



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

VANESSA DE FÁTIMA DIAS

**APLICANDO RESISTORES TERMOSSENSÍVEIS NO  
DESENVOLVIMENTO DE SENSORES DE UMIDADE  
DO SOLO BASEADOS NA TÉCNICA DE  
TRANSFÊRENCIA DE CALOR**

---

Londrina  
2020

VANESSA DE FÁTIMA DIAS

**APLICANDO RESISTORES TERMOSENSÍVEIS NO  
DESENVOLVIMENTO DE SENSORES DE UMIDADE  
DO SOLO BASEADOS NA TÉCNICA DE  
TRANSFÊRENCIA DE CALOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientador: Prof. Dra. Maria Bernadete de  
Morais França

Londrina  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através  
do Programa de Geração Automática do

Dias, Vanessa de Fátima.

Aplicando resistores termossensíveis no desenvolvimento de sensores de umidade do solo baseados na técnica de transferência de calor / Vanessa de Fátima Dias. - Londrina, 2020.  
45 f. : il.

Orientador: Maria Bernadete de Morais França.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Instrumentação eletrônica - Tese. 2. Condutividade térmica - Tese. 3. Agricultura de precisão - Tese. 4. Pulso de calor - Tese. I. de Morais França, Maria Bernadete . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 62

VANESSA DE FÁTIMA DIAS

**APLICANDO RESISTORES TERMOSSENSÍVEIS NO  
DESENVOLVIMENTO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO  
BASEADOS NA TÉCNICA DE TRANSFÊRENCIA DE CALOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof. Dra. Maria Bernadete de  
Morais França  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Morais  
Universidade Estadual Paulista - UNESP

---

Prof. Dr. José Alexandre de França  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 11 de Agosto de 2020

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pelo sustento em todos os desafios e a Nossa Senhora por toda a proteção e condução em meus caminhos.

Agradeço á toda a minha família pelo apoio, e de forma especial, aos meus pais, por estarem comigo em todo o momento da minha vida, sempre me incentivando a ser uma pessoa melhor.

Agradeço á todos do Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente (LA2I), por todo o suporte, seja ele material ou intelectual, por todos que já passaram por lá e tiveram participação em todo o resultado desse trabalho.

Agradeço á minha orientadora, por todo o auxílio que me foi dado em todos esses anos, mas também, por toda a compreensão e carinho, não somente na relação entre docente e discente, mas por entender as necessidades dos alunos de forma tão humana.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UEL por todo o conhecimento repassado a mim. E a todos os professores, que mesmo não estando no programa, me auxiliaram de alguma forma.

Agradeço á CAPES, pela assistência em todo o processo.

Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos que durante todo esse período se fizeram presente. A todos que de forma indireta ou direta, deixaram esse caminho um pouco mais leve.

Hoje tenho a consciência que as dificuldades de uma pesquisa são muito maiores que apenas os desafios acadêmicos, é necessário equilíbrio emocional e físico. Acredito que cada conflito nos faz mais fortes, mesmo quando parecemos sem forças. A palavra que retiro de toda essa caminhada é superação! Obrigada a todos.

DIAS, Vanessa de Fátima. **Aplicando resistores termossensíveis no desenvolvimento de sensores de umidade do solo baseados na técnica de transferência de calor.** 2020. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

A medição da umidade do solo é um parâmetro muito importante na agricultura e seu monitoramento garante níveis ótimos de irrigação, reduzindo a incidência de patógenos nas culturas, desperdício de água e uso de pesticidas. Para realizar a medição, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor de umidade baseado na transferência de calor. Existem vários sensores de transferência de calor, como SPHP (*Single Probe Heat Pulse*) e DPHP (*Dual Probe Heat Pulse*), mas estes apresentam problemas, como a deflexão da haste na DPHP, que pode apresentar erro nas medições. Para minimizar os problemas encontrados nesses casos, optou-se por usar, primeiramente, uma configuração de ponteira botão (BPHP) e uma ponteira dupla (DPHP) com hastes rígidas, para diferentes raios de 10 mm e 6 mm, entre o elemento sensor e o elemento aquecedor. Outras três ponteiras executadas continham o distanciamento de 6 mm e 3 mm, com a mesma configuração em botão, todas as alternativas buscando maior precisão e robustez dos sensores. Como resultado do desenvolvimento dos sensores, a sensibilidade das ponteiras de 6 mm ficaram entre  $1,038\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$  e  $1,010\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , para a ponteira de 6 mm com o encapsulamento epóxi, a sensibilidade foi de  $0,745\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ . Por fim, a BPHP de 3 mm mostrou uma sensibilidade promissora de  $1,087\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ .

**Palavras-chave:** Instrumentação eletrônica. Condutividade térmica. Agricultura de precisão. Pulso de calor.

DIAS, Vanessa de Fátima. **Applying thermosensitive resistors in the development of soil moisture sensors based on the heat transfer technique.** 2020. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

### ABSTRACT

Soil moisture measurement is a very important parameter in agriculture and its monitoring ensures optimum irrigation levels, reducing the incidence of crop pathogens, water waste and pesticide use. To perform the measurement, this work presents the development of a moisture sensor based on heat transfer. There are several heat transfer sensors, such as Single Probe Heat Pulse (SPHP) and Dual Probe Heat Pulse (DPHP), but these have problems, such as stem deflection DPHP, which may introduce error in the measurements. In order to minimize the problems encountered in these cases, we chose to use a configuration for a Button Probe Heat Pulse (BPHP) and a rigid Dual Probe Heat Pulse (DPHP) probe for lightning 10 mm and 6 mm between the sensor element and the heat- ing element. Another three probes carried out contained a distance of 6 mm and 3 mm, with the same button configuration, all alternatives seeking greater precision and robustness of the sensors. As a result of the development of the sensors, the sensitivity of the 6 mm tips were between  $1.038\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$  and  $1.010\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , for the 6 mm probe with epoxy encapsulation, the sensitivity was  $0.745\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ . Finally, the BPHP 3 mm showed a promising sensitivity of  $1.087\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ .

**Keywords:** Electronic instrumentation. Thermal conductivity. Precision agriculture. Heat pulse.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Sensor do tipo TDR.....	14
<b>Figura 2.2</b>	Sensor capacitivo .....	14
<b>Figura 3.1</b>	Ponteira Dupla (DPHP) .....	18
<b>Figura 3.2</b>	Ponteira em Botão (BPHP) .....	19
<b>Figura 3.3</b>	Ponteira Múltipla (MPHP) .....	19
<b>Figura 3.4</b>	Ponteira Simples (SPHP).....	20
<b>Figura 4.1</b>	Layout da ponteira em botão .....	25
<b>Figura 4.2</b>	Layout da DPHP.....	25
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama do sistema .....	26
<b>Figura 4.4</b>	Diagrama do circuito eletrônico de polarização dos sensores ..	27
<b>Figura 4.5</b>	Circuito de condicionamento de sinal de tensão para a leitura do sensor .....	28
<b>Figura 5.1</b>	Ponteiras BPHP e DPHP.....	31
<b>Figura 5.2</b>	Ponteira BPHP de 3 mm .....	32
<b>Figura 5.3</b>	Ponteiras BPHP de 6 mm sem e com encapsulamento epóxi.....	32
<b>Figura 5.4</b>	Imagem térmica DPHP com raio de 6 mm .....	33
<b>Figura 5.5</b>	Imagem térmica DPHP com raio de 10 mm.....	34
<b>Figura 5.6</b>	Imagem térmica BPHP com raio de 10 mm .....	34
<b>Figura 5.7</b>	Imagem térmica BPHP com raio de 6 mm.....	34
<b>Figura 5.8</b>	Teste da amostra em laboratório .....	35
<b>Figura 5.9</b>	Resposta da ponteira em botão com raio de 6 mm em função do tempo.....	36
<b>Figura 5.10</b>	Resposta dos testes com a primeira ponteira BPHP de 6mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo .....	37
<b>Figura 5.11</b>	Resposta dos testes com a segunda ponteira BPHP de 6mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo .....	38
<b>Figura 5.12</b>	Respostas do sensor BPHP de 6mm com encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo .....	39
<b>Figura 5.13</b>	Respostas do sensor BPHP de 3mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo.....	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

BPHP	Button Probe Heat Pulse
DPHP	Dual Probe Heat Pulse
MPHP	Multi Probe Heat Pulse
SPHP	Single Probe Heat Pulse
FAO	Food and Agriculture Organization
UEL	Universidade Estadual de Londrina

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
C	Capacidade térmica (J K <sup>-1</sup> )
cp	Calor específico (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\lambda$	Condutividade térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	OBJETIVOS .....	11
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
2.1	SENSORES PARA A QUANTIFICAÇÃO DA UMIDADE .....	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
3.1	TIPOS DE SENSORES .....	17
3.2	SENSORES A TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	17
3.3	MÉTODO GRAVIMÉTRICO .....	20
3.4	MODELO MATEMÁTICO .....	21
3.4.1	Equação de Pulso de Calor em Ponteira Dupla .....	22
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
4.1	METODOLOGIA .....	24
4.2	CIRCUITO ELETRÔNICO DE POLARIZAÇÃO DO SENSOR.....	27
4.3	SISTEMA DE CONDICIONAMENTO .....	28
4.4	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO .....	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	31
5.1	PONTEIRAS DESENVOLVIDAS .....	31
5.2	TESTE DAS PONTEIRAS COM IMAGENS TÉRMICAS.....	32
5.3	TESTES DAS PONTEIRAS EM SOLO DEFORMADO .....	35
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	41
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	42
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

# 1 Introdução

---

A constituição da superfície do planeta é de aproximadamente 71% de água (SIGAKI et al., 2016), mesmo assim, mediante a este percentual, as reservas de água doce são muito pequenas. Perto de 97% (96,5%) das águas são salgadas e constituem os oceanos e mares, 2,5% localizam-se como sólido (gelo), nas calotas polares e nas geleiras, 0,72% estão nos rios, lagos, entre outros e o restante, uma ínfima quantidade, na atmosfera (SIRVINSKAS, 2020).

O Brasil detém cerca de 12% do total das reservas de água doce do mundo. Há cinco fatores que afetam o uso da água doce: crescimento populacional, aumento da riqueza, expansão da atividade econômica, rápida urbanização e mudanças climáticas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009). Tais pontos, combinados ao mau uso da água e seu desperdício, influenciam diretamente nas reservas de água doce.

No Brasil, o consumo em expansão e as crises hídricas, principalmente, dos anos de 2014 e 2015, tiveram uma contribuição expressiva, na diminuição dos reservatórios de água das usinas hidrelétricas (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2018). O baixo índice pluviométrico atingiu, também, a região Sudeste agravando o problema da escassez de água (SORIANO et al., 2016).

Para Erthal e Berticilli (2018) a agricultura é o setor que mais utiliza água em seus processos, e no mundo, ela é responsável por cerca de 70% do consumo de tal recurso. Aproximadamente 60% da água aplicada na irrigação é perdida, visto que, a aplicação em questão é deficitária e a inadequação dos sistemas gera outras perdas de água (LIMA, 2001). Já o uso doméstico fica com aproximadamente 8% do total (FAO, 2012). Dessa forma, o gerenciamento da água, principalmente no setor agrícola, pode ocasionar uma diminuição expressiva deste consumo. Sendo assim, os impactos da medida da umidade do solo, através de sensores, principalmente em meios agricultáveis, pode minimizar os problemas relacionados a sua falta que afetam cada vez mais estados brasileiros.

A umidade do solo é um parâmetro de grande importância dentro da agri-

---

cultura e é o fator que mais limita os rendimentos das plantas cultivadas, principalmente em locais onde há irregularidade nas precipitações pluviais (SOARES et al., 2010). Através dela o crescimento das plantas pode ser mais acelerado e a germinação de sementes ocorre. Um solo muito úmido pode ter excesso de escoamento superficial, excesso de percolação profunda, deriva da água pelo vento para além das áreas de cultivo, entre outros problemas que podem ocorrer. Portanto, o gerenciamento da água é fator crucial para uma boa produção. O emprego de um sensor de umidade nos cultivos permite que o produtor realize o gerenciamento das irrigações, minimizando o aparecimento de doenças e diminuindo o uso de agrotóxicos. Além de possibilitar um estudo setorizado da propriedade e das diferentes características dessas áreas. Diante de tais interferências, surgiram pesquisas para que a quantidade de água pudesse ser avaliada a partir da inserção de sensores no solo.

Embora existam diversas técnicas para o desenvolvimento de sensores de quantificação da umidade do solo, nesta pesquisa foi escolhido o método funcionamento de transferência de calor. Tal método irá utilizar uma estrutura de aquecimento e outra termossensível. Assim, o deslocamento de calor entre essas estruturas, faz com que a temperatura obtida seja maior ou menor, de acordo com o nível de umidade presente no solo ou na amostra. Dentro desse método, existem 4 configurações distintas de sensores, sendo eles: Ponteira simples, do inglês Single Probe Heat Pulse (SPHP), ponteira dupla (Dual Probe Heat Pulse - DPHP), ponteira múltipla (Multi Probe Heat Pulse - MPHP) (MORI et al., 2003) e ponteira em botão (Button Probe Heat Pulse - BPHP) (VALENTE et al., 2010)(KAMAI; KLUITENBERG; HOPMANS, 2009).

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é construir diferentes sensores de umidade, com foco em ponteiras duplas (DPHP) e ponteiras em botão (BPHP), com o intuito de testar a precisão e reavaliar o raio entre o elemento aquecedor e sensor, buscando respostas de sensores mais eficientes. Para o desmembramento da meta de pesquisa, buscou-se descrever as principais estruturas de sensores, baseados na transferência de calor, caracterizar a metodologia, avaliando o desenvolvimento dos novos sensores e evidenciar os resultados obtidos, comparando-os aos sensores já existentes.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O Capítulo 2, mostra os métodos mais utilizados no desenvolvimento de sensores para a determinação da umidade. O Capítulo 3 retrata os principais tipos de sensores utilizados para a quantificação da umidade de determinada amostra, relatando suas principais diferenças e método matemático para a obtenção da umidade, assim como, o método de preparação da amostra. No capítulo 3 são apresentadas as formas de construção das ponteiros de sensores e os circuitos utilizados para o condicionamento do sinal. Já o capítulo 4 traz os resultados obtidos através dos testes desenvolvidos e algumas considerações. O capítulo 5 trata das conclusões finais do projeto.

## **2 Revisão de Literatura**

---

Este capítulo apresenta algumas premissas dos tipos de sensoriamento para a determinação da umidade do solo, suas principais características, dificuldades encontradas e utilizações. Cada tipo de desenvolvimento de sensores com técnicas distintas pode gerar melhorias de resultados, robustez, minimização de erros, facilidade de construção, dentre outros fatores importantes no conceito de sensoriamento de amostras.

### **2.1 Sensores para a quantificação da umidade**

Há alguns métodos de sensoriamento para a quantificação da água contida em determinado meio, como a reflectometria, presente nos trabalhos de Guimarães et al. (2019) e Martí, Gasque e González-Altozano (2013), pulso de neutrôn, por Tominaga et al. (2002), infravermelho descrito por Rosa Junior et al. (2019), capacitivo, discutido por Andrade Junior, Silva e Daniel (2007), Mizuguchi et al. (2015) e Pizetta et al. (2017) e por transferência de calor, avaliado nas publicações de Dias (2012), Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015), Valente et al. (2006), França et al. (2015), entre outros. A técnica de reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), no estudo de Guimarães et al. (2019), avalia a resposta à umidade do solo de um sensor portátil do tipo TDR. Este sensor é desenvolvido com duas hastes de 0,12 m de comprimento e medem de forma instantânea o volume do conteúdo de água presente no solo. Na Fig. 2.1 é mostrado o sensor do tipo TDR. Após uma análise estatística de regressão dos dados, a umidade avaliada apresentou boa representatividade, em função da resposta do sensor TDR e da umidade gerada através do método gravimétrico.

Embora os sensores de reflectometria apresentem uma técnica com boa precisão, estes tendem a ser mais caros e isso pode inviabilizar seu uso no campo. Também é necessária uma calibração contínua dos sensores para cada condição de especificidade de manejo do solo. O alto custo também é uma característica que está presente nos sensores infravermelhos. O sensor capacitivo desenvolvido

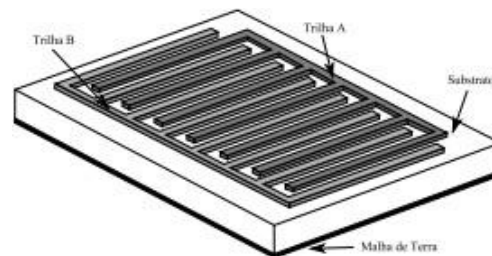
**Figura 2.1:** Sensor do tipo TDR



**Fonte:** Guimarães et al. (2019)

no estudo de Mizuguchi et al. (2015) utiliza o efeito de campo de borda. Sua construção é de um capacitor com planas finitas em um plano, projetando o campo elétrico para dentro da amostra. Na Fig. 2.2 apresenta-se uma ilustração do sensor.

**Figura 2.2:** Sensor capacitivo



**Fonte:** Mizuguchi et al. (2015)

A medição da constante dielétrica do solo é realizada através do valor da capacitância entre os eletrodos nele inseridos. Como a estrutura física do sensor contém distância fixa entre as trilhas, a capacitância dele tende a variar de acordo com a quantidade de moléculas de água livres, que influenciam o campo elétrico gerado pelo sensor capacitivo. Já na pesquisa Andrade Junior, Silva e Daniel (2007), foi utilizada uma sonda capacitiva portátil. Contudo, os sensores capacitivos têm menor confiabilidade, visto que, podem sofrer alterações, de acordo com a mudança das propriedades físico-químicas do solo em que estão inseridos. De fato, a técnica de transferência de calor pode ter um custo menor quando comparada aos sensores por reflectometria e infravermelho, e serem mais confiáveis que os sensores capacitivos (DIAS, 2012).

Um desses estudos está associado ao desenvolvimento de sensores que pos-

suem seu funcionamento baseado na transferência de calor. Na transferência de calor, ocorre o deslocamento de calor de um ponto a outro. Para os sensores, essa transferência é dada por convecção, que acontece pela diferença de temperatura entre meios, sólidos ou fluidos, sendo assim, esse fluxo de calor é dispersado de um corpo de maior temperatura para um com menor temperatura. Mais especificamente, ocorre a variação da condutividade térmica de um material poroso em contato com o solo ou do próprio solo (FRANÇA et al., 2015).

A literatura apresenta diferentes tipos de sensores que possuem o funcionamento baseado na transferência de calor, que são: ponteira dupla (DPHP), ponteira simples (SPHP), ponteira múltipla (MPHP) e ponteira em botão (BPHP). Estes se diferenciam, pela estrutura física e/ou número de hastes que os compõem.

É importante ressaltar que as ponteiras simples, normalmente, são desenvolvidas para avaliar a umidade em determinado material, já que ela é encapsulada nesse material, como no trabalho de Silva Junior (2018), em que a ponteira era encapsulada em cimento. Alguns desses sensores apresentam problemas relacionados a sensibilidade (LIU, 2011), mas através do trabalho de Dias (2012), essa sensibilidade apresentou melhorias, chegando a  $21, 2^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ .

Pesquisas relacionadas a ponteira dupla DPHP, como Campbell, Calissendorff e Williams (1991), Song et al. (1998), Knight, Jin e Kluitenberg (2007), Basinger et al. (2003), Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015), entre outras, trazem uma estrutura que possui dois elementos (sensoriamento e aquecimento) separados por uma determinada distância. As hastes, convencionalmente, são fabricadas em aço inoxidável e apresentam diferentes diâmetros: 0,407 mm (CAMPBELL; CALISSENDORFF; WILLIAMS, 1991), 0,635 mm (BASINGER et al., 2003) e 1,0 mm (NUSIER; ABU-HAMDEH, 2003). As ponteiras duplas, apesar de apresentarem um resultado efetivo para a quantificação da umidade do solo, com a distância entre hastes de 6 mm, geraram, em muitos estudos, o problema de deflexão das hastes, acarretando erros nas medidas.

As ponteiras múltiplas podem representar um estudo alternativo as distorções de medidas ocasionadas pelo arqueamento das hastes das ponteiras duplas, mas em alguns casos, também possuem multifuncionalidade. Nas pesquisas de Valente et al. (2006) a MPHP fazia a medição simultânea de temperatura, conteúdo volumétrico de água, fluxo de água e salinidade em volumes pequenos de solo. Mori et al. (2003) produziram sensores que determinavam as propriedades térmicas do solo e o teor volumétrico de água e com análise dos resultados, também permitiu estimar a capacidade hidráulica do solo. Em Valente et al. (2003) as ponteiras

avaliavam apenas a umidade do solo.

A última estrutura que utiliza como método de funcionamento a transferência de calor é a ponteira em botão (BPHP) (VALENTE et al., 2010; KAMAI; KLUITENBERG; HOPMANS, 2015). No entanto, mostra-se uma pesquisa menos explorada, mesmo que ela gere mais robustez as ponteiras. Diante deste fator e de outros mostrados anteriormente foi realizada a escolha para o estudo das ponteiras em botão e de novas estruturas com hastes rígidas para a ponteira dupla.

## **3 Fundamentação Teórica**

---

Neste capítulo, são mostrados os conceitos preliminares dos sensores a transferência de calor, suas características, distinções, o método utilizado para as análises do solo e métodos matemáticos.

### **3.1 Tipos de sensores**

Há diferentes tipos de sensores que possuem o funcionamento baseado na transferência de calor, como descrito na seção 2.1. Cada um apresenta suas peculiaridades, que podem ser diferenças, físicas, na geometria de sua composição, número de hastes e encapsulamento. No decorrer da seção será caracterizada a ponteira dupla (DPHP), ponteira simples (SPHP), ponteira múltipla (MPHP) e a ponteira em botão (BPHP).

### **3.2 Sensores à transferência de Calor**

Na transferência de calor, ocorre o deslocamento de calor de um ponto a outro. Para os sensores, essa transferência é dada por convecção, que acontece pela diferença de temperatura entre meios, sólidos ou fluídos, sendo assim, esse fluxo de calor é dispersado de um corpo de maior temperatura para um com menor temperatura. Mais especificamente, ocorre a variação da condutividade térmica de um material poroso em contato com o solo ou do próprio solo (FRANÇA et al., 2015).

Campbell, Calissendorff e Williams (1991), propuseram a ideia de um sensor com duas hastes, com 0,514 e 0,819 mm de diâmetro, gerando um novo modelo de sensores baseados na transferência de calor. Alinhados a tal modelo, Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015), desenvolveram a ponteira dupla (DPHP), com hastes rígidas que são separadas por uma distância fixa. Neste estudo, a ponteira era envolva por uma esfera plástica.

Diferentes modelos de DPHP também foram desenvolvidos por autores como Bristow, Campbell e Calissendorff (1993), Welch, Kluitenberg e Bristow (1996), Bils- kie, Horton e Bristow (1998), Bristow (1998), entre outros.

Em comparação a experimentos desenvolvidos por Basinger et al. (2003), Heitman et al. (2003), Ochsner e Baker (2008), Ochsner, Horton e Ren (2001), Ochsner, Horton e Ren (2003), Kluitenberg et al. (2010), Song et al. (1998), a distância entre as hastes com maior efetividade e menor erro de precisão, após extensivos testes em laboratório e, também, investigações em campo com os sensores, foi de 6 mm, tornando-se uma distância de referência.

A configuração da ponteira dupla (DPHP) consiste em duas hastes rígidas Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015), como pode ser observado na Fig. 3.1, possui duas hastes rígidas, uma delas é responsável pelo sensoriamento e outra pelo aquecimento. Basicamente, a haste aquecedora dispersa o calor através do meio em que a ponteira está inserida, como por exemplo, o solo, e o calor atinge a haste do sensor. Visto que a água facilita a dissipação de calor pelo meio, quanto maior a umidade presente no solo menor é a temperatura obtida pela haste do sensor (DIAS, 2012).

**Figura 3.1:** Ponteira Dupla (DPHP)



**Fonte:** Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015)

Muitas vezes as ponteiras duplas apresentavam erros em suas medidas devido ao deflexionamento das hastes, pois, a distância entre o elemento sensor e o aquecedor da ponteira sofria alterações, acarretando medidas de temperatura e umidade diferentes das que se era esperado. De forma mais específica, Kluitenberg, Bristow e Das (1995) mostraram que um erro de 2% no espaçamento entre hastes resultaram em um erro de 4% no teor de água apresentado. Em Liu et al. (2008) a modificação do grau entre as hastes de aquecimento e sensoria- mento, resultou em erro superior a 11% na estimativa da capacidade volumétrica

de calor.

Em alternativa a tal problemática, Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2009) propuseram uma nova estrutura para a DPHP, a ponteira permaneceria com o distanciamento de 6 mm entre os elementos, mas sem hastes, criando assim, a ponteira em botão (BPHP), apresentada na Fig. 3.2. De fato, a BPHP segue os mesmos princípios da DPHP, porém, com a minimização de erros.

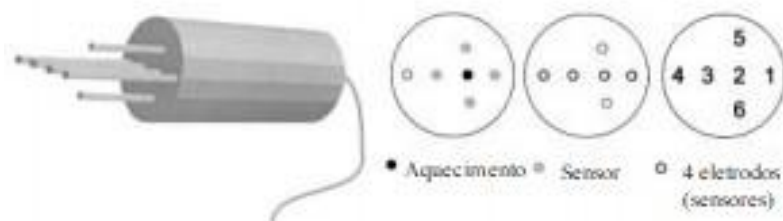
**Figura 3.2:** Ponteira em Botão (BPHP)



**Fonte:** Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2009)

Outra estrutura alternativa aos erros de medidas da ponteira dupla foi desenvolvido por Mori et al. (2003), trata-se de uma ponteira múltipla (MPHP), mostrada na Fig. 3.3, cuja estrutura foi realizada com diversas hastes, uma aquecedora central e, no mínimo, 4 hastes de sensores. Uma média das medidas obtidas pelas hastes do sensor era feita, com isso, era possível a minimização dos erros ocorridos na DPHP.

**Figura 3.3:** Ponteira Múltipla (MPHP)



**Fonte:** Mori et al. (2003)

De acordo com Dias (2012), o funcionamento da ponteira simples (SPHP) assemelha-se aos das outras configurações apresentadas. A SPHP possui uma haste de aquecimento e um elemento sensor, ambos são encapsulados juntos e o mais próximo possível. Um longo pulso de calor é aplicado na haste, em torno de

20 segundos, e durante esse pulso a temperatura é mensurada pelo sensor. Em experimentos realizados por Dias et al. (2013) os sensores SPHP foram fabricados com transistores bipolares, assim como no trabalho de Silva Junior (2018), tal técnica mostrou uma sensibilidade superior as técnicas usuais com termistores, esta ponteira pode ser visualizada na Fig. 3.4.

**Figura 3.4:** Ponteira Simples (SPHP)



**Fonte:** Silva Junior (2018)

A primeira estrutura que se assemelha a uma ponteira em botão foi desenvolvida por Somerton e Mossahebi (1967), denominada *ring heat source probe*, essa ponteira determinava a condutividade térmica em rochas. As ponteiras em botão possuem diferentes configurações, que podem se distinguir pela disposição dos seus elementos aquecedores e sensores.

Em Valente et al. (2010), por exemplo, utilizava-se um anel aquecedor e um sensor central, ambos encapsulados em resina de acetal Delrin®. Já em França et al. (2015), estes elementos foram construídos através de resistores, e envoltos por uma resina epóxi.

A distância entre o elemento sensor e o aquecedor são distintas em 6 mm, visto que, esta foi a distância que apresentou os melhores resultados, de acordo com o que foi disposto no trabalho de Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015). Pelo fato de não utilizarem hastes, os resultados obtidos apresentavam menos erros, pois, o problema ocasionado pela deflexão das hastes é eliminado nessa configuração.

### 3.3 Método Gravimétrico

Considerando um método direto de medição da umidade do solo é importante analisar o método gravimétrico. Este, consiste em obter a amostra, pesá-la, realizar a secagem desta amostra e então calcular a umidade que o solo apresenta (RADULOVICH, 2009).

A amostra de solo é pesada da maneira como é retirada do local, secada em uma estufa a 105°C durante 24 horas, após, a amostra deve ser pesada novamente, para assim, obter o percentual de umidade presente na referida amostra, através da seguinte equação:

$$\theta_g = \frac{m_{H_2O}}{m_s} = \frac{m_u - m_s}{m_s}, \quad (3.1)$$

onde,  $\theta_g$  representa o teor de água presente no solo,  $m_{H_2O}$  a massa de água,  $m_u$  a massa úmida e  $m_s$  massa seca do solo.

### 3.4 Modelo matemático

Os sensores a transferência de calor, cujo funcionamento se dá pela aplicação de um pulso de calor no elemento de aquecimento, consideram apenas a condução térmica radial do elemento, assim, a equação diferencial dessa condução, descrita por Jaeger e Carslaw (1959), é:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3.2)$$

sendo  $T$  a temperatura absoluta em K,  $t$  representa o tempo em segundos,  $r$  a distância radial do centro em m,  $\alpha$  a difusividade térmica em  $m^2s^{-1}$ , dada pela razão  $\lambda$  e a capacidade térmica volumétrica ( $\rho c_p$ ), em  $Jm^{-3}K^{-1}$ .

O cálculo da condutividade térmica é teoricamente baseado em uma linha de fonte de calor infinitamente longa e fina, conforme descrito por Low, Lovelidge e Powrie (2014). O elemento de aquecimento é exposto a uma potência constante, gerando uma diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) após o tempo  $t$ , considerando o início do aquecimento, conforme mostrado na Eq. (3.3). Para resolver a Eq. (3.2), assumindo uma fonte de calor linear infinita de potência constante e uma temperatura inicial uniforme ( $T_0$ ), a variação térmica à distância  $r$  é:

$$\Delta T = - \frac{q}{4\pi\lambda} E_i \left( - \frac{r^2}{4\alpha t} \right), \quad (3.3)$$

onde,  $q$  é a energia dissipada por unidade de comprimento em  $Wm^{-1}$  e  $E_i$  a função integral exponencial:

$$E_i(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du. \quad (3.4)$$

Após o período de aquecimento, a equação da variação térmica é descrita por,

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha(t-t_{heat})}\right), \quad (3.5)$$

na qual,  $t_{heat}$  é tempo em que o pulso de calor é desativado.

A função exponencial integral pode ser expandida nos dois primeiros termos da seguinte série de Taylor:

$$E_i(x) = \gamma + \ln|x|, \quad (3.6)$$

sendo  $\gamma$  a constante de Euler-Mascheroni  $\approx 0,577216$ . Esta Série Taylor é válida, de forma aproximada, apenas para pequenos valores de  $x$ , já que  $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$ , isso ocorre durante o longo período de aquecimento. Diante do exposto e substituindo a Eq. (3.6) na Eq. (3.5), tem-se:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \gamma + \ln\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right]. \quad (3.7)$$

Para pulsos de calor mais longos essa equação é propícia, além de ser válida também para um menor distanciamento entre os elementos sensor e aquecedor.

### 3.4.1 Equação de pulso de calor em ponteira dupla

Os sensores BPHP têm características semelhantes aos de ponteira dupla, como a distância entre o elemento de aquecimento e o sensor, que é normalmente fixa. Basicamente, a definição do modelo matemático da ponteira dupla é válida para a ponteira em botão, visto que suas diferenças consistem na estrutura física. Sendo assim, é possível definir a capacidade volumétrica,  $\rho c_p$ , (CAMPBELL; CALLISENDORFF; WILLIAMS, 1991), de acordo com:

$$\rho c_p = \frac{q'}{e\pi r^2 \Delta T_{max}}, \quad (3.8)$$

sendo  $e$  o número de Euler  $\approx 2.7183$  e  $q'$  é a energia dissipada pelo aquecedor em  $Jm^{-1}$ . Portanto, a capacidade volumétrica pode ser descrita por Kluitenberg e Heitman (2002), como,

$$\rho c_p = \rho_s c_s + \rho_u c_u \theta_v \quad (3.9)$$

onde  $\theta_v$  é a umidade volumétrica da amostra,  $\rho_a$  e  $\rho_w$ , são respectivamente as densidades do solo e da água em  $kgm^{-3}$ , bem como  $c_s$  e  $c_w$  indicam o calor específico correspondente. Substituindo a Eq. (3.9) na Eq. (3.8), obtêm-se:

$$\theta_v = \frac{q'}{e\pi r^2 \Delta T_{max} \rho_w c_w} - \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}. \quad (3.10)$$

Pela Eq. (3.10) é possível notar que o aumento do teor de água no solo proporciona uma maior dissipação de calor.

## 4 Materiais e Métodos

---

Este capítulo contém a apresentação das formas de construção, física e eletrônica, da ponteira dupla (DPHP) e em botão (BPHP) e a descrição do circuito elétrico dos sensores e o circuito utilizado para o condicionamento de sinal.

### 4.1 Metodologia

Cada sensor foi projetado no software Altium® e construído em uma placa de circuito impresso apenas com resistores SMD (*Surface Mounting Device*), alguns com alto coeficiente térmico de 3.900 ppm/°C e os demais com baixo coeficiente térmico (10 ppm/°C). Assim, os resistores de alto coeficiente térmico têm o papel de sensoriamento da temperatura, enquanto os resistores comuns, possuem a função de aquecimento.

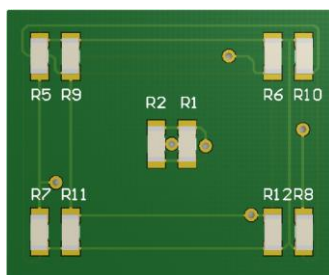
Primeiramente, foram desenvolvidas 4 ponteiras de sensores, com geometrias distintas. Cada ponteira foi construída com a mesma disposição de resistores em ambos os lados da PCB, com o intuito de deixá-las mais robustas, diferenciando-se pelo formato e pela distância entre os resistores sensores e os utilizados para o aquecimento. Duas ponteiras foram desenvolvidas de acordo com a estrutura de um DPHP e duas com base na BPHP, já as distâncias usadas em cada uma delas foi de 6 mm e 10 mm. O propósito desse estudo foi avaliar a distância existente entre o elemento sensor e o aquecedor, assim como as influências geradas no comportamento de cada uma das ponteiras. Na pesquisa de Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015), eles obtiveram melhor resposta nos testes de suas ponteiras, através de um distanciamento de 6 mm, diante disso, o desenvolvimento das ponteiras em suas distintas estruturas visou corroborar tal distanciamento.

Como já mencionado, sensores que seguem a configuração DPHP, normalmente, geram erros nas medidas quando há interferência do solo em suas hastes, visto que, sua inserção na amostra pode deflexioná-las. Diante do exposto, as ponteiras DPHP construídas têm hastes rígidas, retirando os erros nas medidas geradas pela não garantia da distância fixa entre o sensor e aquecedor da ponteira.

Já as ponteiras BPHP foram elaboradas em formato retangular, garantindo assim uma melhor distribuição de calor dos resistores de aquecimento até os resistores sensores. O roteamento das ponteiras pode ser observado nas Fig. 4.1 e Fig. 4.2.

Foram inseridos oito resistores para cada ponteira, que são os elementos sensores da placa e dois resistores que produzem o aquecimento para ela. O circuito foi organizado em ambos os lados da placa, a fim de gerar maior uniformidade nas medições.

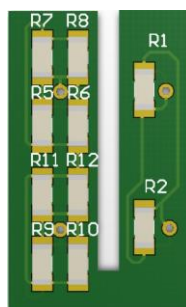
**Figura 4.1:** *Layout* da ponteira em botão



**Fonte:** Autoria própria

Na Fig. 4.2, os resistores que possuem a função de sensor estão localizados no lado esquerdo da placa, enquanto os aquecedores estão no lado direito. E na Fig. 4.1 os resistores que possuem a função de aquecimento estão alocados no centro da placa, enquanto os resistores termossensíveis estão próximos as arestas da placa retangular.

**Figura 4.2:** *Layout* da DPHP



**Fonte:** Autoria própria

A resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) do circuito na parte superior e inferior da placa é dada pela seguinte equação (FRANÇA et al., 2018):

$$R_{eq} = ((R_5 // R_6 // R_7 // R_8) + (R_9 // R_{10} // R_{11} // R_{12})) // ((R_{13} // R_{14} // R_{15} // R_{16}) + (R_{17} // R_{18} // R_{19} // R_{20})), \quad (4.1)$$

enquanto, a resistência equivalente do sistema de aquecimento ( $R_0$ ) pode ser

descrita por,

$$R_0 = (R_1 // R_2 // R_3 // R_4). \quad (4.2)$$

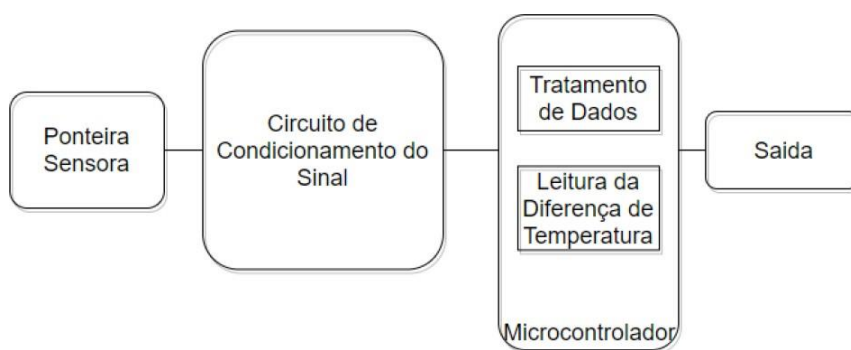
Os resistores  $R_5$  a  $R_{20}$  são de  $470 \Omega$  com alto coeficiente temperatura de  $3.900 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  (que equivale a  $1,833 \Omega/^\circ\text{C}$ ) (FRANÇA et al., 2018). Para  $R_1$  a  $R_4$ , foram utilizados os resistores de  $200 \Omega$  e  $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

As outras ponteiras construídas, também, possuem a configuração da ponteira BPHP, seguindo a mesma estrutura de desenvolvimento da Fig. 4.1 e, também com a mesma composição eletrônica apresentada nas Eq. (4.1) e Eq. (4.2). Duas com distanciamento entre o elemento sensor e o aquecedor de  $6 \text{ mm}$  e uma outra  $3 \text{ mm}$ .

O desenvolvimento das duas ponteiras com o mesmo distanciamento ( $6 \text{ mm}$ ), fez-se necessário para que uma delas fosse encapsulada em uma resina plástica (epóxi Epotherm 130 da Transene®), com alta condutividade térmica, permitindo, com isso, maior confiabilidade de resultados ao realizar testes em solo, já que os componentes elétricos estariam envoltos pelo epóxi, deixando-os nos locais pré-determinados, sem nenhum problema de deslocamento ou de soltura dos resistores da placa de circuito impresso, assim como garantir a isolação elétrica.

Cada uma das ponteiras foi conectada ao sistema de condicionamento para que o sinal adquirido pudesse ser tratado, obtendo informações sobre o aumento ou diminuição da temperatura do local onde o sensor está disposto, de acordo com a quantidade de água inserida na amostra de solo.

**Figura 4.3:** Diagrama do sistema



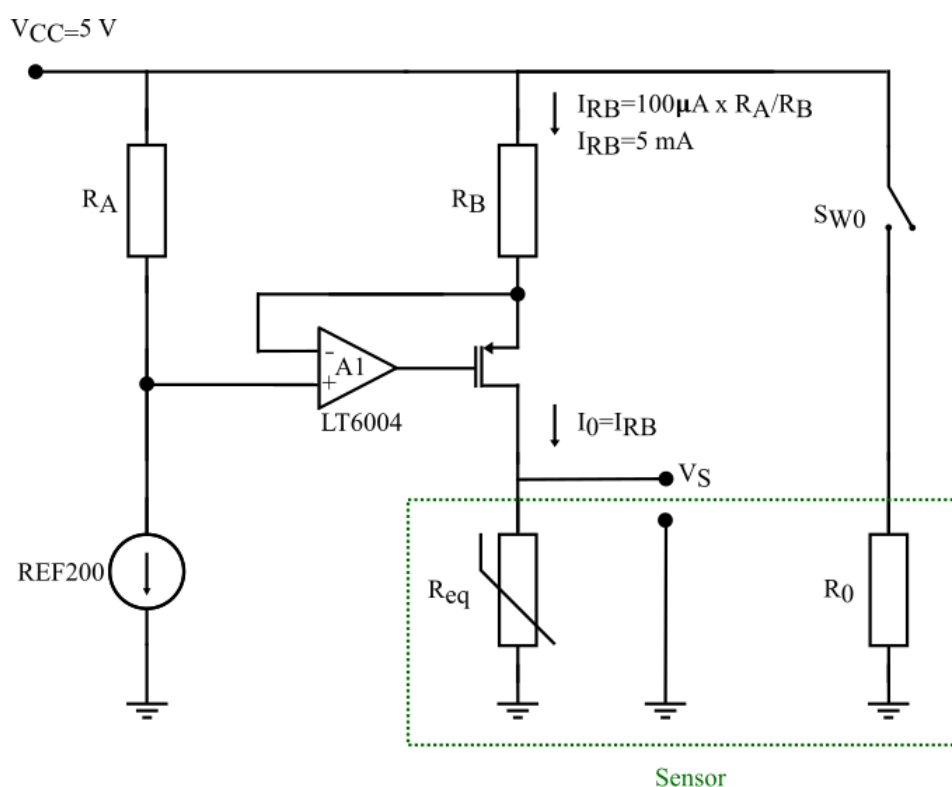
**Fonte:** Autoria própria

A Fig. 4.3 apresenta o diagrama simplificado do sistema usado para obter a resposta dos sensores.

## 4.2 Circuito eletrônico de polarização do sensor

O circuito eletrônico de condicionamento do sensor é exposto na Fig. 4.4. Sua alimentação é de 5 V, a polarização do sensor ( $R_{eq}$ ) é feita por corrente, já que estudos apresentados em França et al. (2018) mostraram melhoras significativas em sua sensibilidade. Para tal polarização, foi usado o CI REF200, que possui uma corrente de  $100\ \mu\text{A}$  preestabelecida, os resistores  $R_A$  e  $R_B$ , cujos valores de  $20\ \text{k}\Omega$  e  $390\ \Omega$ , respectivamente, fazem com que a corrente que atinja os resistores termossensíveis seja de  $5\ \text{mA}$ , denominada de  $I_{RB}$ . O amplificador operacional A1 (LT6004) também foi inserido no circuito e, dentre outras características, possui uma baixa corrente de entrada de  $3\ \text{pA}$ . E, ainda há, o transistor  $M_1$ , do CI CD4007, que é formado por um par de transistores PMOS conectados em paralelo. Os datasheets dos CIs estão no Anexo A.

**Figura 4.4:** Diagrama do circuito eletrônico de polarização dos sensores



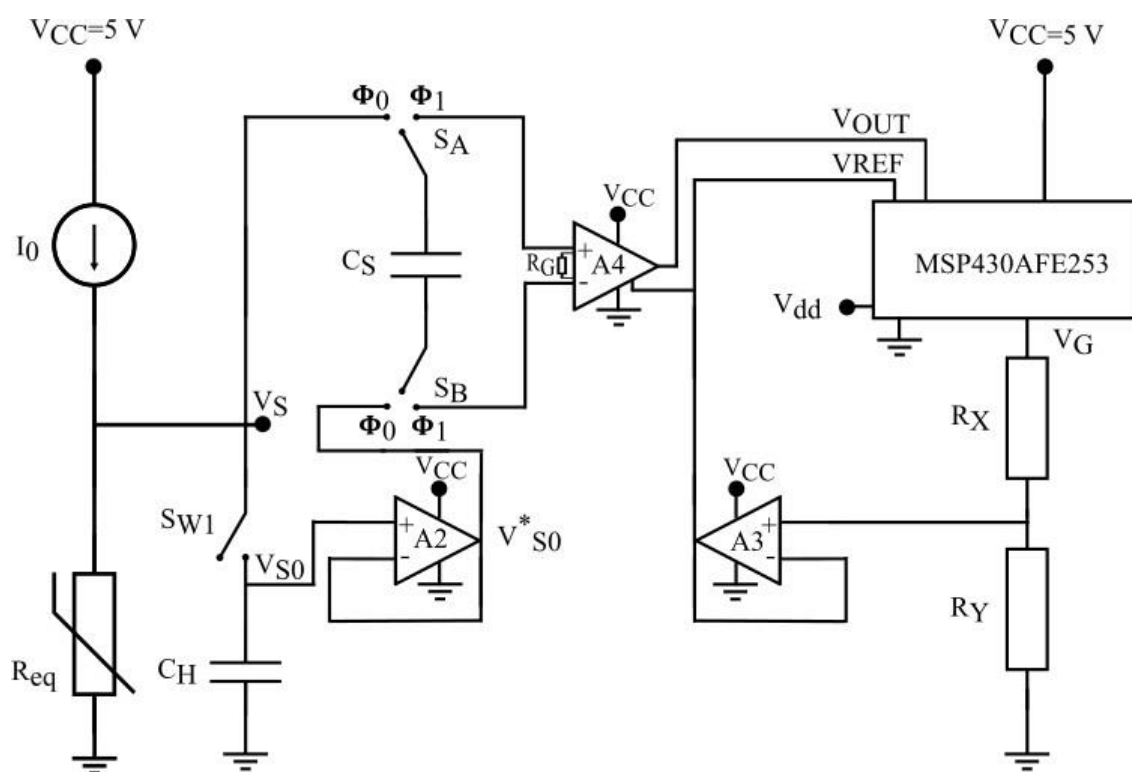
**Fonte:** Adaptado de França et al. (2018)

Ao aplicar uma tensão constante no resistor  $R_0$  é criado o pulso de calor na ponteira, visto que os resistores de baixo coeficiente térmico serão atingidos por esta tensão, quando a chave  $S_{W0}$  é fechada. A tensão  $V_S$  é obtida por fonte constante de corrente constante  $I_0$  forçada sobre  $R_{eq}$  (resistores termossensíveis). Então, a variação da tensão  $V_S$  será influenciada, de forma linear, apenas pela temperatura.

### 4.3 Sistema de condicionamento

O circuito de condicionamento de sinal faz com que os dados obtidos através das medidas dos sensores analogicamente, possam ser tratados e amostrados digitalmente, facilitando a leitura das informações adquiridas. A baixa potência é uma característica importante para um sistema autônomo, neste caso um pulso de calor é inserido no elemento de aquecimento da ponteia pelo período de 6 s e potência de 500 mW, resultando em uma energia de 3 J, que é bem menor do que a energia que foi aplicada no trabalho desenvolvido por Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2009). Outro aspecto relevante é que a operação do circuito, observado na Fig. 4.5, é feita com uma única fonte de tensão de 5 V.

**Figura 4.5:** Circuito de condicionamento de sinal de tensão para a leitura do sensor



**Fonte:** Adaptado de França et al. (2018)

O uso de um conversor A/D de baixo custo requer um ganho na tensão  $V_S$  lida no sensor, no entanto, esta tensão possui um nível DC dado por  $R_{eq} * I_0$  e considerando a tensão de alimentação do circuito de 5 V, um ganho  $G_v=8,5$  seria suficiente para saturar o amplificador. Para que isso não ocorra, um circuito *sample and hold* é inserido antes do amplificador de instrumentação. Assim, no instante anterior ao pulso de calor ser aplicado no sensor, a fonte de corrente é ativada e a chave  $S_{W1}$  é fechada, com isso o circuito paralelo, formado por  $R_{eq}$  e

$C_H$ , é carregado. O tempo de carregamento é de  $25,85 \mu s$  e, após 25 ms,  $S_{W1}$  é aberta, dessa forma, garante-se que o valor de  $V_S$  será igual a  $V_{S0}$ .

A tensão  $V_{S0}$  é mantida com  $V_{S0}^*$  no amplificador  $A_2$  (amplificador com baixa corrente de polarização de entrada de 3 fA) durante todo o ciclo de medição. As chaves  $S_A$  e  $S_B$ , fazem parte do circuito integrado LTC 1043, e são comutadas após a fase de amostragem (circuito *sample and hold*) do circuito de condicionamento de sinal, durante o período  $\varphi_0$  do clock, com isso a tensão sobre o capacitor  $C_H$  será  $V_S - V_{S0}^*$ .

Na entrada do amplificador de instrumentação  $A_4$  (CI INA133) aparecerá a tensão  $V_S - V_{S0}^*$ , já que no clock anterior ( $\varphi_0$ ),  $C_S$  foi carregado com tal tensão. O ganho deste amplificador foi ajustado para  $G_v = 46,5$ , sendo  $R_G$  igual a  $2,2 k\Omega$ . Diante do exposto, a tensão na saída de  $A_4$  será  $V_{OUT}$  ( $V_{OUT} = V_S - V_{S0}^* +$  a tensão de offset de  $A_2 +$  a tensão de offset de  $A_4$ ). Esta tensão é aplicada ao microcontrolador MSP430AFE253 que conta com um conversor A/D de 24 bits, suficiente para os 15 bits da tensão  $V_{OUT}$  quando convertida digitalmente.

A polarização por corrente do circuito, faz com que haja uma tensão pré-estabelecida de 600 mV na entrada do amplificador  $A_2$ , essa tensão não é modificada, já que o valor da corrente não muda. Portanto, a entrada do conversor A/D quando deveria receber o valor zero, teria então o valor da tensão pré-estabelecida. Para que ao realizar as leituras no A/D, as medidas não sofressem a influência da tensão gerada pela polarização do circuito, foi inserido o amplificador  $A_3$  e os resistores  $R_X$  e  $R_Y$  (ambos com  $10 k\Omega$ ). Estes resistores na entrada de  $A_3$  proporcionam em sua saída a tensão de 600 mV, que corresponde à metade da tensão de referência de *badgap*( $V_G$ ) disponível no microcontrolador. Conseqüentemente, a tensão de polarização do circuito será anulada pela tensão na saída do amplificador  $A_3$ . Isso possibilita, que apenas as modificações, ocasionadas na resistência dos resistores termossensíveis e, conseqüentemente, na tensão  $V_S$  lida pelo conversor possa ser avaliada e convertida para a amostragem dos dados.

A conexão de saída do amplificador operacional  $A_3$  (CI LT6004) em uma das entradas do microcontrolador garante que, quando a tensão de entrada em  $A_4$  for zero, o conversor A/D também receberá zero em suas entradas.

É importante ressaltar, que uma conversão A/D é realizada ao final de cada ciclo de clock ( $\varphi_1$ ) até o final do tempo de medição.

## 4.4 Preparação das amostras de solo

Para a preparação da amostra, foi necessário retirar um fragmento do solo, cujos constituintes são matérias orgânicas, e torna-lo uniforme. Para isso, utilizou-se uma peneira granulométrica separando assim, grânulos e partículas. Através de uma agitação manual, as partículas ficaram uniformizadas de acordo com o tamanho malha da peneira, neste caso foi utilizada uma malha de 0,84 mm.

Deste solo peneirado, foram coletados 39,90 gramas e armazenados em um recipiente plástico, que possibilitasse a inserção total dos sensores, a fim de que nenhuma parte das ponteira estivesse fora da amostra, evitando erros nas coletas das medidas, já que todo o sensor estaria em contato com as partículas de terra.

Os testes com as ponteiros de 6 mm, com e sem encapsulamento e com a de 3 mm, foram realizados com uma amostra de 36,25 gramas de solo peneirado em uma malha de 0,84 mm, da mesma forma como executado no teste primário, e para cada período de testes foi inserido água nas diferentes amostras.

A água foi colocada manualmente na amostra, para que assim, através do método gravimétrico a umidade do solo pudesse ser analisada.

## 5 Resultados

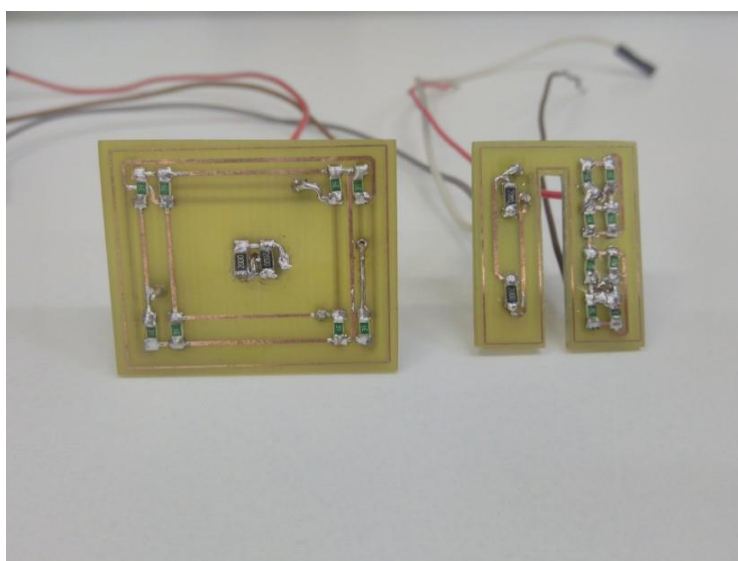
---

Neste capítulo, são apresentados os resultados construtivos das ponteiras e os testes realizados. Primeiramente, foi desenvolvido um teste com a câmera térmica, cujo objetivo foi analisar o distanciamento entre o elemento sensor e aquecedor da ponteira. Outro teste foi realizado para verificar as respostas dos sensores DPHP e BPHP, sem e com encapsulamento epóxi, em amostras de solo com umidades diferentes.

### 5.1 Ponteiras desenvolvidas

As ponteiras projetadas no Software Altium, foram elaboradas manualmente, com o auxílio dos instrumentos e equipamentos, disponibilizados pelo LA2I e pelo laboratório técnico. Na Fig. 5.1 contém a imagem dos dois sensores (BPHP e DPHP).

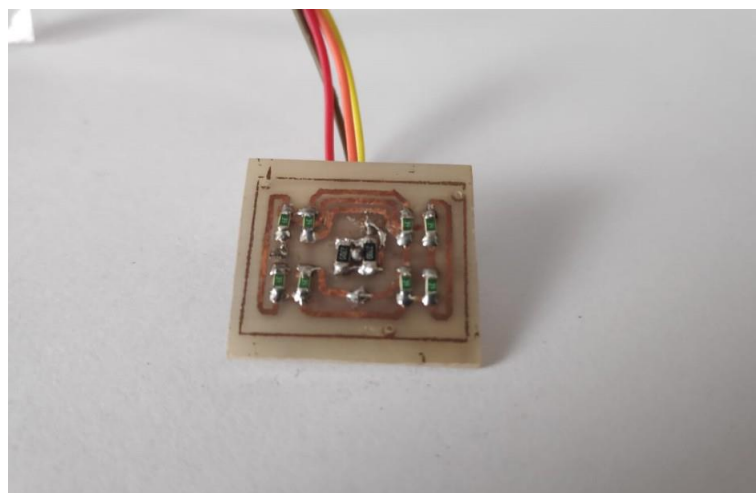
**Figura 5.1:** Ponteiras BPHP e DPHP



**Fonte:** Autoria própria

Na Fig. 5.2 pode-se visualizar a ponteira em botão com o menor distanciamento.

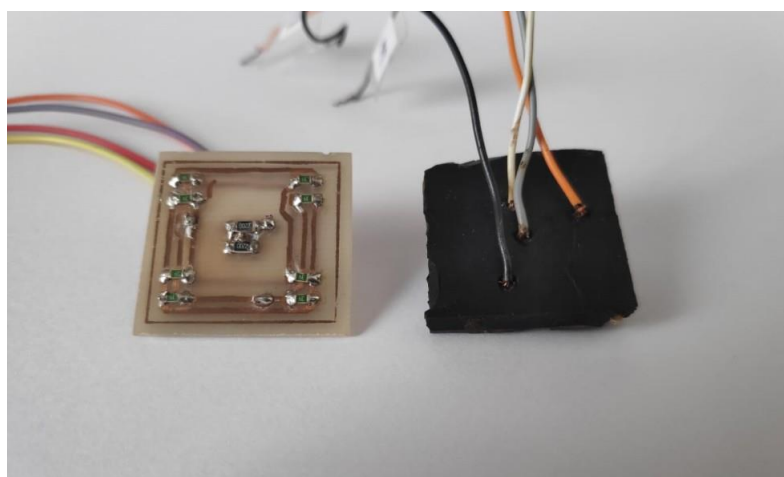
**Figura 5.2:** Ponteira BPHP de 3 mm



**Fonte:** A autoria própria

A Fig. 5.3, contém as ponteiras BPHP de 6 mm, sem a aplicação do epóxi e já encapsulada com essa resina.

**Figura 5.3:** Ponteiras BPHP de 6 mm sem e com encapsulamento epóxi



**Fonte:** A autoria própria

## 5.2 Teste das ponteiras com imagens térmicas

A modificação da distância entre o elemento sensor e aquecedor da ponteira pode gerar melhorias nas medidas, já que é possível que exista uma maior ou menor influência dos resistores, que funcionam como aquecimento, nos resistores que são sensíveis a temperatura. Sendo assim, foram avaliadas duas distâncias diferentes (6 mm e 10 mm) para a composição das ponteiras BPHP e DPHP. Pode-se observar que sensores com raio superior a 6 mm não responderam corretamente ao pulso de calor, pois, não se notou interferência deste aquecimento no elemento sensor da ponteira, comprovando o que já havia sido discutido, em relação as

distâncias, em outras publicações, como Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2015) e França et al. (2015).

Um ponto importante a ressaltar é que o teste para a comprovação da distância se deu através de dois métodos, por imagens térmicas das ponteiros e pelo teste em solo. Para a análise térmica, a câmera termográfica, modelo Thermocom V384s, foi usada, a fim de visualizar a influência do elemento de aquecimento no sensor DPHP e BPHP. Esta câmera possui uma escala de temperatura que varia entre  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$ , para as imagens dos sensores a variação obtida foi de  $32^{\circ}\text{C}$  em cores quentes, até  $22^{\circ}\text{C}$  para cores mais frias.

Destaca-se a importância do estudo térmico ao observar as Fig. 5.4, Fig. 5.5, Fig. 5.6 e Fig. 5.7, evidenciando-se que em distâncias superiores a 6 mm entre os resistores termossensíveis e os resistores que têm a função de aquecimento, a energia dissipada através do pulso de calor gerado nesses resistores, não alcançou os resistores com alto coeficiente de temperatura da borda na ponteira BPHP ou do lado esquerdo da placa da DPHP. Portanto, não foi possível notar alterações significativas nos dados de temperatura obtidos das ponteiros.

**Figura 5.4:** Imagem térmica DPHP com raio de 6 mm



**Fonte:** Autoria própria

A construção da ponteira BPHP com raio de 6 mm, cuja estrutura geométrica é um retângulo, com os resistores sensíveis a temperatura em seus vértices, foi mais eficaz e apresentou melhor resposta quando comparada às demais. Como pode ser notado através da imagem térmica da estrutura durante o pulso de calor, Fig. 5.7.

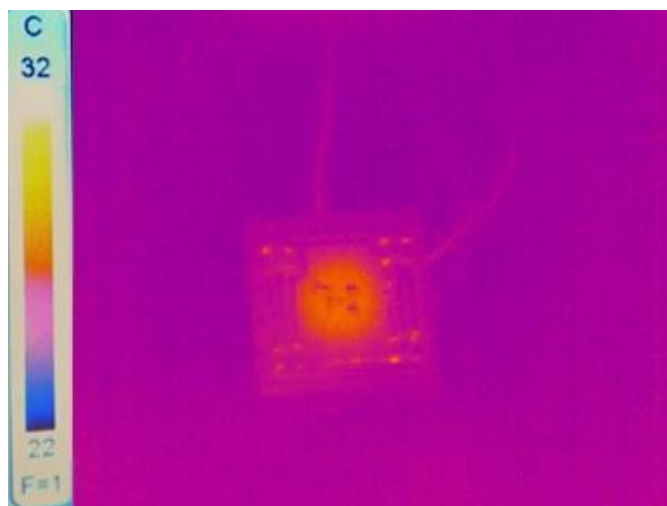
A obtenção da captura da imagem através da câmera termográfica não era exata, já que seu tempo de resposta era lento e cada imagem foi capturada em instantes com pequenas diferenças de tempo, no entanto, procurando avaliar o

**Figura 5.5:** Imagem térmica DPHP com raio de 10 mm



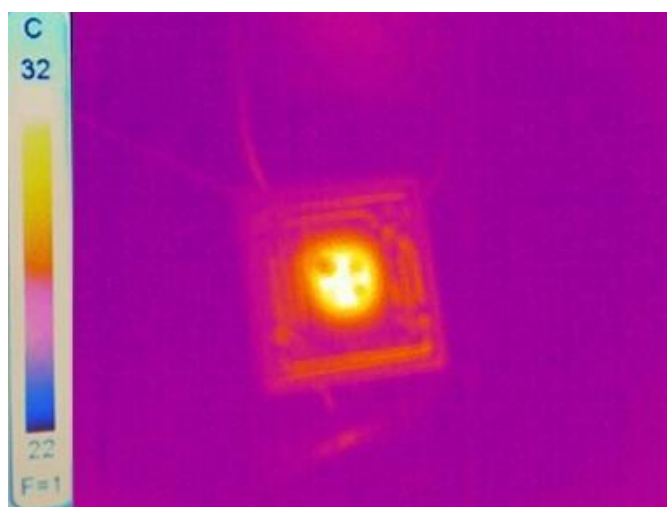
**Fonte:** Autoria própria

**Figura 5.6:** Imagem térmica BPHP com raio de 10 mm



**Fonte:** Autoria própria

**Figura 5.7:** Imagem térmica BPHP com raio de 6 mm



**Fonte:** Autoria própria

momento mais próximo do pico de temperatura nos resistores de aquecimento. Mesmo que exista essas pequenas diferenças no tempo de captura das imagens, a resposta apresentada pela ponteira em botão foi a mais adequada.

Em virtude dos fatos mencionados, observa-se que quanto maior a distância entre o elemento sensor e o aquecedor menor a influência da dissipação do pulso de calor, já que este calor, que sai da haste de aquecimento, acaba se perdendo no meio. Diante disso, é fato que com um distanciamento menor entre os elementos da ponteira, o calor dissipado atinge com maior efetividade os resistores de alto coeficiente térmico gerando uma maior sensibilidade de medição.

### 5.3 Testes das ponteiras em solo deformado

Os testes dos sensores foram realizados em laboratório, utilizando uma pequena quantidade de solo seco, pesando 39,9 gramas e peneirado em uma malha de 0,84 mm. Para maior uniformidade e controle das medições, o solo foi inserido em um recipiente plástico e foi adicionada água para verificar a resposta do sensor. Depois da adição de água, a amostra pesava 45,91 gramas. Uma foto desse aparato de teste é apresentada na Fig. 5.8

**Figura 5.8:** Teste da amostra em laboratório

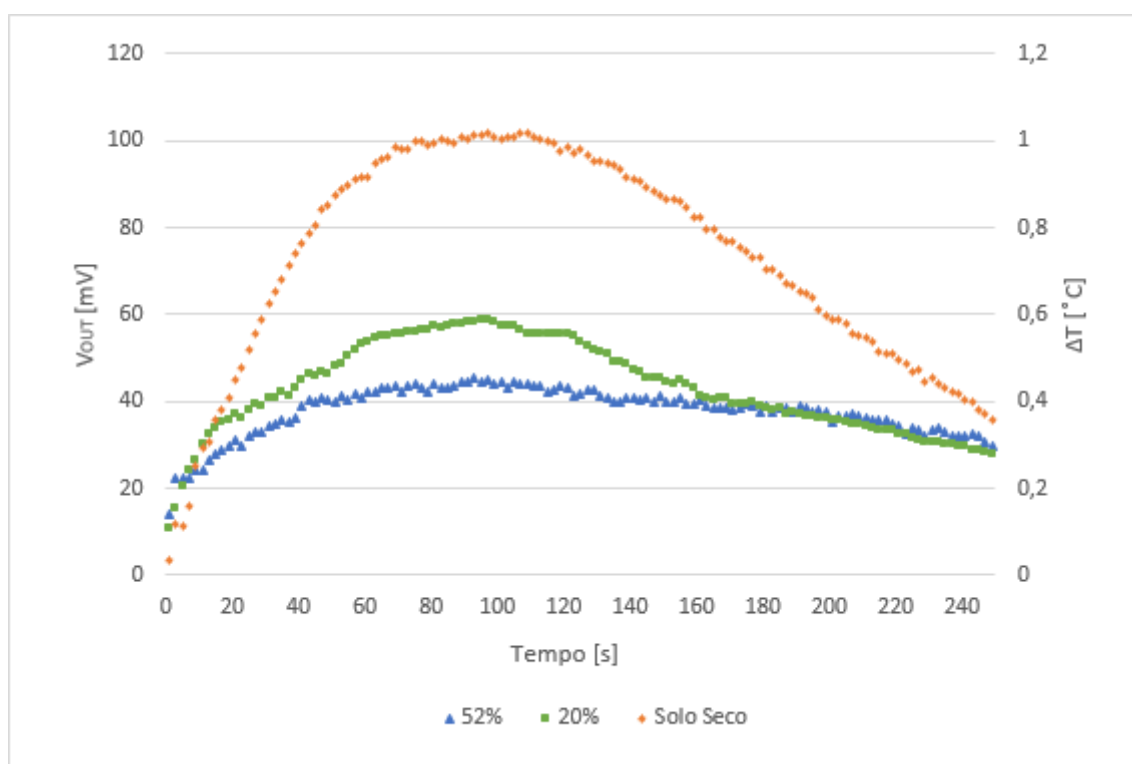


**Fonte:** Autoria própria

No teste em solo deformado, foram coletadas 250 medidas para solo seco e para solo com adição de água. A Fig. 5.9 mostra a resposta do sensor para solo seco (curva laranja) e para solo com o maior percentual de água (curva azul).

No gráfico, a tensão ( $V_{OUT}$ ) e temperatura ( $\Delta T$ ) estão em função do tempo. Esta temperatura pode ser obtida através dos valores conhecidos de coeficiente térmico dos resistores termossensíveis, do ganho do sinal de processamento do circuito e da corrente em que estes resistores estão submetidos, de acordo com os valores de tensão  $V_{OUT}$  adquiridos. Observou-se que o sensor é capaz de detectar temperaturas mais altas em solo seco quando comparado com as medições de solo úmido. A água facilita a dissipação de calor e, portanto, a temperatura adquirida pelos resistores de borda da ponteira é mais baixa.

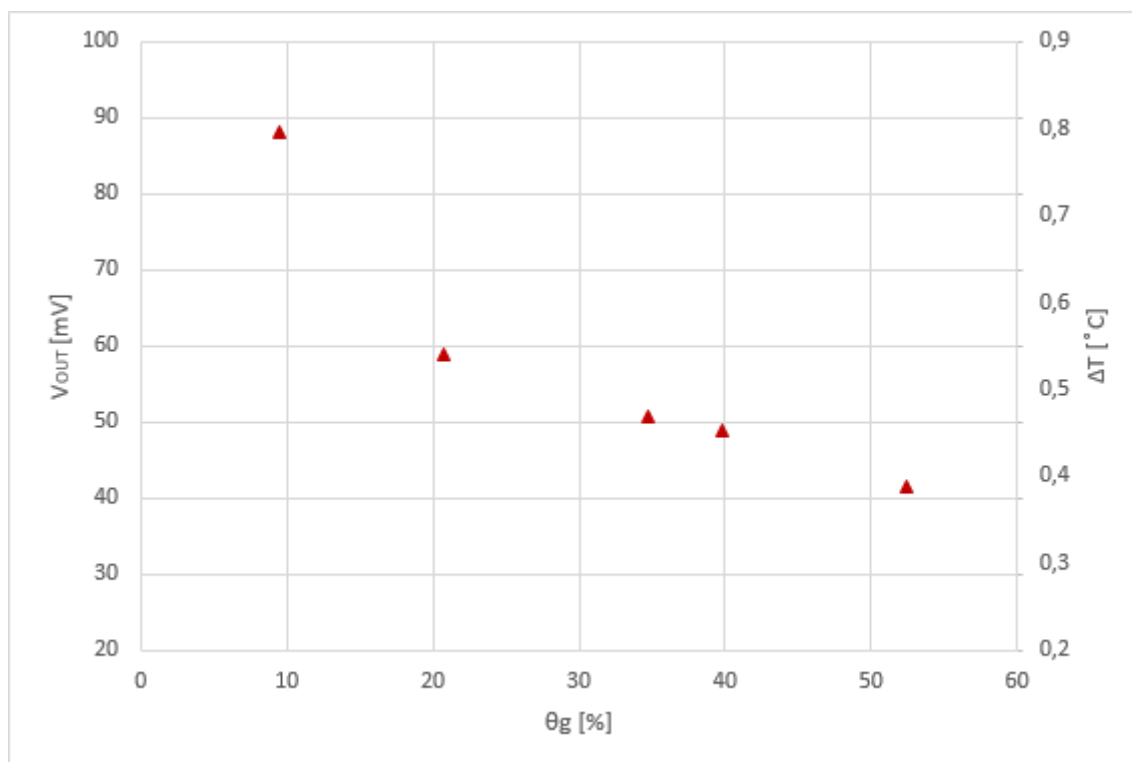
**Figura 5.9:** Resposta da ponteira em botão com raio de 6 mm em função do tempo



**Fonte:** Autoria própria

Na Fig. 5.10 é possível observar a resposta em tensão e o máximo valor de temperatura obtido, para as umidades diferentes das amostras de solo, em que o sensor BPHP de raio de 6 mm foi submetido.

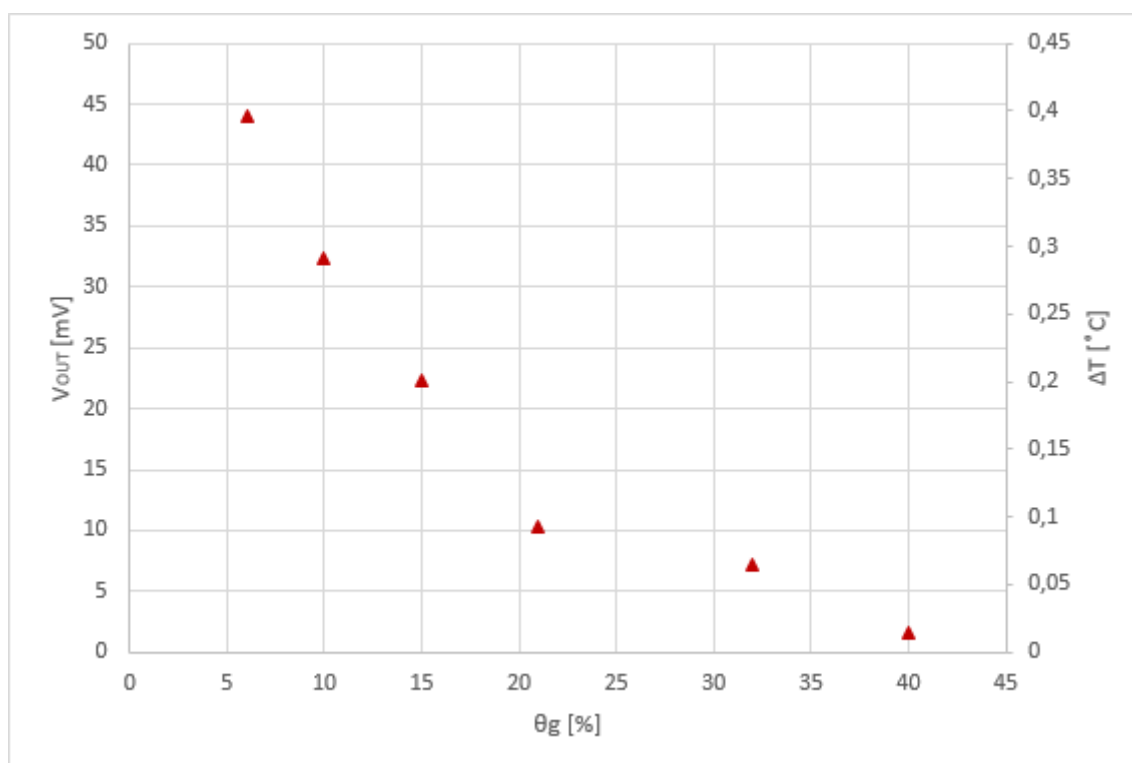
**Figura 5.10:** Resposta dos testes com a primeira ponteira BPHP de 6mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo



**Fonte:** Autoria própria.

Os testes com as novas ponteiros foram desenvolvidos com uma amostra de solo deformado de 36,25 gramas e geraram curvas de temperatura distintas. A ponteira de 6 mm, que foi novamente desenvolvida e testada, mostrou-se adequada. Os pontos no gráfico que têm uma maior temperatura ( $\Delta T$ ) são os que possuem uma menor umidade, já que a água, presente na amostra, sempre vai favorecer a dissipação do calor através do meio. A máxima tensão do sensor encontrada para as umidades testadas é mostrada no gráfico da Fig. 5.11.

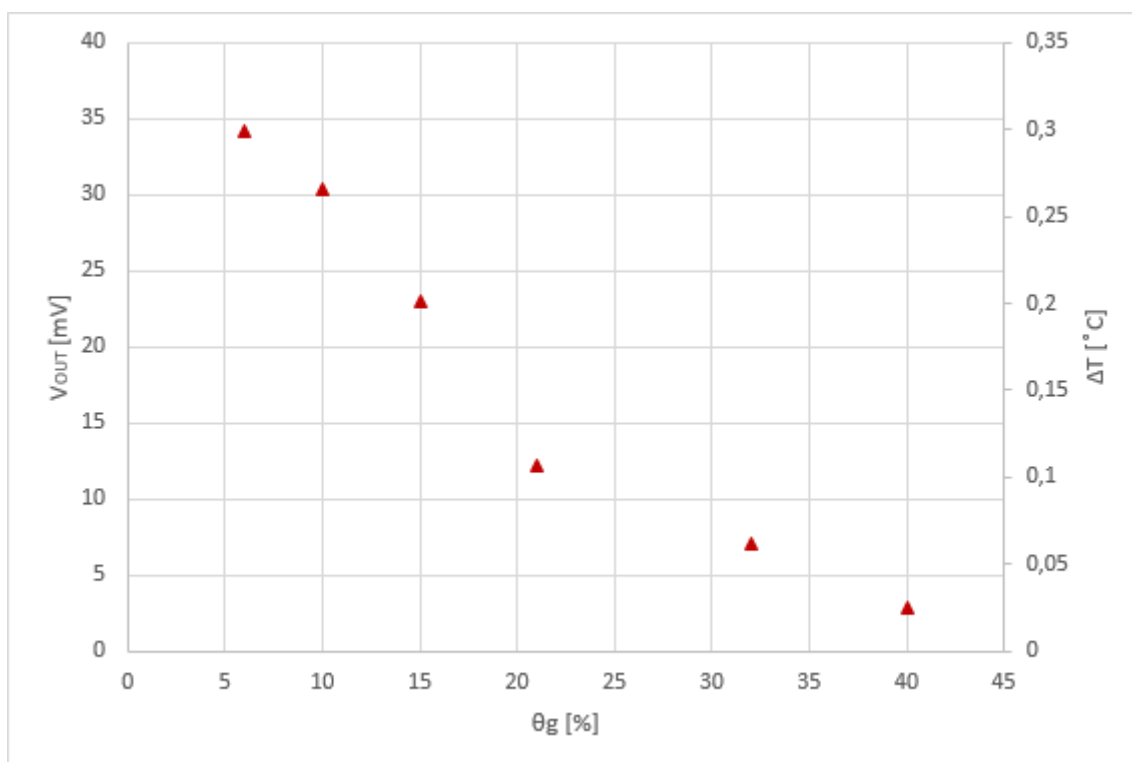
**Figura 5.11:** Resposta dos testes com a segunda ponteira BPHP de 6mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo



**Fonte:** Autoria própria

É importante salientar que o sensor encapsulado gera maior confiabilidade nos resultados, já que minimiza possíveis falhas ou problemas relacionados a defeitos do sensor, causados pela ação mecânica do solo com a ponteira. Dessa forma, o encapsulamento possibilita uma maior proteção aos elementos eletrônicos do sensor. O funcionamento da ponteira é semelhante ao uma ponteira sem encapsulamento, porém, o valor máximo na tensão é menor. Através do gráfico exposto na Fig. 5.12, pode-se notar que a máxima tensão que o sensor obteve foi de 34,19 mV, para uma umidade de 6%. Com uma umidade de 40% da amostra a tensão atingida foi de 2,83mV.

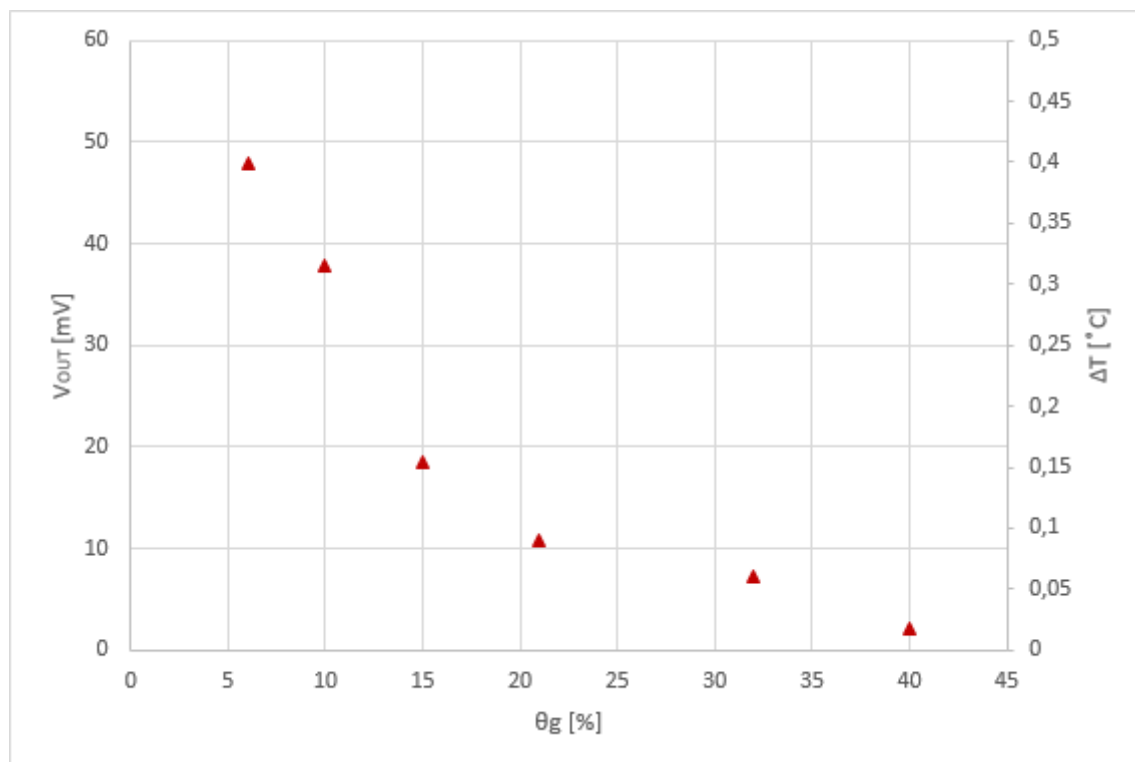
**Figura 5.12:** Respostas do sensor BPHP de 6mm com encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo



**Fonte:** Autoria própria

A curva de umidade obtidas através dos testes com a BPHP de 3 mm, pode ser observada na Fig. 5.13. Vale ressaltar que esta ponteira não foi encapsulada, mas que tal análise poderia avaliar melhor o seu funcionamento.

**Figura 5.13:** Respostas do sensor BPHP de 3mm sem encapsulamento (tensão e temperatura) em função da umidade do solo



**Fonte:** Autoria própria

## 6 Conclusão

---

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de estruturas geométricas inéditas baseadas na transferência de calor. Os sensores DPHP e BPHP realizados, foram distintos em suas características físicas, cujo parâmetro principal para sua distinção consistiu na distância entre os resistores termossensíveis e os resistores sensores.

Os testes realizados foram importantes para, primeiramente, a validação da distância entre os elementos sensor e aquecedor das ponteiras. A análise térmica permitiu a comprovação de que a distância de 6 mm é a mais ideal, se considerar uma baixa potência de ativação do pulso de calor. De fato, as ponteiras foram mais efetivas com esse distanciamento. Garantindo a melhor análise na ponteira BPHP de 6 mm. A avaliação da ponteira no solo permitiu a análise da umidade nele presente.

As estruturas das ponteiras foram desenvolvidas na placa de circuito impresso, e para as estruturas em botão, a construção foi na placa inteiriça, sem nenhum tipo de recorte para a separação dos elementos sensores e aquecedores, facilitando a elaboração das ponteiras e o encapsulamento epóxi. Anteriormente, pensava-se que tal fator prejudicaria a resposta e sensibilidade das ponteiras. Porém, o comportamento é parecido com o encontrado em outras pesquisas e obteve-se uma boa sensibilidade.

A variação da temperatura lida pelo sensor BPHP (ponteira botão) de 6 mm, para a faixa de umidade do solo seco a saturado, ou seja, a amostra sem a adição de água e com água, foi de aproximadamente  $1,038^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ . Essa sensibilidade se mostrou muito efetiva quando comparada a outros estudos, principalmente, em circuitos de baixa potência para o pulso de calor, que variam em alguns casos de  $0,0006^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$  a  $0,24^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$  (FRANÇA et al., 2015). Em circuito com uma maior potência, 26 J especificamente, essa sensibilidade chegou a  $4,68^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$  (KAMAI; KLUTENBERG; HOPMANS, 2009).

A sensibilidade da ponteira de 6 mm sem encapsulamento, nos testes desen-

volvidos com a amostra de 36,25 gramas, foi de  $1,010^{\circ} \text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , em comparação a ponteira encapsulada com epóxi teve uma sensibilidade de  $0,745^{\circ} \text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , por fim, a ponteira com distanciamento de 3 mm entre aquecimento e o elemento sensor, teve uma sensibilidade de  $1,087^{\circ} \text{C}/\text{m}^3\text{m}^{-3}$ . Embora a sensibilidade com a ponteira de menor distanciamento tenha se mostrado melhor, é necessário avaliá-la com o encapsulamento, somente assim, é possível verificar se os resultados apresentados realmente terão uma melhor sensibilidade e que essa estrutura seja a mais efetiva para essa abordagem e testes desenvolvidos.

## 6.1 Trabalhos Futuros

O estudo de sensores voltados a agricultura de precisão vem ganhando importância no mercado, já que o desenvolvimento tecnológico neste setor está em ascensão. Por esse motivo é necessário que os estudos sobre tal assunto busquem sempre a melhoria dos equipamentos. Visando, a uma melhor análise, um aspecto que pode ser futuramente abordado é a espessura do encapsulamento, pois, diferentes espessuras possivelmente afetem o comportamento dos sensores. O desenvolvimento de um estudo com a ponteira em botão de 3 mm de distanciamento encapsulada, pode trazer uma nova alternativa a tantas pesquisas realizadas, já que neste projeto ele mostrou-se ser viável e com uma resposta adequada.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Fatos e tendências*. [S.l.: s.n.], 2009. 95 p.
- ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R. da; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em latossolo amarelo na microrregião do litoral piauiense. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Universidade Federal Rural de Pernambuco, v. 2, n. 4, p. 303–307, 2007.
- BASINGER, J.; KLUITENBERG, G.; HAM, J.; FRANK, J.; BARNES, P.; KIRKHAM, M. Laboratory evaluation of the dual-probe heat-pulse method for measuring soil water content. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 2, n. 3, p. 389–399, 2003.
- BILSKIE, J.; HORTON, R.; BRISTOW, K. Test of a dual-probe heat-pulse method for determining thermal properties of porous materials<sup>1</sup>. *Soil science*, LWW, v. 163, n. 5, p. 346–355, 1998.
- BRISTOW, K. L. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and forest meteorology*, Elsevier, v. 89, n. 2, p. 75–84, 1998.
- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORFF, K. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society of America, v. 57, n. 4, p. 930–934, 1993.
- CAMPBELL, G.; CALISSENDORFF, C.; WILLIAMS, J. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal*, Wiley Online Library, v. 55, n. 1, p. 291–293, 1991.
- DIAS, P. *A novel high sensitivity single probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn bipolar junction transistor*. Tese (Doutorado) — Ph. D. dissertation, UNICAMP, 2012.
- DIAS, P. C.; ROQUE, W.; FERREIRA, E. C.; DIAS, J. A. S. *A high sensitivity single-probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor*. [S.l.]: Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier, 2013. 139-147 p.
- ERTHAL, E. S.; BERTICILLI, R. Sustentabilidade: Agricultura irrigada e seus impactos ambientais. *CIÊNCIA & TECNOLOGIA*, v. 2, n. 1, p. 64–74, 2018.
- FAO. *Dia Mundial da Água*. 2012. Disponível em: <<https://www.fao.org.br/DMApcqcn15mladFAO.asp> />. Acesso em: 10 jun. 2019.
- FRANÇA, M. B. d. M. et al. Contribuição ao estudo e fabricação de sensores de umidade do solo usando a técnica da transferência de calor. [sn], 2015.

FRANÇA, M. B. de M.; MORAIS, F. J.; CARVALHAES-DIAS, P.; DUARTE, L. C.; DIAS, J. A. S. A multiprobe heat pulse sensor for soil moisture measurement based on pcb technology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 68, n. 2, p. 606–613, 2018.

GUIMARÃES, C. M.; COSTA, C. A. G.; CARNEIRO, L. F.; ASSUNÇÃO, H. F. d. Resposta do sensor tdr à umidade sob diferentes manejos de um latossolo típico do cerrado. *Revista Ciência Agronômica*, SciELO Brasil, v. 50, n. 1, p. 1–7, 2019.

HEITMAN, J.; BASINGER, J.; KLUITENBERG, G.; HAM, J.; FRANK, J.; BARNES, P. Field evaluation of the dual-probe heat-pulse method for measuring soil water content. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 2, n. 4, p. 552–560, 2003.

JAEGER, J. C.; CARSLAW, H. S. *Conduction of heat in solids*. [S.l.]: Clarendon P, 1959.

KAMAI, T.; KLUITENBERG, G. J.; HOPMANS, J. W. Design and numerical analysis of a button heat pulse probe for soil water content measurement. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society of America, v. 8, n. 1, p. 167–173, 2009.

KAMAI, T.; KLUITENBERG, G. J.; HOPMANS, J. W. A dual-probe heat-pulse sensor with rigid probes for improved soil water content measurement. *Soil Science Society of America Journal*, The Soil Science Society of America, Inc., v. 79, n. 4, p. 1059–1072, 2015.

KLUITENBERG, G.; BRISTOW, K. L.; DAS, B. Error analysis of heat pulse method for measuring soil heat capacity, diffusivity, and conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Wiley Online Library, v. 59, n. 3, p. 719–726, 1995.

KLUITENBERG, G. J.; HEITMAN, J. L. Effect of forced convection on soil water content measurement with the dual-probe heat-pulse method. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, v. 129, p. 275–283, 2002.

KLUITENBERG, G. J.; KAMAI, T.; VRUGT, J. A.; HOPMANS, J. W. Effect of probe deflection on dual-probe heat-pulse thermal conductivity measurements. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society, v. 74, n. 5, p. 1537–1540, 2010.

KNIGHT, J. H.; JIN, W.; KLUITENBERG, G. J. Sensitivity of the dual-probe heat-pulse method to spatial variations in heat capacity and water content. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 6, n. 4, p. 746–758, 2007.

LIMA, J. E. F. W. Recursos hídricos no brasil e no mundo. *Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)*, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001., 2001.

LIU, G.; LI, B.; REN, T.; HORTON, R.; SI, B. C. Analytical solution of heat pulse method in a parallelepiped sample space with inclined needles. 2008.

LOW, J.; LOVERIDGE, F. A.; POWRIE, W. Thermal conductivity of soils by the needle probe method, for energy foundation applications. *Soil Physics and Hydrology- Soil Science Society of America Journal*, v. 32nd International Thermal Conductivity Conference, p. 14, 2014.

- MARTÍ, P.; GASQUE, M.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. An artificial neural network approach to the estimation of stem water potential from frequency domain reflectometry soil moisture measurements and meteorological data. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 91, p. 75–86, 2013.
- MIZUGUCHI, J.; PIAI, J. C.; FRANÇA, J. A. de; MORAIS, M. B. de. Sensor pente capacitivo aplicado a determinação da umidade do solo. 2015.
- MORI, Y.; HOPMANS, J.; MORTENSEN, A.; KLUITENBERG, G. Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 2, n. 4, p. 561–571, 2003.
- NUSIER, O.; ABU-HAMDEH, N. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils. *Heat and mass transfer*, Springer, v. 39, n. 2, p. 119–123, 2003.
- OCHSNER, T. E.; BAKER, J. M. In situ monitoring of soil thermal properties and heat flux during freezing and thawing. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society, v. 72, n. 4, p. 1025–1032, 2008.
- OCHSNER, T. E.; HORTON, R.; REN, T. Simultaneous water content, air-filled porosity, and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society, v. 65, n. 6, p. 1618–1622, 2001.
- OCHSNER, T. E.; HORTON, R.; REN, T. Use of the dual-probe heat-pulse technique to monitor soil water content in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 2, n. 4, p. 572–579, 2003.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Dia Mundial da Água*. 2018. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/home>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. *Irriga*, v. 22, n. 3, p. 458–468, 2017.
- RADULOVICH, R. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía costarricense*, v. 33, p. 121–124, 2009.
- ROSA JUNIOR et al. Resposta elétrica de um sensor infravermelho ao fluxo de fertilizantes agrícolas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.
- SIGAKI, J. C.; COSTA, L. O.; SANTOS, V. S.; REBUSTINI, M. E. A influência da sequência pedagógica água e suas propriedades na aprendizagem do ensino fundamental. *Revista Ensin@UFMS*, v. 1, n. 1, 2016.
- SILVA JUNIOR, J. C. Desenvolvimento de sondas de calor com transistor bipolar para detecção de umidade em matrizes porosas. Universidade Estadual de Londrina, 2018.
- SIRVINSKAS, L. P. *Manual de direito ambiental*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2020.

- SOARES, F. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; PARIZI, A. R. C.; RAMÃO, C. J.; VIVAN, G. A. Resposta da produtividade de híbridos de milho cultivado em diferentes estratégias de irrigação. *Irriga*, v. 15, n. 1, p. 36–50, 2010.
- SOMERTON, W. H.; MOSSAHEBI, M. Ring heat source probe for rapid determination of thermal conductivity of rocks. *Review of Scientific Instruments*, American Institute of Physics, v. 38, n. 10, p. 1368–1371, 1967.
- SONG, Y.; HAM, J.; KIRKHAM, M.; KLUITENBERG, G. Measuring soil water content under turfgrass using the dual-probe heat-pulse technique. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, American Society for Horticultural Science, v. 123, n. 5, p. 937–941, 1998.
- SORIANO, É.; LONDE, L. D. R.; GREGORIO, L. T. D.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. Crise hídrica em são paulo sob o ponto de vista dos desastres. *Ambiente & Sociedade*, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, v. 19, n. 1, p. 21–42, 2016.
- TOMINAGA, T.; CÁSSARO, F.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.; OLIVEIRA, J.; TIMM, L. On the use of surface neutron-gamma gauges to estimate soil water content. *Applied radiation and isotopes*, Elsevier, v. 57, n. 3, p. 369–374, 2002.
- VALENTE, A.; MORAIS, R.; CORREIA, J.; COUTO, C. A multi-chip-nodule micro-system for soil moisture measurements. 2003.
- VALENTE, A.; MORAIS, R.; TULI, A.; HOPMANS, J.; KLUITENBERG, G. Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties, water content, and electrical conductivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 132, n. 1, p. 70–77, 2006.
- VALENTE, A.; SOARES, S.; MORAIS, R.; BAPTISTA, J. M.; CABRAL, M. Button heat-pulse sensor for soil water content measurements. In: IEEE. *2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*. [S.l.], 2010. p. 180–182.
- WELCH, S.; KLUITENBERG, G.; BRISTOW, K. L. Rapid numerical estimation of soil thermal properties for a broad class of heat-pulse emitter geometries. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 7, n. 6, p. 932, 1996.

## **Anexo A - Datasheets**

## MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1 Mixed-Signal Microcontrollers

### 1 Device Overview

#### 1.1 Features

- Low Supply Voltage Range: 1.8 V to 3.6 V
- Ultra-Low Power Consumption
  - Active Mode: 220  $\mu$ A at 1 MHz, 2.2 V
  - Standby Mode: 0.5  $\mu$ A
  - Off Mode (RAM Retention): 0.1  $\mu$ A
- Five Power-Saving Modes
- Ultra-Fast Wake-up From Standby Mode in Less Than 1  $\mu$ s
- 16-Bit RISC Architecture, up to 12-MHz System Clock
- Basic Clock Module Configurations
  - Internal Frequencies up to 12 MHz With Two Calibrated Frequencies
  - Internal Very-Low-Power Low-Frequency (LF) Oscillator
  - High-Frequency (HF) Crystal up to 16 MHz
  - Resonator
  - External Digital Clock Source
- Up to Three 24-Bit Sigma-Delta Analog-to-Digital Converters (ADCs) With Differential PGA Inputs
- 16-Bit Timer\_A With Three Capture/Compare Registers
- Serial Communication Interface (USART), Asynchronous UART or Synchronous SPI Selectable by Software
- 16-Bit Hardware Multiplier
- Brownout Detector
- Supply Voltage Supervisor and Monitor With Programmable Level Detection
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed Programmable Code Protection by Security Fuse
- On-Chip Emulation Module
- [Device Comparison](#) Summarizes the Available Family Members
- For Complete Module Descriptions, See the [MSP430x2xx Family User's Guide](#)

#### 1.2 Applications

- Single-Phase Electricity Meters
- Digital Power Monitoring
- Sensor Applications

#### 1.3 Description

The TI MSP family of ultra-low-power microcontrollers consists of several devices featuring different sets of peripherals targeted for various applications. The architecture, combined with five low-power modes, is optimized to achieve extended battery life in portable measurement applications. The device features a powerful 16-bit RISC CPU, 16-bit registers, and constant generators that contribute to maximum code efficiency. The digitally controlled oscillator (DCO) allows the device to wake up from low-power modes to active mode in less than 1  $\mu$ s.

The MSP430AFE2x3 devices are ultra-low-power mixed signal microcontrollers integrating three independent 24-bit sigma-delta ADCs, one 16-bit timer, one 16-bit hardware multiplier, USART communication interface, watchdog timer, and 11 I/O pins.

The MSP430AFE2x2 devices are identical to the MSP430AFE2x3, except that there are only two 24-bit sigma-delta ADCs integrated.

The MSP430AFE2x1 devices are identical to the MSP430AFE2x3, except that there is only one 24-bit sigma-delta ADC integrated.

**Device Information<sup>(1)</sup>**

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE
MSP430AFE253IPW	TSSOP (24)	7.8 mm x 4.4 mm

(1) For more information, see [Section 8, Mechanical Packaging and Orderable Information](#).



### 1.4 Functional Block Diagram

Figure 1-1 shows the functional block diagram.

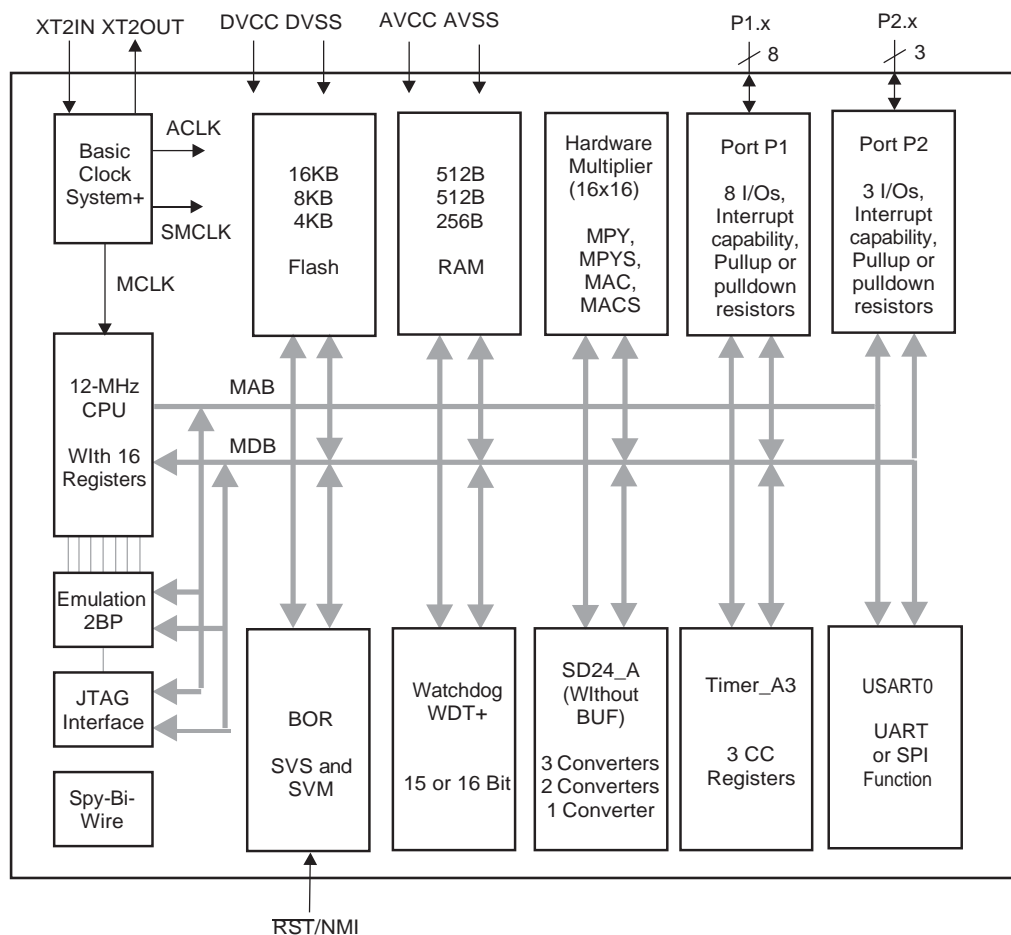


Figure 1-1. Functional Block Diagram



## LT6003/LT6004/LT6005

### 1.6V, 1 $\mu$ A Precision Rail-to-Rail Input and Output Op Amps

## FEATURES

- ▀ **Wide Supply Range: 1.6V to 16V**
- ▀ **Low Supply Current: 1 $\mu$ A/Amplifier Max**
- ▀ **Low Input Bias Current: 90pA Max**
- ▀ Low Input Offset Voltage: 500 $\mu$ V Max
- ▀ Low Input Offset Voltage Drift: 2 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
- ▀ CMRR: 100dB
- ▀ PSRR: 95dB
- ▀  $A_{VOL}$  Driving 20k $\Omega$  Load: 100,000 Min
- ▀ Capacitive Load Handling: 500pF
- ▀ Specified from  $-40^{\circ}$ C to 125 $^{\circ}$ C
- ▀ Available in Tiny 2mm  $\times$  2mm DFN and Low Profile (1mm) ThinSOT<sup>TM</sup> Packages

## APPLICATIONS

- ▀ Portable Gas Monitors
- ▀ Battery- or Solar-Powered Systems
- ▀ Low Voltage Signal Processing
- ▀ Micropower Active Filters

## DESCRIPTION

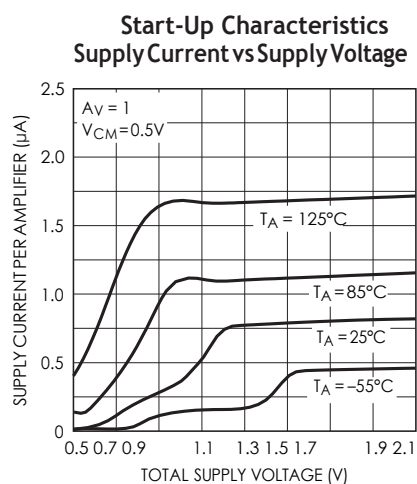
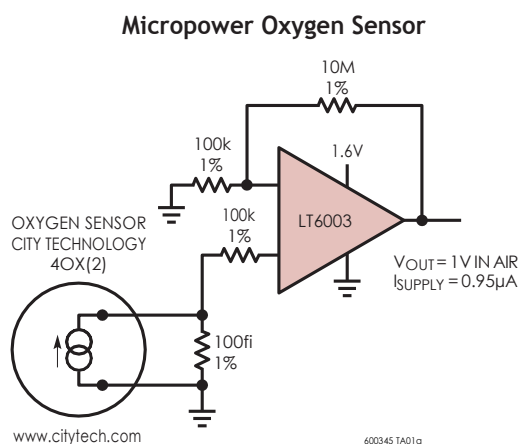
The LT<sup>®</sup>6003/LT6004/LT6005 are single/dual/quad op amps designed to maximize battery life and performance for portable applications. These amplifiers operate on supplies as low as 1.6V and are fully specified and guaranteed over temperature on 1.8V, 5V and  $\pm$ 8V supplies while only drawing 1 $\mu$ A maximum quiescent current.

The ultralow supply current and low operating voltage are combined with excellent amplifier specifications; input offset voltage of 500 $\mu$ V maximum with a typical drift of only 2 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C, input bias current of 90pA maximum, open loop gain of 100,000 and the ability to drive 500pF capacitive loads, making the LT6003/LT6004/LT6005 amplifiers ideal when excellent performance is required in battery powered applications.

The single LT6003 is available in the 5-pin TSOT-23 and tiny 2mm  $\times$  2mm DFN packages. The dual LT6004 is available in the 8-pin MSOP and 3mm  $\times$  3mm DFN packages. The quad LT6005 is available in the 16-pin SSOP and 5mm  $\times$  3mm DFN packages. These devices are specified over the commercial, industrial and automotive temperature ranges.

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. ThinSOT is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

## TYPICAL APPLICATION







# INA133 INA2133

For most current data sheet and other product information, visit [www.burr-brown.com](http://www.burr-brown.com)

## High-Speed, Precision DIFFERENCE AMPLIFIERS

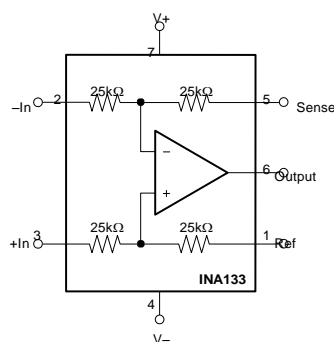
### FEATURES

- DESIGNED FOR LOW COST
- SINGLE, DUAL VERSIONS
- LOW OFFSET VOLTAGE DRIFT:  $\pm 450\mu\text{V}$  max,  $\pm 5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  max
- LOW GAIN ERROR: 0.05% max
- WIDE BANDWIDTH: 1.5MHz
- HIGH SLEW RATE:  $5\text{V}/\mu\text{s}$
- FAST SETTLING TIME:  $5.5\mu\text{s}$  to 0.01%
- LOW QUIESCENT CURRENT:  $950\mu\text{A}$
- WIDE SUPPLY RANGE:  $\pm 2.25\text{V}$  to  $\pm 18\text{V}$
- SO-8 and SO-14 PACKAGES

### DESCRIPTION

The INA133 and INA2133 are high slew rate, unity-gain difference amplifiers consisting of a precision op amp with a precision resistor network. The on-chip

are laser trimmed for accurate gain and high rejection. Excellent TCR tracking of the accuracy and common-mode rejection over temperature. They operate over a wide supply range,  $\pm 2.25\text{V}$  to  $\pm 18\text{V}$  ( $+4.5\text{V}$  to  $+36\text{V}$  single supply), and input common-mode voltage range extends beyond the positive and negative supply rails.

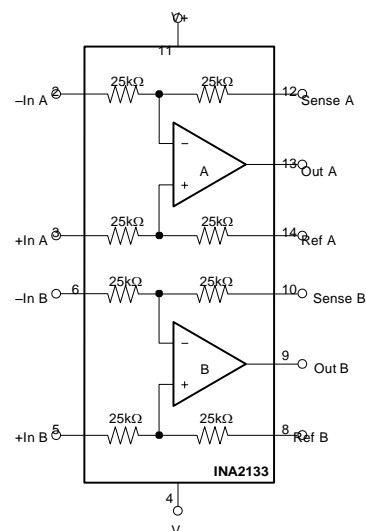


### APPLICATIONS

- DIFFERENTIAL INPUT AMPLIFIER BUILDING BLOCK
- DIFF IN / DIFF OUT AMPLIFIER
- UNITY-GAIN INVERTING AMPLIFIER
- GAIN = +1/2 OR G = +2 AMPLIFIER
- SUMMING AMPLIFIER
- SYNCHRONOUS DEMODULATOR
- CURRENT/DIFFERENTIAL LINE RECEIVER
- VOLTAGE-CONTROLLED CURRENT SOURCE
- BATTERY POWERED SYSTEMS
- LOW COST AUTOMOTIVE

The differential amplifier is the foundation of many commonly used circuits. The low cost INA133 and INA2133 provide this precision circuit function without using an expensive precision network.

The single version, INA133, package is the SO-8 surface mount. The dual version, INA2133, package is the SO-14 surface mount. Both are specified for operation over the extended industrial temperature range,  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ . Operation is from  $-55^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$ .



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111  
Twx: 910-952-1111 • Internet: <http://www.burr-brown.com/> • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132



LTC1043

## Dual Precision Instrumentation Switched Capacitor Building Block

### FEATURES

- Instrumentation Front End with 120dB CMRR
- Precise, Charge-Balanced Switching
- Operates from 3V to 18V
- Internal or External Clock
- Operates up to 5MHz Clock Rate
- Low Power
- Two Independent Sections with One Clock

### APPLICATIONS

- Precision Instrumentation Amplifiers
- Ultra Precision Voltage Inverters, Multipliers and Dividers
- V–F and F–V Converters
- Sample-and-Hold
- Switched Capacitor Filters

### DESCRIPTION

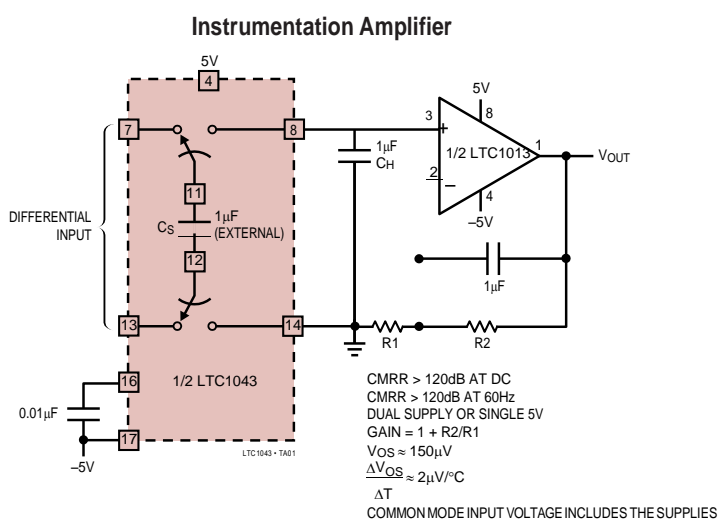
The LTC<sup>®</sup>1043 is a monolithic, charge-balanced, dual switched capacitor instrumentation building block. A pair of switches alternately connects an external capacitor to an input voltage and then connects the charged capacitor across an output port. The internal switches have a break-before-make action. An internal clock is provided and its frequency can be adjusted with an external capacitor. The LTC1043 can also be driven with an external CMOS clock.

The LTC1043, when used with low clock frequencies, provides ultra precision DC functions without requiring precise external components. Such functions are differential voltage to single-ended conversion, voltage inversion, voltage multiplication and division by 2, 3, 4, 5, etc. The LTC1043 can also be used for precise V–F and F–V circuits without trimming, and it is also a building block for switched capacitor filters, oscillators and modulators.

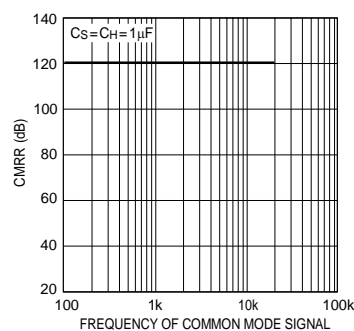
The LTC1043 is manufactured using Linear Technology's enhanced LTCMOS<sup>™</sup> silicon gate process.

LTC and LT are registered trademarks of Linear Technology Corporation. LTCMOS is a trademark of Linear Technology Corporation.

### TYPICAL APPLICATION



### CMRR vs Frequency



1043fa

## REF200 Dual Current Source and Current Sink

### 1 Features

- Completely floating: no power supply or ground connections
- High accuracy:  $100\ \mu\text{A} \pm 0.5\%$
- Low temperature coefficient:  $\pm 25\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$
- Wide voltage compliance: 2.5 V to 40 V
- Includes current mirror

### 2 Applications

- [Sensor excitation](#)
- [Biasing circuitry](#)
- [Offsetting current loops](#)
- [Low voltage references](#)
- [Charge-pump circuitry](#)
- [Hybrid microcircuits](#)

### 3 Description

The REF200 combines three circuit building-blocks on a single monolithic chip: two  $100\text{-}\mu\text{A}$  current sources and a current mirror. The sections are dielectrically isolated, making them completely independent. Also, because the current sources are two-terminal devices, they can be used equally well as current sinks. The performance of each section is individually measured and laser-trimmed to achieve high accuracy at low cost.

The sections can be pin-strapped for currents of 50  $\mu\text{A}$ , 100  $\mu\text{A}$ , 200  $\mu\text{A}$ , 300  $\mu\text{A}$ , or 400  $\mu\text{A}$ . External circuitry can obtain virtually any current. These and many other circuit techniques are shown in the [Application Information](#) section of this data sheet.

The REF200 is available in an SOIC package.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
REF200	SOIC (8)	3.91 mm x 4.90 mm

(1) For all available packages, see the package addendum at the end of the data sheet.

#### Functional Block Diagram

