observações foram realizadas no período de 7 dias entre o 08/01/2020 e 15/01/2020. O CAD HX711 é um dispositivo de precisão empregado para discretizar um sinal analógico através de um circuito de digitalização de 24 bits. Este dispositivo de fácil aquisição no mercado foi criado pela empresa AVIA Semiconductor® para ser empregado principalmente em balanças de precisão. Na atualidade, vem sendo bastante utilizado nas mais diversas áreas por viabilizar resultados precisos com custos baixos (ZAIQUN et al., 2013; LU et al., 2014; CAQUIMBO et al., 2015; WU, 2015; YALTA e KESKIN, 2017; CHAKRABORTY e DUBEY, 2017).

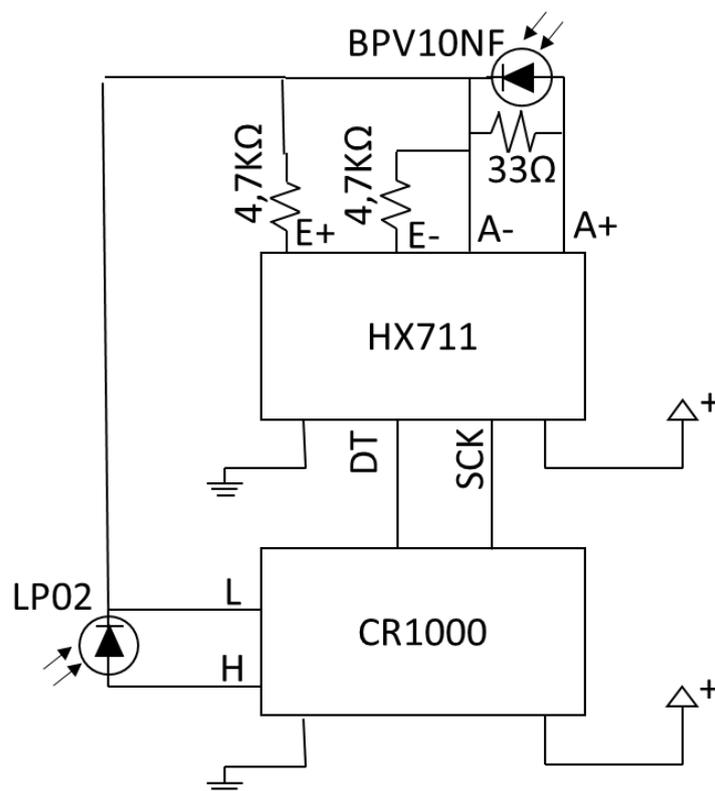


Figura 3. Esquema da montagem do experimento em campo comparativo entre o uso do conversor analógico/digital HX711 e o conversor analógico/digital interno do CR1000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Seleção do fotodiodo

Os dois protótipos de piranômetro construídos com os sensores BPV10NF e BPW20RF avaliados com relação ao piranômetro térmico LP02 da Campbell SC®, apresentaram altos coeficientes de correlação ($R^2 > 0,99$), com crescimento linear em resposta a radiação solar incidente. O sensor BPW21 da mesma linha de fotodiodos e de características similares aos testados no presente trabalho foi empregado por MEDUGU et al., (2010) na construção de um piranômetro de baixo custo como alternativa à falta de opções comerciais de piranômetros na Nigéria, obtendo deste uma boa performance como piranômetro de baixo custo.

De acordo com Freire (2008) o uso de material de PVC, tais como os adotados nesta pesquisa (luva e caps), funcionam como filtro para radiação de onda curta e protege os elementos internos do sensor contra a influência da temperatura ambiente, devido à baixa condutividade térmica do material ($0,23 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). A cor negra no sensor reduz a reflexão da luz pela parede interna da luva, tal como o observado por Bolzan (2014) que revestiu o corpo de seu protótipo de piranômetro artesanal com material em coloração negra, obtendo melhoria no desempenho do sensor.

A partir das observações em campo aberto o piranômetro construído com o fotodiodo BPW20RF apresentou amplitude de sinal máximo de 1,045 mV, e aquele construído com o sensor BPV10NF apresentou sinal máximo de 0,7813 mV. Para ambos os sensores propostos a probabilidade de ocorrência de

desvios foi menor que $\pm 0,043 \text{ MJm}^{-2}$ em 95% das medições, com um desvio máximo de $\pm 2,21\%$ e mínimo de $\pm 0,11\%$.

O erro relativo foi levemente maior no BPW20RF ($\pm 1,73\%$) que no BPV10NF ($\pm 0,694\%$), mas este é baixo para ambos os casos quando comparado com o sensor comercial CS300 ($\pm 2\%$, segundo fabricante). Valores que a sua vez ficaram concordantes com o achado por Freire (2008), quem estimou a diferença diária de $\pm 2\%$ da radiação global mensurada com um protótipo de piranômetro fotovoltaico artesanal e um piranômetro comercial da marca Eppley®.

O custo de aquisição no mercado do fotodiodo BPV10NF é inferior ao do fotodiodo BPW20RF. Diante do exposto e tomando em consideração o menor erro relativo, a maior linearidade com relação às variações da temperatura ambiente entre 0°C e 40°C , maior amplitude de saturação e o menor custo de aquisição no mercado foi selecionado o fotodiodo BPV10NF para ser usado na construção de 16 piranômetros fotovoltaicos que foram submetidos a testes entre os anos de 2018 e 2019.

3.2. Calibração do sensor

A pesar que os piranômetros tenham sido construídos e instalados sob as mesmas condições, possuíram diferenças de sensibilidade causadas pelo manejo dos materiais durante o processo de montagem. O que gera que cada sensor possua amplitude de sinal característica para descrever o comportamento sazonal do padrão, o que indica a necessidade de uma calibração individual. Vale ressaltar que mesmo os sensores de radiação construídos por processo industrial são calibrados individualmente.

Em média os sensores conseguiram representar adequadamente a irradiância durante o dia, oscilando em média entre $0,15$ e $0,25 \mu\text{V.W.m}^{-2}$, sendo sensíveis para valores de até 1108 W.m^{-2} com amplitude máxima de $0,33 \text{ mV}$ em campo aberto e de $0,35 \text{ mV}$ em ambiente protegido com sensibilidade de 800 W.m^{-2} . Este valor de voltagem se encontra sob o limite de saturação do fotodiodo 450 mV (VISHAY, 2019). O que indica que os sensores conseguem operar tanto em campo aberto, como em ambiente protegido sem apresentar risco de saturação.

A radiação média observada como os 16 sensores durante um período de um ano (Figura 4) teve um comportamento ondulatório ao recorrer das estações climáticas. Iniciando com sensibilidade baixa para outono e incrementando à medida que chega a primavera alcançando valores máximo entre primavera e verão, para volver a diminuir em outono, com um aparente nível mínimo entre outono e inverno, comportamento atribuível a um sinal quadrático.

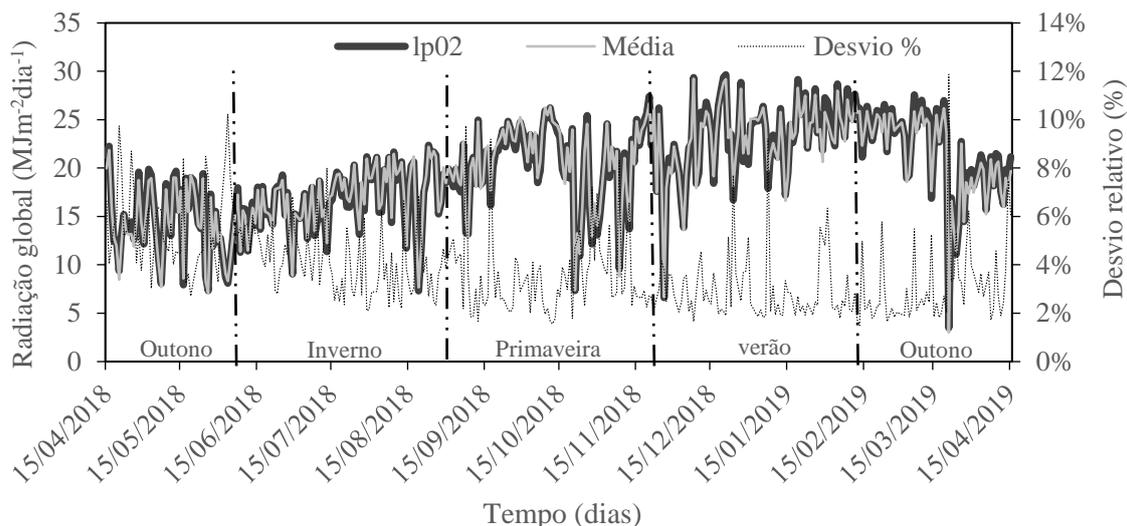


Figura 43. Variação da sensibilidade no sinal ($\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$) ao longo de um ano marcado pelas estações climáticas.

A sensibilidade durante os meses de primavera e verão pode ser influenciada pelas altas temperaturas e baixa nebulosidade característica da época, fenômeno observado por Čekon et al., (2016) quem o atribui às variações no ganho do sinal a razão do incremento da radiação difusa nos dias com condição de céu nebuloso e chuva ocasional. Para o dia de menor radiação máxima registrada, ao redor de 600 W.m^{-2} , o qual correspondeu ao solstício de inverno (21/06/2018), registrou-se 6,3 mm de precipitação, 90,7% de umidade relativa e a menor temperatura máxima do ano $21,8^\circ\text{C}$, durante este dia os sensores em geral apresentaram queda na resposta em voltagem. Isto a causa da possível formação de uma camada de água na superfície plana do sensor, limitando o espectro de radiação que o atinge.

As equações de calibração foram obtidas pela relação entre o sinal acumulado diário (mV) e os valores totais diários de radiação solar incidente (Wm^{-2}). Os valores de radiação solar foram então convertidos para serem expressados como energia em escala diária ($\text{MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) (GÓMEZ et al., 2018). A relação matemática que apresentou o melhor ajuste para a calibração dos sensores, na correlação entre irradiância e sinal elétrico, foi uma equação polinomial de segundo grau (Equação 5). A equação foi utilizada para todos os sensores com coeficientes específicos para cada um, tanto para campo aberto como para ambiente protegido.

$$\text{Irradiância} = a * (\text{sinal mV})^2 + b * (\text{sinal mV}) + c \quad (5)$$

Em que, a, b, c, são os coeficientes do modelo e sinal mV faz referência às observações realizadas com cada sensor.

Para a condição de campo aberto o erro relativo médio para o período de um ano foi aproximadamente 3,79%, e o erro absoluto médio foi $0,79 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, variando entre 5,2 e $0,06 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, sendo maior no período de outono-inverno (5,2%) que no período primavera-verão (3,2%). Já na condição de ambiente protegido o erro absoluto médio foi $0,37 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e o erro relativo médio foi 0,24%, o que indica que em média os sensores erram menos em ambiente protegido que em condição de campo aberto.

Os valores de desvio padrão na medição em campo aberto ($\pm 0,048 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e em ambiente protegido ($\pm 0,041 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) permaneceram constantes em um período de observações de 22 meses. O estado de conservação física

dos piranômetros foi um fator preponderante, pois os mesmos permaneceram íntegros sem apresentar nenhuma avaria durante todo o estudo, tanto em campo aberto como em ambiente protegido.

A incerteza média dos instrumentos para uma probabilidade de 95% de ocorrência do desvio médio é $1,88 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$ para uso em campo aberto e $0,94 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$ para uso em ambiente protegido (Figura 5). A partir de um intervalo de confiança de 99,7% o número mínimo de observações necessárias para definir o número de dias necessários para calibração dos sensores com um desvio médio no maior a $2 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$ foi estimado em 32 dias (Equação 2).

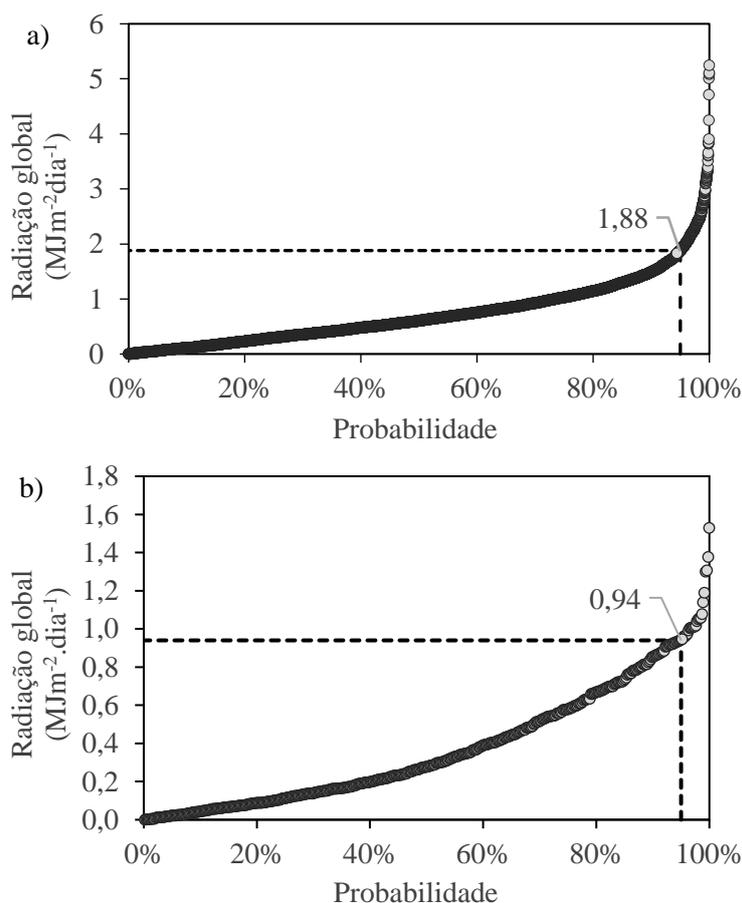


Figura 5. Desvio médio para o 95% das medições de radiação solar global média estimada com os 16 piranômetro de baixo custo (a) em condição de campo aberto e (b) em ambiente protegido.

3.3. Estimativa da evapotranspiração de referencia

Usando cada um dos sensores de radiação global (16 pinômetros de baixo custo, piranômetro comercial CS300, e piranômetro padrão LP02) e a metodologia de Hargreaves-Samani (calibrada para a cidade de Cruz das Almas – BA) foi estimada a evapotranspiração para o período observado (Equação 3) (Figura 6).

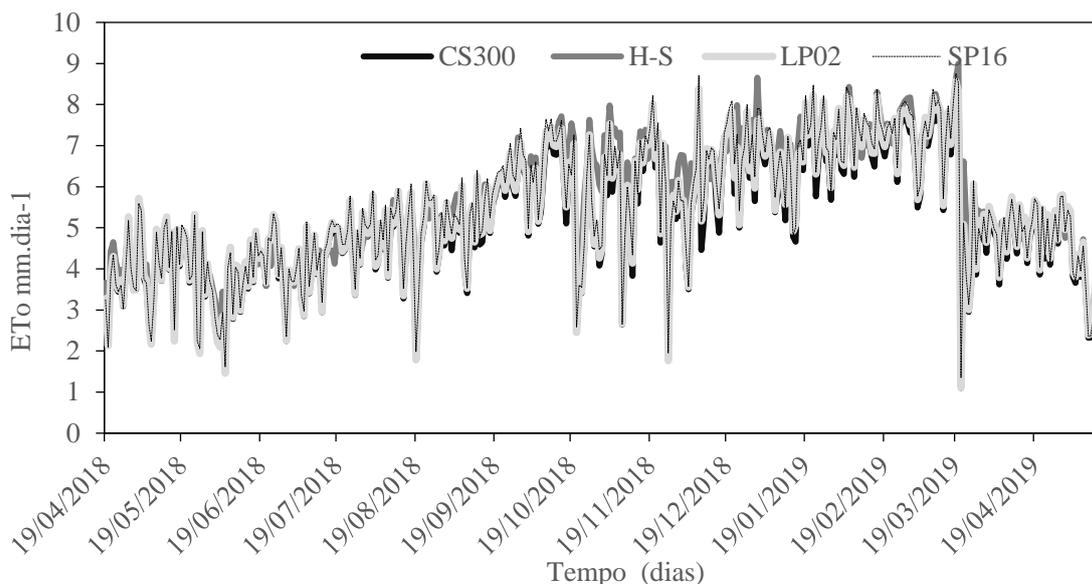


Figura 6. Evapotranspiração potencial diária para o período de um ano, estimada a partir da radiação solar mensurada com três tipos de sensor diferente. CS300, sensor comercial; LP02, sensor padrão; SP16, média dos 16 sensores piranômetros de baixo custo; e H-S modelo físico Hargreaves-Samani.

Durante o período de um ano os piranômetros de baixo custo conservaram a tendência do padrão (LP02). Comparando a média das estimativas de ETo usando piranômetros de baixo custo frente a ETo estimada usando o piranômetro padrão, o desvio absoluto médio para o total de observações foi $0,16 \text{ mm.dia}^{-1}$, o desvio padrão foi $\pm 0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ para o 95% das observações o que equivale a um desvio médio percentual de 3%.

Estes indicadores são menores em comparação com os estimados usando o modelo Hargreaves-Samani, os quais foram $0,58 \text{ mm.dia}^{-1}$ para o desvio absoluto médio e $0,55 \text{ mm.dia}^{-1}$ para o desvio padrão. Em um ano de medição, a estimativa ET pelo modelo Hargreaves-Samani que, mesmo com calibração local, apresentou um erro acumulado absoluto $183,94 \text{ mm}$ maior que o erro acumulado absoluto quando a ET é calculada utilizando o piranômetro de baixo custo $52,60$ (em média dos 16 piranômetros), e o sensor comercial do modelo CS300 apresentou um erro acumulado absoluto de $65,64 \text{ mm}$, comparados a ETo estimada com o sensor padrão LP02.

3.4. Teste do piranômetro associado a leituras com HX711

Empregar o CAD HX711 para medição do piranômetro de baixo custo no acoplamento deste com o SAD de baixo custo é viável, uma vez que a incerteza relativa estimada para o 95% das medições é inferior a $\pm 0,86 \mu\text{V}$ (Figura 8b). Assim o HX711 consegue estimar os valores de voltagem gerados no piranômetro fotovoltaico com uma resolução de $\pm 0,002 \mu\text{V}$ com relação ao CAD comercial (figura 8a). Esse desvio corresponde a um erro na estimativa da radiação de $1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e de $0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ na evaporação de referência.

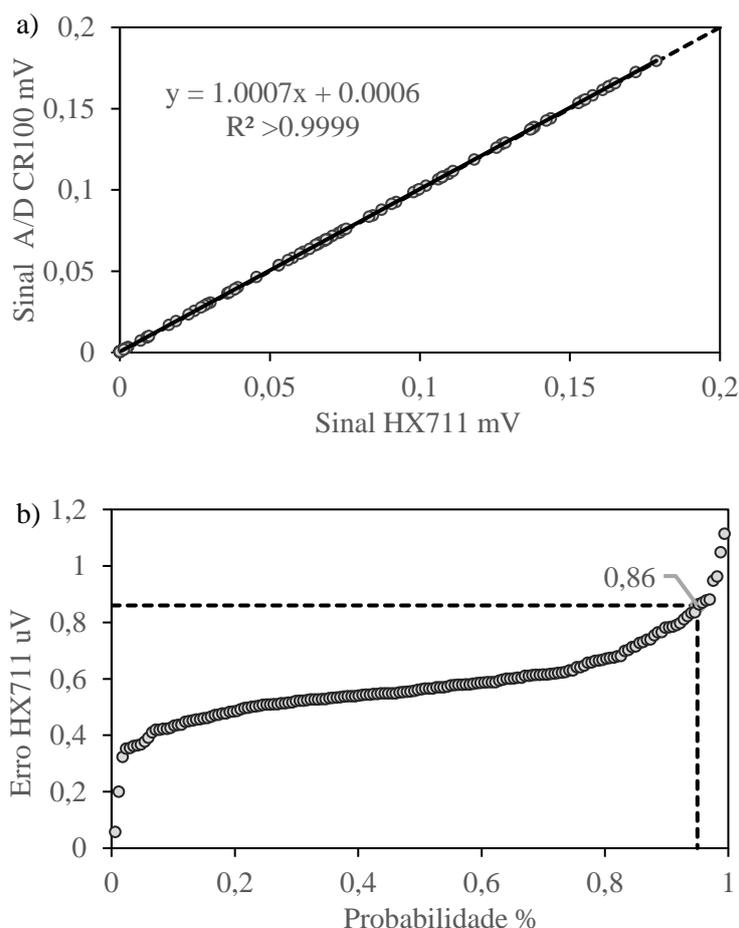


Figura 8. a) Relação entre o sinal (mV) captado no ADC HX711 comparada com a sinal captada no ADC interno do CR1000. b) Probabilidade da incerteza para o 95% das medições de voltagem.

3.5. Custos de construção

Em relação ao custo total de produção para confecção dos protótipos de piranômetro usados na comparação de fotodiodo, valores do ano 2021, os fotodiodos foram adquiridos em um valor de (BPV10NF: USD \$ 1,11) e (BPW20RF USD \$ 6,30) (www.digikey.com). Valores inferiores aos equipamentos disponíveis no mercado com características de funcionamento similares, a exemplo, o modelo construído com célula de silício da marca Apogee® cujo preço estimado foi de USD \$ 337,00; e, mesmo àqueles desenvolvidos com o propósito de custo reduzido em relação aos modelos comerciais, tal como o sensor desenvolvido por Freire (2008) cujos custos corresponderam a USD \$ 150,00.

Para realizar a construção de um piranômetro de baixo custo são empregados elementos de fácil acesso. De acordo com dados de 2021 apresentados na Tabela 1, estes componentes podem ter um custo aproximado de R\$ 30,00. A fabricação do sensor pode levar em torno de cinco horas e custar ao redor de R\$ 48,30 aproximadamente, tomando como base o valor de uma hora na média salarial de um técnico em eletrônica (SALÁRIO, 2021).

Para garantir o adequado funcionamento dos sensores, é importante realizar a calibração utilizando um piranômetro padrão de termopilha como o

LP02 ou similar. O valor do piranômetro padrão LP02 é de USD \$ 983,25 equivalentes a R\$ 5.345, este dispositivo pode chegar a ter uma vida útil de até 10 anos, com o qual sofre uma depreciação anual de R\$ 481,05. Para um período de 32 dias de calibração o valor de uso do sensor padrão é de R\$ 42,17. Durante este processo de calibração é importante contar com mão de obra qualificada para realizar a instalação dos sensores, supervisão e cálculos posteriores, este trabalho tem um valor aproximado de R\$ 128,10 em relação a 5 hora de trabalho de um analista de pesquisa (SALÁRIO, 2021). Finalmente o custo aproximado do piranômetro para o ano 2021 é R\$ 248,47 ou USD\$ 49,59 usando como base a cotação do dólar R\$ 5,01 para o 17 de junho de 2021.

Tabela 1. Valores correspondentes ao custo de produção do piranômetro artesanal.

Item	Valor R\$	Valor USD\$
Componentes	30	5,98
Mano de obra construção	48,20	9,62
Mano de obra calibração	128,10	25,56
Aluguel de sensor padrão LP02	42,17	8,42
VALOR TOTAL	248,47	49,59

4. RESUMO DOS RESULTADOS

- (i) Os fotodiodos BPV10NF e BPW20RF apresentaram uma incerteza menor $0,04 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ para a série de dados observada, o sensor selecionado foi o BPV10NF pelo menor custo de aquisição no mercado.
- (ii) A metodologia de construção dos piranômetros foi de fácil reprodutibilidade por contar com materiais de baixo custo e fácil aquisição no mercado. O protocolo de construção foi simples. Os sensores submetidos a condição de campo durante mais de um ano não apresentaram deterioração física e os dados estimados mantiveram concordância com o curso sazonal da série temporal do sensor padrão, LP02.
- (iii) Os valores de radiação global diária obtida com os 16 piranômetros de baixo custo quando usados para mensurar a evapotranspiração potencial tiveram um erro absoluto médio de $0,16 \text{ mm.dia}^{-1}$ e um desvio padrão de $\pm 0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ o que corresponde a um desvio médio percentual de 3%. O que demonstrou o uso de piranômetro de baixo custo pode ser empregado com uma alternativa na estimativa da evapotranspiração.
- (iv) O conversor analógico digital CAD HX711 apresentou uma relação de linearidade quando comparado com o CAD interno do CR1000, o que permite o emprego deste em conjunto com o piranômetro para facilidade de realizar instrumentação de baixo custo com boa acurácia instrumental.
- (v) Frente ao uso do modelo Hargreaves-Samani, o emprego de sensores de baixo custo previamente calibrados para a condição

do local é uma opção viável e vantajosa para realizar a estimativa da ETo, integrando estes sensores em uma EMA.

5. AGRADECIMIENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelas bolsas de estúdio e o financiamento desta pesquisa.

6. REFERENCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-guide lines for computing crop water requirements-FAO **irrigation and drainage paper 56**. FAO, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

BOLZAN, M. B. Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores. 2014. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal de Santa Maria**, Rio Grande de Sul, Brasil., Santa Maria, 2014.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. D.; COELHO FILHO, M. A.; da SILVA, T. S.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 74–80, 2010.

BORNHOFEN, Elesandro. Evapotranspiración del cultivo FAO 56. Pesquisa **Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 1, p. 46–55, 2015.

CAMPBELL SCIENTIFIC. CS300 Silicon Pyranometer. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com/cs300-pyranometer>>, 2018

CAMPBELL SCIENTIFIC. LP02 pyranometer Sensor. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com/lp02-l>>, 2012

FREIRE, L. A. D. Desenvolvimento De Um Piranômetro Fotovoltaico. Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal de Pernambuco**. 75 f., 2008.

GÓMEZ, J.M.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; da SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, p. 3312, 26 mar. 2018.

INMET, I. N. d. M. “rede de estações meteorológicas automáticas do inmet”, nota técnica no.001/2011/seger/laime/csc/inmet.www.INMET.gov.br, 2011. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9060: 1990. Solar Energy-Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation, 1990.

MEDUGU, D. W.; BURARI, F. W.; ABDULAZEEZ, A. A. Construction of a reliable model pyranometer for irradiance measurements. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 12, p. 1719–1725, 2010.

RAFI, Z; MERLIN, O; Le DANTEC, V.; KHABBA, S.; MORDELET, P.; ER-RAKI, S. FERRER, F. Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Inter-comparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, n. December 2017, p. 310–326, 2019.

VISHAY. datasheet BPV10N fotodiodo. Data Sheet. 2019

VISHAY. Silicon Photodiode, RoHS Compliant. www.wishay.com. Disponível em: <www.vishay.com/doc?91000>. Acesso em: 29 out. 2020. , 2011.

CAQUIMBO, C. C. P.; ROJAS, R. Q.; POLANCO, J. D. Q. Diseño e Implementación de un Prototipo Médico para el Tratamiento y Control de la Diabetes Mellitus Tipo 1. **Ingeniería y Región**, 13, 191-200. 2015

CHAKRABORTY, S. K.; DUBEY, K. Embedded system for automatic real time weight based grading of fruits. In **2017 International conference on recent innovations in signal processing and embedded systems (RISE)**. p. 512-515. IEEE. 2017.

LU, L.; JI, R.; LIU, M. Design of real-time body weight monitor systems based on smart phones. In **2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)** (pp. 1392-1396). IEEE. 2014.

Tabela Salarial 2021 – Tabela de Cargos e Salários de Todas as Profissões. **Salário**. São Paulo, 01 de julho de 2021. Disponível em: <https://www.salario.com.br/tabela-salarial/>. Acesso em 15 de julho de 2021.

WU, S. Design of the Wireless Intelligent Comprehensive Physique Test System. In **2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference** p. 926-930. Atlantis Press.2015.

YALTA, T., KESKIN, A. Ü. Design and realization of a patient bed scale. In **2017 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)** p. 1-3. 2017.

ZAIQUN, W. U. A Level Control System Based on the Single-chip Microcomputer. **Electronic Science and Technology**, 6. 2013

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Usando materiais de fácil aquisição no mercado podem ser construídos sensores tanto para estimativa da umidade do solo quanto para estimativa da radiação global (piranômetros). Estes sensores constituem alternativas de baixo custo e fácil construção artesanal, que permitem realizar a estimativa destas variáveis com boa qualidade, conseguindo ser empregados em projetos de pesquisa e atividades acadêmicas.

A partir da caracterização do funcionamento do sensor de umidade do solo foi construído um modelo matemático baseado nas interações eletromagnéticas que tem lugar entre as hastes da sonda e o solo. Aplicando o modelo em um algoritmo computacional conseguiu-se estimar a umidade volumétrica no solo com uma incerteza menor a $\pm 3\%$ em um intervalo de confiança de 95%. O algoritmo deve ser testado em diferentes texturas de solo ingressando como parâmetros a porosidade e a condutividade elétrica do extrato de saturação da pasta de solo.

Para melhorar o ajuste do algoritmo é sugerido adicionar um sensor de temperatura dentro do corpo do sensor de umidade, o qual deve estimar este parâmetro simultaneamente com a frequência relativa e assim ajustar o valor da CE no algoritmo. É sugerido que o algoritmo de cálculo da umidade seja inserido dentro da rotina de cálculo no microcontrolador do sensor de umidade, para oferecer ao usuário o valor de umidade estimado na porta serial do dispositivo. Para uma próxima versão do protótipo também é sugerida a inclusão de uma etapa de medição de corrente que permita a estimativa da condutividade elétrica aparente da solução do solo em função do efeito resistivo entre as hastes da sonda e o solo.

Em relação ao piranômetro este sensor constitui uma alternativa viável para ser instalado em estações meteorológicas usadas na estimativa da evapotranspiração potencial de um local. A incerteza da estimativa da ETo pela equação de Penman-Monteith usando o sensor de baixo custo foi $\pm 0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ para um intervalo de confiança de 95%. Este sensor foi usado por mais de um ano tanto em campo aberto como em ambiente protegido sem apresentar deterioro físico nem mudanças no desvio padrão na estimativa da radiação solar. Para melhorar o uso de este sensor é sugerido incluir o conversor analógico digital HX711 dentro do corpo do sensor, gerando assim uma saída digital de fácil instrumentalização.