

### UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

### MARIA BERNADETE DE MORAIS FRANÇA

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E FABRICAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO USANDO A TÉCNICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

CAMPINAS 2015

### MARIA BERNADETE DE MORAIS FRANÇA

### CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E FABRICAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO USANDO A TÉCNICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica, na Área de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA MARIA BER-NADETE DE MORAIS FRANÇA E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOSÉ ANTONIO SIQUEIRA DIAS.

> CAMPINAS 2015

Agência de fomento: Não se aplica Nº processo: Não se aplica

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F844c	França, Maria Bernadete de Morais, 1970- Contribuição ao estudo e fabricação de sensores de umidade do solo usando a técnica da transferência de calor / Maria Bernadete de Morais Franca. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.
	Orientador: José Antonio Siqueira Dias. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	1. Detectores. 2. Agricultura de precisão. 3. Solos - Umidade. 4. Irrigação. I. Dias, José Antonio Siqueira,1954 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Contribution to the study and manufacturing of soil moisture using the heat transfer technique Palavras-chave em inglês: Detectors Precision agriculture Soil - Moisture Irrigation Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica Titulação: Doutora em Engenharia Elétrica Banca examinadora: José Antonio Siqueira Dias [Orientador] Saulo Finco Rogério Lara Leite Elnatan Chagas Ferreira Túlio Assunção Pires Ferreira Data de defesa: 31-07-2015 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Maria Bernadete de Morais França

Data da Defesa: 31 de julho de 2015

Título da Tese: "Contribuição ao Estudo e Fabricação de Sensores de Umidade do Solo Usando a Técnica da Transferência de Calor"

1,05.
Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):
Dr. Saulo Finco: $5-61-40$
Prof. Dr. Rogério Lara Leite:
Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:
Prof. Dr. Túlio Assunção Pires Ribeiro. Julio Asturio fun kijum

 $\hat{A}$  Deus, ao meu filho Tiago, a meus familiares e amigos que sempre estiveram presentes na minha vida.

# Agradecimentos

Ao meu professor e orientador José Antonio Siqueira Dias, que sempre demonstrou apoio e interesse em todas as etapas do meu trabalho. Pelo acolhimento sempre muito atencioso, carinhoso e humano em todos os meus dias na Unicamp. Por ter me dado a oportunidade de trabalhar e conhecer uma equipe de pessoas que se tornaram meus grandes amigos ao longo de 3 anos, e com certeza por muitos mais tempo pela frente.

Aos demais professores do departamento que tive o prazer de conhecer e trabalhar. Ao querido amigo e irmão Flávio José de Oliveira Morais, pelo apoio técnico, pessoal e acima de tudo incondicional, em todos os meus momentos. Aos amigos Alex Dante, Anderson Spengler, Davi Sabbag Roveri, Felipe Pfrimer, Luis Duarte, Wellington Roque, Pedro Dias, Reinaldo "Gianechini", Rodrigo Bacurau e Sérgio do Vale e demais colegas do departamento, meus "brothers", por tudo.

Ao querido amigo Luis Carlos Kakimoto, que abriu sua casa para me instalar durante todo o tempo que estive em Campinas.

À CPG pelo apoio e colaboração em todo o meu trajeto no doutorado.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, pelo apoio e suporte na minha liberação para a realização dessa tese.

Aos meus amados familiares e demais amigos que fazem da minha vida uma maravilhosa dádiva e, principalmente à Deus, por ter me dado tudo o que tenho e sou.

"Vem, vamos embora, que esperar não é saber. Quem sabe faz a hora, não espera acontecer." Geraldo Vandré, "Pra não dizer que não falei das flores", 1968

## Resumo

Conhecer a umidade do solo é importante para várias áreas como agronomia, geociências e construção civil. Para tanto, vários sensores foram desenvolvidos ao longo do tempo, baseados em diferentes técnicas, dentre elas, por transferência de calor. Esse princípio é utilizado nos sensores do tipo ponteira simples (Single Heat Pulse Probe - SHPP), ponteira dupla (Dual Heat Pulse Probe - DHPP) e ponteira múltipla (Multi Heat Pulse Probe - MHPP). Para solucionar o problema do erro devido à deflexão das hastes do DHPP, a literatura apresenta o ponteira em botão (Button Heat Pulse Probe - BHPP). Neste trabalho, são apresentados estruturas inéditas de sensores dos tipos ponteira simples e botão. Todas as estruturas foram implementadas com o objetivo de serem usadas com sistemas de instrumentação de baixo consumo, com alimentação proveniente de sistema de colheita de energia, e envio de dados remotos. Com relação a sensibilidade, dentro da faixa mais linear envolvendo os estados do solo seco ao saturado, obteve-se nos sensores de ponteira simples aproximadamente 5,7 °C /  $m^3 \cdot m^{-3}$  e 9,37 °C /  $m^3 \cdot m^{-3}$ ; e nos sensores a botão 0,6  $\times 10^{-3}$  °C / m³·m^-³, 0,14 °C / m³·m^-³ e 0,24 °C / m³·m^-³. Os resultados validam a técnica e os sensores mostram-se promissores para projetos futuros de sistemas de irrigação baseados em medidas da umidade do solo, porém precisam ser calibrados para uso em campo. Para trabalhos futuros, pretende-se investigar novas geometrias e estruturas utilizando os mesmos materiais e, ainda diminuir mais o consumo do sensor para poupança de energia do seu sistema de alimentação.

Palavras-chave: Detectores, Agricultura de precisão, Solos-Umidade, Irrigação.

# Abstract

Knowing the soil moisture is important for several areas such as agronomy, geosciences and civil construction. For this purpose, various sensors have been developed over time, based on different techniques, among which heat dissipation. This principle is used in sensors type Single Heat Pulse Probe (SHPP), Dual Heat Pulse Probe (DHPP) and Multi Heat Pulse Probe (MHPP). To solve the problem of error due to deflection of DHPP probes, the literature presents the Button Heat Pulse Probe (BHPP). In this paper, novel structures of single and button probe sensors are presented. All structures were implemented with the objective of being used with low-power instrumentation systems with power supply from energy harvesting, with sending remote data. With respect to sensitivity, within the more linear range involving the dry to wet soil, was obtained in simple probe sensors approximately 5.7 °C /  $m^3 \cdot m^{-3}$  and 9.37 °C /  $m^3 \cdot m^{-3}$ ; and button sensors 0.6  $\times 10^{-3}$  °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, 0.14 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup> and 0.24 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>. The results validate the technique and sensors show promise for future irrigation systems projects based on moisture soil measurements, but need to be calibrated for field use. For future work, we intend to investigate new geometries and structures using the same materials and also decrease more consumption sensor for power saving of the energy system.

Keywords: Detectors, Precision agriculture, Soil - Moisture, Irrigation.

# Lista de Figuras

2.1	Esquema básico de um sensor de ponteira dupla	18
2.2	Fotografias da ponteira em botão (BHPP), mostrando: (a) o elemento aque-	
	cedor, (b) o corpo de resina plástica com o orifício central para ser inserido	
	o elemento sensor e $(c)$ o sensor completo BHPP encapsulado. $\hfill \hfill $	20
2.3	Sensor de umidade do solo do tipo ponteira múltipla	21
2.4	Sensor de umidade do solo TMAS	21
3.1	Circuito de uma ponte de Wheatstone	24
3.2	(a) Layout da PCB. (b) Foto do sensor sem encapsulamento. (c) Foto de	
	dois sensores encapsulados com epóxi	25
3.3	Diagrama do sistema de medição da variação da tensão do sensor Ponte	
	Completa	26
3.4	Circuito de polarização do sensor Ponte Completa e amplificação da sua	
	tensão	27
3.5	Variação da tensão da ponte que corresponde à variação da tensão no sensor.	29
3.6	Variação da tensão da ponte ao final de 60 s, em função da umidade do solo.	29
3.7	Variação da temperatura na amostra de solo em 60 s, em função da umidade	
	do solo	30
3.8	(a) Foto do sensor sem encapsulamento. (b) Foto de dois sensores encap-	
	sulados com epóxi.	31
3.9	Diagrama do sistema desenvolvido para os ensaios do sensor Meia Ponte. $\ .$	32
3.10	Esquemático do interrogador do sensor de autoaquecimento em Meia Ponte.	32
3.11	Resposta do sensor Meia Ponte para valores diferentes de umidade do solo.	33
3.12	Resultados da variação da ponte no tempo de 60 s em função das umidades	
	dos solos testados.	34
3.13	Resultados da variação de temperatura no solo, no tempo de 60 s em função	
	do teor de umidade da amostra	34

4.1	Fotos da estrutura BHP1 com aquecedor na periferia e sensor no centro,	
	sem e com encapsulamento epoxi	37
4.2	Diagrama do sistema completo do sensor BHP1	38
4.3	Circuito do gerador de pulso de calor no sensor BHP1	39
4.4	Circuito da referência de tensão e amplificação da tensão da ponte do sensor	
	BHP1	40
4.5	Variação da tensão da ponte no sensor BHP1 em função do tempo	41
4.6	Variação da tensão da ponte do sensor BHP1 em função do teor de umidade	
	do solo	42
4.7	Variação da temperatura no solo medida pelo sensor BHP1 em função do	
	teor de umidade do solo.	43
4.8	Layout da placa do sensor BHPP com aquecedor na periferia e sensor no	
	centro (BHP2) e fotos da estrutura sem e com encapsulamento epoxi. $\ldots$ .	43
4.9	Diagrama do sistema de medição da tensão do sensor BHP2	44
4.10	Circuito responsável pela alimentação do sistema	46
4.11	Circuito do amostrador da tensão inicial do sensor BHP2 e circuito gerador	
	do pulso de calor aplicado no aquecedor	46
4.12	Circuito do processo de medida e amplificação da tensão do sensor BHP2	48
4.13	Polarização por divisor de tensão	50
4.14	Variação da tensão do sensor BHP2 no tempo, polarizado com tensão	51
4.15	Variação da tensão do sensor BHP2 polarizado com tensão em função de	
	umidades do solo	51
4.16	Variação da temperatura do solo medida pelo sensor BHP2 polarizado com	
	tensão em função das umidades do solo. $\ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $	52
4.17	Polarização por fonte de corrente	53
4.18	Circuito do interrogador do sensor com polarização em corrente	53
4.19	Variação da tensão de saída do interrogador do BHP2 no tempo, polarizado	
	com corrente para umidades do solo diferentes	54
4.20	Variação da tensão do sensor BHP2 polarizado com corrente para umidades	
	do solo diferentes	54
4.21	Variação da temperatura do solo medida pelo sensor BHP2 polarizado com	
	corrente em função das umidades do solo	55

# Sumário

1	Introdução			
<b>2</b>	Sen	sores a	le Umidade do Solo	17
	2.1	Introd	ução	17
	2.2	Sensor	res à transferência de calor	17
		2.2.1	Ponteira dupla	18
		2.2.2	Ponteira múltipla	20
		2.2.3	Ponteira simples	21
3	Nov	vos Ser	nsores de Ponteira Simples	23
	3.1	Introd	ução	23
	3.2	Sensor	r de ponteira simples Ponte Completa	23
		3.2.1	Implementação e funcionamento do sensor $\ . \ . \ . \ . \ . \ . \ .$	23
		3.2.2	Interrogador	25
		3.2.3	Coleta e envio dos dados	27
		3.2.4	Ensaios e Resultados	28
	3.3	Sensor	de autoaquecimento em Meia Ponte	30
		3.3.1	Implementação e funcionamento do sensor $\hdots$	30
		3.3.2	O interrogador e a coleta/envio dos dados $\hdots$	31
		3.3.3	Resultados	33
	3.4	Conclu	usões	34
4	Nov	vos Ser	nsores de Ponteira Dupla	36
	4.1	Introd	ução	36
	4.2	Prime	ira estrutura - BHP1	36
		4.2.1	Placa do sensor	36
		4.2.2	Interrogador do sensor BHP1 $\ldots$	38
		4.2.3	Resultados	40
4.3 Segunda estrutura - BHP2				42

	4.3.1	Placa do sensor	42
	4.3.2	Sistema de Medição	43
	4.3.3	Polarização do Sensor com Tensão	49
	4.3.4	Polarização do Sensor com Corrente	51
4.4	Conclu	1sões	55
5 Coi	nclusõe	s e Trabalhos Futuros	57
Biblio	grafia		59

# Capítulo 1

# Introdução

A questão hídrica no Brasil nunca foi motivo de tanta preocupação como nos últimos A anos, principalmente nos anos de 2014 e 2015. A seca que antes atingia principalmente a região do Nordeste, acostumada a falta d'água há séculos, chegou a região Sudeste a mais rica do país. E toda cadeia produtiva é diretamente afetada pela falta de água, já que esse é um recurso usado em praticamente todas as indústrias, agricultura e pecuária.

A agricultura, como praticada hoje na maior parte do mundo, é insustentável e apodera-se de 92% da água doce do planeta, segundo estudos apresentados na revista científica PNAS [1]. Um dos pesquisadores deste trabalho é o criador do conceito "pegada hídrica ", que refere-se à quantidade de água usada em toda uma cadeia produtiva. O Brasil é, hoje, o quarto país com maior consumo deste recurso, e o quarto entre aqueles que exportam mais bens cuja produção requer grande volume de água, como os primários. Outro dado preocupante é que quase 50% dessa água usada na agricultura é desperdiçada, segundo o levantamento de 2012 do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento do Ministério das Cidades.

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, lançado em março de 2012, estimou que o mundo necessita de 70% a mais de alimentos até 2050. Este aumento poderá refletir em um incremento de 19% na água utilizada pelo setor agrícola. Isso porque a previsão é de que a população mundial possa dobrar até metade do século.

Um manejo de irrigação mais eficiente, no sentido da aplicação de água somente quando o solo atingir um limiar de umidade, ou seja, um gerenciamento eficiente de sistemas de irrigação, requer a implementação de técnicas de agricultura de precisão. A agricultura de precisão surgiu no início dos anos 80 nos Estados Unidos da América, quando a entrada de fertilizantes nos campos de lavoura foi variada e a coleta de dados foi monitorada. Dessa forma, obtiveram uma relação ótima da quantidade de fertilizante a ser aplicado em cada região [2].

De forma mais abrangente e praticamente unânime, a agricultura de precisão hoje, é definida como sendo uma prática agrícola na qual utiliza-se tecnologia de informação baseada no princípio da variabilidade do solo e clima, geralmente a Geoestatística, que é a análise de dados de amostras georreferenciadas.

Um dos itens essenciais na caracterização do solo é sua umidade. Seu conceito está ligado a relação entre a massa de água presente em um determinado volume e a massa de partículas sólidas no mesmo volume. Esta característica do solo é de vital importância na agricultura, por exemplo, quando é preciso saber se há necessidade de irrigação em uma plantação. O processo de irrigação tem causado danos ao solo com o decorrer do tempo, afetando inclusive a produtividade. Portanto, deve ser controlado, garantindo que somente a quantidade necessária de água seja aplicada [3]. Para isto, é necessário que a umidade do solo seja medida e monitorada no controle do processo de irrigação.

Segundo estudos de 2001 [4], da área irrigada no Brasil, 50 % é por inundação, 21 % por pivô central, 9 % por carretel enrolador, 14 % por aspersão convencional e 6 % com irrigação localizada. Os sistemas de irrigação por aspersão aplicam água sobre a superfície do solo, na forma de chuva artificial. Neste sistema de irrigação obtém-se elevada uniformidade de distribuição de água, com fácil controle do volume de água aplicada, talvez por isso ele seja bastante utilizado. Em tempos que a escassez de água de boa qualidade é uma realidade mundial, torna-se importante os estudos e desenvolvimentos de sistemas de irrigação automatizados, visando uma maior eficiência e racionalização no uso da água.

Portanto, é importante que novas tecnologias sejam avaliadas e difundidas, visando dar suporte às necessidades de uma agricultura cada vez mais competitiva. Sabendo que a água é um dos principais fatores do desenvolvimento dos cultivos agrícolas, a irregularidade do regime pluviométrico, de algumas regiões, torna-se uma restrição ao desenvolvimento agrícola. Para tanto, o interesse em sensores de umidade do solo, que sejam principalmente de fácil manuseio e baratos, está crescendo cada vez mais. Prova disso é a gama de sensores disponíveis no mercado.

Um sensor para medição de umidade do solo, baseado na técnica de transferência de calor utilizando um único transistor de junção bipolar como elemento aquecedor e sensor foi apresentado em [5]. Nesse trabalho obteve-se resultados de sensibilidade maior que sensores comerciais a pulso de calor dos tipos simples e dupla ponteira, que serão apresentados no próximo capítulo.

Um projeto e análise numérica de um sensor do tipo BHPP (do inglês, Button Heat

*Pulse Probe*) também foi implementado com um termopar no centro de um anel metálico de aquecimento, encapsulado em resina plástica [6]. Nele foram apresentados resultados com o aquecedor dissipando uma potência de mais de 3 W. Esse valor de potência é alto para aplicações de baixo consumo, onde sistemas de colheita de energia são utilizados visando uma melhor autonomia e eficiência do sistema de monitoramento da umidade do solo.

O objetivo principal desse trabalho de tese foi projetar e implementar novas estruturas de sensores de umidade do solo, baseadas em circuitos convencionais da Engenharia Elétrica, aplicando a técnica de transferência de calor. Foram desenvolvidas quatro estruturas distintas. Em três delas, o aquecimento causado pela potência dissipada nos resistores, altera o valor de resistências de alto coeficiente térmico, causando o desbalanceamento de uma ponta de Wheatstone, cuja variação de tensão é medida e relacionada com a presença de água no meio presente no entorno do sensor. Na quarta estrutura, a variação do valor do resistor de alto coeficiente térmico, é medida em um divisor de tensão. Muitos ensaios com todos os sensores fabricados foram realizados em solos com diferentes situações de umidade, para validação dos mesmos.

O trabalho está organizado da seguinte forma. No capítulo 2, tem-se uma breve apresentação de alguns sensores conhecidos de umidade de solo e uma explanação mais abrangente dos sensores de umidade à transferência de calor. No capítulo 3, apresenta-se o estudo, projeto, implementação e resultados de dois novos sensores, aqui classificados como ponteira simples ou SHPP (do inglês *Single Heat Pulse Probe*). No capítulo 4, tem-se a apresentação de mais dois novos sensores implementados, também com resultados, sendo aqui classificados como ponteira dupla em botão ou BHPP (do inglês *Buttom Heat Pulse Probe*). Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões, contribuições e trabalhos futuros.

# Capítulo 2

# Sensores de Umidade do Solo

### 2.1 Introdução

Existem vários tipos de instrumentos de medição de umidade do solo para uso em Gerenciamento de sistemas de irrigação e em demais aplicações onde o conhecimento dessa grandeza é importante, como na geociências, engenharia civil e agronomia em geral. Utilizando-se dos mais diversos princípios, tais como: nuclear [7], eletromagnético [8], tensiométrico [9], transferência de calor [10], capacitivo [11], dentre outros. Dentre eles, o TDR (do inglês, *Time-Domain Reflectometry*) tem extensa aplicação tanto nas ciências naturais quanto na engenharia [12, 13]. São baseados na influência da umidade do solo sobre a propagação de ondas eletromagnéticas, são dependentes da textura do solo, temperatura e presença de sal, mas seu alto custo restringe sua aplicação. Pode-se citar ainda o sensor HEATER [14], o tensiômetro [15] e a sonda capacitiva ECH2O [16]. Existem também os sensores de umidade de solo baseados no princípio da transferência de calor. Nas seções a seguir são apresentados mais detalhes desse tipo de sensor.

### 2.2 Sensores à transferência de calor

O princípio de operação dos sensores de umidade à transferência de calor é baseado na variação da condutividade térmica de um material poroso em contato com o solo ou do próprio solo. Essa condutividade térmica é alterada pela quantidade de água absorvida pelo material e, consequentemente, sua propriedade de transferência de calor muda com essa quantidade de água. Aplicando uma quantidade de calor conhecida nas proximidades do sensor e medindo sua temperatura, que depende da condutividade térmica do meio, é possível relacionar a temperatura medida com a quantidade de água presente no solo.

Existem três tipos de sensores de umidade do solo à transferência de calor: o de

ponteira dupla (*Dual Heat Pulse Probe* - DHPP), o de ponteira múltipla, (*Multi Heat Pulse Probe* - MHPP) e ponteira simples (*Single Heat Pulse Probe* - SHPP). O modo de operação, assim como as vantagens e desvantagens de cada tipo foram bem apresentados em [5]. Existe ainda uma variação do primeiro tipo, que é o de ponteira em botão (*Button Heat Pulse Probe* - BHPP). A seguir, serão abordados as principais características de cada um desses sensores.

#### 2.2.1 Ponteira dupla

Os sensores de ponteira dupla, ou simplesmente DHPP, consistem em duas ponteiras, dispostas a uma distância fixa, r, geralmente de 6 mm, sendo que em uma delas é disposto o elemento responsável pelo aquecimento e na outra o sensor de temperatura. O aquecedor é, geralmente, obtido de um resistor de fio de NiCr e o sensor pode ser um termopar, um termistor ou um circuito integrado projetado para medir a temperatura. A Figura 2.1 apresenta um esquema básico de um sensor de ponteira dupla, apresentado em [5].



Figura 2.1: Esquema básico de um sensor de ponteira dupla.

Para fazer a medição da umidade do solo com esse tipo de sensor, um pulso de calor é aplicado pela ponteira aquecedora durante um tempo fixo. Esse calor atravessa o solo e a temperatura máxima que chega até a ponteira sensora é medida. Uma maior quantidade de água presente no solo facilita a dissipação desse calor, diminuindo a temperatura sentida no sensor, ou seja, quanto mais úmido o solo, menor a temperatura medida pela ponteira sensora.

A relação que descreve o aumento da temperatura máxima,  $\Delta T_m$ , sentida na ponteira sensora, distante de r do aquecedor, como uma função da energia de aquecimento, q, e da quantidade de água no solo,  $\theta_v$ , desenvolvida por [17], é:

$$\Delta T_m = \frac{q}{e\pi r^2 (1,92X_m + 2,5X_o + 4,18\theta_v)},$$
(2.1)

onde q é a quantidade de calor liberado pelo aquecedor em unidade de comprimento  $J \cdot m^{-1}$ , e é a base do logaritmo natural,  $X_m \in X_o$  são respectivamente, frações volumétricas

do material mineral e orgânico do solo [18] e  $\theta_v$  é a fração numérica da água no solo. Em solos com pouco material orgânico o termo  $X_o$  é desprezado [19]. Os coeficientes 1,92, 2,5 e 4,18 são dados em MJ · m<sup>-1</sup>.°C <sup>-1</sup>.

A fração volumétrica da água no solo,  $\theta_v$ , dada em m<sup>3</sup> · m<sup>-3</sup>, é definida pela relação entre o volume de água numa amostra de solo e o volume total da amostra, e também é expressa em porcentagens.

Devido a algumas limitações relacionadas à potência dissipada, sensibilidade e propriedades mecânicas, superar as limitações de sensibilidade desse tipo de sensor não é fácil. Para tanto, é necessário aumentar a potência dissipada ou diminuir a distância entre as ponteiras.

Considerando que o interrogador desse sensor deve ser alimentado por bateria para viabilizar seu uso no campo, aumentar a potência não é a melhor opção. Sendo assim, diminuir a distância entre as ponteiras torna-se uma solução mais interessante. Entretanto, em [5] é apresentado uma análise que mostra como a diminuição da distância entre as ponteiras, r, pode afetar na sensibilidade do sensor, principalmente quanto à problemas mecânicos que o mesmo pode ter na sua construção, ou no momento de ser inserido no solo, que podem variar essa distância. Por exemplo, diminuindo de 6 mm para r = 3 mm, o fundo de escala do sensor passa de 2 para aproximadamente 7,0 °C, mas uma deflexão de apenas 300  $\mu$ m nas ponteiras, resulta em um erro na variação da temperatura máxima,  $\Delta T_m$ , de aproximadamente 2,0°C para  $\theta_v = 5$ %, ou cerca de 28,5% do fundo de escala do sensor. Ou seja, a diminuição de r pode acarretar em erros elevados na medida da umidade.

Alguns trabalhos mostram estudos e técnicas de calibração e auto-correção do sensor DHPP, visando eliminar esse problema da variação da distância entre as ponteiras, devido à deflexão das mesmas [20], [21], [22].

Uma nova alternativa de sensor em ponteira dupla, cuja geometria elimina o problema da deflexão das hastes foi apresentada em [6]. A nova estrutura, chamada de ponteira em botão ou BHPP (do inglês *Buttom Heat Pulse Probe*) não tem hastes como as normalmente usadas neste tipo de sensor.

Nesse novo sensor foi usado um aquecedor em formato de anel, feito de material similar ao usado em [23], que foi disposto a uma distância de 6 mm do centro, onde encontra-se um termistor responsável pela medida da temperatura. Um corpo de resina plástica foi usado para acomodar tanto o aquecedor quanto o termistor, que foi fixado ao corpo com o auxílio de um epoxi de boa capacidade térmica. Na Figura 2.2 são apresentadas fotos detalhadas de toda essa estrutura.



Figura 2.2: Fotografias da ponteira em botão (BHPP), mostrando: (a) o elemento aquecedor, (b) o corpo de resina plástica com o orifício central para ser inserido o elemento sensor e (c) o sensor completo BHPP encapsulado.

Um calor de intensidade de 85  $W \cdot m^{-1}$ , que corresponde a uma potência de aproximadamente 3,26 W no aquecedor (dada as medidas de diâmetros do anel), foi aplicado pelo aquecedor durante um período de 8 s, resultando em uma energia de 26 J. A resposta de temperatura, lida pelo termistor foi adquirida durante 120 s, em intervalos de 0,5 s, após o aquecimento. Esse procedimento de teste foi realizado em amostras de solo com umidades diferentes. Os resultados de temperatura máxima,  $\Delta T_m$ , obtidos para as amostras do solo seco (5 %) e saturado (37 %) foram 3,3 e 4,8 °C, respectivamente, resultando em uma faixa de 1,5 °C entre as condições de solo seco e saturado, ou seja, uma variação da temperatura por unidade de mudança de 4,68 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>. Em comparação com o DHPP convencional, apresentado por [23] e testado sob as mesmas condições de energia aplicada, essa sensibilidade foi três vezes maior.

#### 2.2.2 Ponteira múltipla

Na tentativa de superar algumas limitações dos sensores DHPP convencionais, alguns autores propuseram os chamados de sensores de ponteira multipla, MHPP (*Multi Heat Pulse Probe*) [23–25], com um elemento aquecedor no centro e quatro ou mais elementos sensores distribuídos em torno do aquecedor, como é apresentado na Figura 2.3. Neste tipo de estrutura é feita uma média das leituras dos quatro elementos para minimizar possíveis erros devido ao problema da deflexão das ponteiras no momento da construção ou inserção no solo. Porém, o custo desse sensor aumenta consideravelmente.



Figura 2.3: Sensor de umidade do solo do tipo ponteira múltipla.

#### 2.2.3 Ponteira simples

O princípio de operação do sensor ponteira simples é similar aos ponteira dupla e múltipla, entretanto os elementos responsáveis pelo aquecimento e sensoriamento são montados juntos e encapsulados na mesma ponteira. Geralmente um pulso de duração mais longa é aplicado (tipicamente de 20 - 30 s) e a temperatura do elemento aquecedor é medida antes que a fonte de calor seja desligada.

Na Figura 2.4 é apresentado a foto de um SHPP que foi desenvolvido pela Orbital Technologies Inc. [26], [27], para determinação de umidade do solo em aplicações em ambientes de microgravidade, ou seja, em voos espaciais, onde os elementos aquecedor e sensor são encapsulados bem próximos um do outro, dentro de um revestimento térmico muito pequeno e fino de resina epóxi condutora. Eles são bem pequenos e leves (7,6 mm x 2,5 mm) e são chamados de TMAS.



Figura 2.4: Sensor de umidade do solo TMAS.

O sensor de ponteira simples, geralmente apresenta uma sensibilidade maior quando

comparado com o sensor de ponteira dupla. Isso é devido, principalmente, a quantidade de energia que é bem maior no primeiro, devido ao um tempo maior de aplicação do pulso de calor. O sensor de ponteira simples desenvolvido em [10] apresenta uma variação de temperatura de aproximadamente 1,1 °C para uma variação de teor de umidade de aproximadamente 18 %, o que corresponde a uma variação de temperatura por unidade de mudança de 6,1 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, para uma energia de aquecimento de 1,5 J.

Uma nova técnica de sensor SHPP foi apresentado por [28]. Nele um transistor bipolar NPN foi usado para desempenhar tanto o papel de aquecedor quanto de medidor de temperatura. Aproveitou-se do comportamento tão bem estudado e modelado da variação da tensão da junção base-emissora do transistor  $(V_{BE})$  com a temperatura. Foi implementado um interrogador responsável pela aplicação do pulso de calor na junção coletor-base  $(V_{CB})$  e pela medida da variação da temperatura, através da variação da tensão  $V_{BE}$ . O resultado da variação de temperatura apresentado por esse novo sensor, para ensaios no solo nas condições de seco a saturado (teor de umidade de 6,3% a 35%), foi de 6,1 °C, o que resultou em uma variação de temperatura por unidade de mudança de 21,2 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, para uma energia de aquecimento de 1,5 J.

# Capítulo 3

# Novos Sensores de Ponteira Simples

### 3.1 Introdução

ESTE capítulo apresenta duas novas estruturas de sensores desenvolvidos neste trabalho, baseados no princípio da transferência de calor. Ambos do tipo ponteira simples SHPP, no qual a fonte de calor e o elemento responsável pela medição da temperatura são encapsulados juntos na mesma ponteira. As duas estruturas são baseadas na ponte de Wheatstone, sendo que na primeira, chamada de Ponte Completa, todos os resistores tanto os fixos como os variáveis com a temperatura estão dispostos na mesma estrutura, placa do sensor. Na segunda, chamada de Autoaquecimento em Meia Ponte, somente os resistores variáveis com a temperatura fazem parte do sensor a ser encapsulado, e os demais resistores fixos encontram-se na placa do interrogador. A operação e implementação dos sensores, assim como alguns resultados de ensaios feitos no solo são apresentados neste capítulo. Os sensores SHPP encontrados na literatura, utilizam como elemento sensor um termopar, normalmente encapsulado dentro de uma agulha junto a um fio condutor de resistência tal, que produza o aquecimento do meio. Então, as estruturas desenvolvidas e apresentadas nesse capítulo são inéditas.

### **3.2** Sensor de ponteira simples Ponte Completa

#### 3.2.1 Implementação e funcionamento do sensor

A ponte de Wheatstone é um circuito convencional bem conhecido, muito utilizado na instrumentação eletrônica, encontrado geralmente no primeiro bloco, que corresponde ao bloco de sensor. Considerando o circuito apresentado na Figura 3.1, onde dois resistores são fixos,  $R_O$ , e dois variáveis,  $R_O + \Delta R_O$ , pode-se fazer uma rápida análise das suas principais relações de tensão. Tem-se que,



Figura 3.1: Circuito de uma ponte de Wheatstone.

$$V_{O1} = \frac{R_O + \Delta R_O}{2R_O + \Delta R_O} \times V_{REF} \tag{3.1}$$

e

$$V_{O2} = \frac{R_O}{2R_O + \Delta R_O} \times V_{REF}.$$
(3.2)

A partir das Eq. 3.1 e 3.2 determina-se a expressão da variação da tensão da ponte,  $\Delta V_{ponte}$ , como sendo:

$$\Delta V_{ponte} = V_{O1} - V_{O2} = \frac{\Delta R_O}{2R_O + \Delta R_O} \times V_{REF}.$$
(3.3)

Observando a Eq.3.3 e considerando que o  $\Delta R_O$  é resultado da variação de temperatura, conclui-se que a variação de tensão na ponte não é linearmente proporcional à variação na temperatura. Entretanto, desde que essa variação seja muito pequena em comparação com o valor de  $R_O$ , pode-se desconsiderá-la no denominador da Eq. 3.3, e dessa forma a variação na tensão da ponte torna-se linear com a variação da temperatura. Logo a medida dessa tensão pode ser considerada como uma boa representação da temperatura que deseja-se medir.

As relações para a variação da resistência,  $\Delta R_O$ , considerando-a não linear e linear com a variação de tensão da ponte, dada pela Eq. 3.3, são:

$$\Delta R_O = -\frac{2R_O \times \Delta V_{ponte}}{\Delta V_{ponte} - V_{REF}}.$$
(3.4)

$$\Delta R_O = \frac{2R_O \times \Delta V_{ponte}}{V_{REF}}.$$
(3.5)

Determinando  $\Delta R_O$  através da Eq. 3.4 ou Eq. 3.5, e conhecendo seu coeficiente

térmico, CT, e o valor inicial da sua resistência,  $R_O$ , pode-se determinar a variação de temperatura no sensor usando a seguinte expressão:

$$\Delta T = \frac{\Delta R_O \times 10^6}{CT \times R_O}.$$
(3.6)

Uma ponte de Wheatstone com quatro resistores SMD (Surface Mounting Device) foi montada em uma pequena PCB (Printed Circuit Board), como pode ser visto na Figura 3.2 (b). Todos os resistores possuem o mesmo valor nominal de 47  $\Omega$ , sendo dois de alto coeficiente térmico (3.300 ppm /°C  $\Rightarrow$  155 m $\Omega$ /°C) e encapsulamento 0402 e os outros, de potência maior e menor coeficiente térmico (100 ppm /°C  $\Rightarrow$  4,7 m $\Omega$ /°C) e encapsulamento 1206. Os dois primeiros desempenham o papel de sensores de temperatura (R<sub>S1</sub> e R<sub>S2</sub>) e os demais são somente aquecedores (R<sub>H1</sub> e R<sub>H2</sub>). Veja detalhe pontilhado no diagrama do sistema de medição apresentado na Figura 3.3. É importante notar que, os sensores também contribuem com o aquecimento da estrutura, pois todos os resistores dissipam a mesma potência, visto que possuem os mesmos valores de resistência.

A ponte foi montada em uma placa de circuito impresso de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>. O layout da PCB com os resistores da ponte, pode ser observado na Figura 3.2(a). Para essa estrutura ser usada em ambiente úmido, foi necessário um encapsulamento capaz de fazer o isolamento elétrico da placa e seus componentes e manter uma boa condutividade térmica. Para tanto, foi utilizado o epóxi Epotherm 180 da empresa Transene , que reúne as características necessárias para o projeto. Na Figura 3.2(b) e (c) são apresentadas fotos da placa com os resistores sem e com o encapsulamento epóxi.



Figura 3.2: (a) Layout da PCB. (b) Foto do sensor sem encapsulamento. (c) Foto de dois sensores encapsulados com epóxi.

#### 3.2.2 Interrogador

Para o sensor apresentado foi implementado um circuito interrogador. Esse circuito basicamente é responsável pelas seguintes funções: prover a alimentação do sensor, o con-

dicionamento de sinais que adequa sua saída para a entrada do conversor analógico/digital de um microcontrolador, que adquiri a tensão e envia esse dado para um computador, através de um transmissor de rádio frequência. Um diagrama que resumi todas essas funções é apresentado na Figura 3.3.

A ponte foi polarizada com uma tensão de 2,5 V, que resulta em uma potência elétrica aplicada em cada resistor de 33,24 mW. O circuito de polarização da ponte é apresentado na Figura 3.4 juntamente com o amplificador de instrumentação. Foi usado como regulador de tensão, U<sub>1</sub>, o componente TPS70925 da Texas, para prover essa tensão de polarização. Este regulador suporta uma faixa de tensão de entrada de 2,7 V até 30 V e mesmo tendo uma boa capacidade de corrente de saída, optou-se pelo uso de um *driver* de corrente implementado com um amplificador operacional, U<sub>2</sub>, OP07 e um transistor bipolar NPN BC547.



Figura 3.3: Diagrama do sistema de medição da variação da tensão do sensor Ponte Completa.

Com a ponte polarizada, a potência dissipada nos resistores aumenta a temperatura na estrutura. Dessa forma, as resistências dos resistores, ditos sensores ( $R_{S1} \ e \ R_{S2}$ ) variam, causando o desbalanceamento da tensão da ponte, ou seja,  $\Delta V_{ponte} = V_{O1} - V_{O2} \neq 0$ . Dependendo da umidade do meio onde encontra-se essa estrutura, esse desbalanceamento pode ser maior ou menor. Dessa forma, pode-se através da medição da tensão da ponte fazer uma relação com a umidade do solo onde a mesma estiver inserida, ou seja, tem-se um sensor de umidade do solo.

Essa tensão,  $\Delta V_{ponte}$ , é amplificada por um amplificador de instrumentação, U<sub>3</sub>, INA122,

cujo ganho é dado pela relação apresentada na equação a seguir. Um resistor  $R_G$  de 200 k $\Omega$  foi utilizado, resultando em um ganho de aproximadamente 6.

$$A_v = 5 + \frac{200k}{R_G}.$$
 (3.7)



Figura 3.4: Circuito de polarização do sensor Ponte Completa e amplificação da sua tensão.

O sensor é interligado à placa do interrogador através de um cabo, pelo conector CON de quatro pinos, como pode ser visto na Figura 3.4.

#### 3.2.3 Coleta e envio dos dados

A tensão de saída do amplificador,  $V_{OUT}$ , é adquirida pelo conversor analógico/digital de 16 bits de um microcontrolador MSP430AFE253 da Texas, que é responsável tanto pela coleta quanto pelo envio dos dados de tensão. Esses dados de tensão são lidos a cada 1s e enviados pela SPI (*Serial Peripheral Interface*) do microcontrolador a um módulo de rádio frequência CC2500 de 2,4 GHz, de baixo consumo, também da Texas. Um outro módulo de rádio, conectado à porta USB (*Universal Serial Bus*) de um computador, recebe esses dados que são organizados em um arquivo no formato texto, que ao final do ensaio pode ser salvo em formato compatível com softwares de planilhas para posterior processamento e análise dos dados.

#### 3.2.4 Ensaios e Resultados

Cada ensaio com o sensor no solo foi realizado durante um período de 120 s. Estes foram feitos em amostras de solo com umidades diferentes, desde o estado saturado até mais seco. Conhecendo o peso da amostra ensaiada ( $P_{Solo}$ ) e seca ( $P_{SoloSeco}$ ), determinase quanto de água está presente na amostra e assim o teor de umidade do solo pode ser determinada como sendo:

$$Umidade(\%) = \theta_v = 100 \times \frac{(P_{Solo} - P_{SoloSeco})}{P_{SoloSeco}}$$
(3.8)

Para os ensaios com esse sensor foi preparado uma amostra de solo utilizando um cilindro plástico com volume de 150 ml, equivalente a 182 g de solo seco, que foi peneirado em peneira de abertura 0,297 mm, ou seja, amostra de solo composta por partículas menores ou iguais a 0,297 mm. O sensor foi inserido na amostra que foi saturada de acordo com o procedimento padrão apresentado em [29]. O estado de saturação da amostra foi feito utilizando uma tela de nylon de malha fina com um anel elástico na parte inferior do cilindro com o solo seco, colocado em uma bandeja com 1 cm de altura de água. Adicionou-se água à bandeja até atingir 1 cm abaixo da superfície do cilindro. Esperou-se 12 horas para a completa saturação da amostra. Fez-se a relação dos volumes (pesos) da água com o solo, de acordo com a Eq. 3.8 e determinou-se que a umidade de saturação da amostra foi de aproximadamente 41%. Realizou-se o primeiro ensaio do sensor para a amostra saturada e os demais ensaios foram feitos em intervalos de 24 horas durante 6 dias consecutivos, todos feitos em laboratório onde a temperatura foi mantida constante.

Na Figura 3.5 são apresentados os resultados da tensão da ponte ao longo de 120 s após a polarização da estrutura, para quatro situações distintas de teor de umidade da amostra de solo testada. Para o plote da tensão do sensor em função da umidade, apresentada na Figura 3.6, foram utilizados os valores que o desbalanceamento da ponte alcançou exatamente no tempo de 60 s após o início do ensaio. Os valores das umidades foram calculados através da Eq. 3.8 com os pesos obtidos em cada ensaio.

A partir dos valores medidos de  $V_{OUT}$  para cada ensaio, determinou-se os  $V_{ponte}$  apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6. Considerando  $R_O = 47 \Omega$ ,  $CT = 3.300 \text{ ppm} / ^{\circ}C \text{ e } V_{REF} = 2,5 \text{ V}$ , foram calculados os valores das variações da resistência e da temperatura através de 3.4 e 3.6. Estes valores estão apresentados na Tabela 3.1. Os resultados da variação de temperatura para as diferentes umidades da amostra de solo testada, também são apresentados no gráfico da Figura 3.7.

Observa-se que, desconsiderando o resultado para a situação mais seca, com essa estrutura de sensor obtém-se uma diferença de 1,52 °C na variação na temperatura para



Figura 3.5: Variação da tensão da ponte que corresponde à variação da tensão no sensor.



Figura 3.6: Variação da tensão da ponte ao final de 60 s, em função da umidade do solo. uma variação na umidade do solo de 26,5 %, que resulta em uma sensibilidade de 5,7 °C /  $m^3 \cdot m^{-3}$ .

Vale ressaltar que nos resultados desse sensor para umidades de solo diferentes, observase que quanto mais seco o solo, maior sua condutividade térmica e, maior será o desbalanceamento da ponte devido à variação dos valores dos resistores em contato com este solo.



Tabela 3.1: Resultados da variação da resistência e temperatura do sensor em função das umidades.

Figura 3.7: Variação da temperatura na amostra de solo em 60 s, em função da umidade do solo.

### 3.3 Sensor de autoaquecimento em Meia Ponte

Toda a análise feita no sensor anterior (Ponte Completa) é válida para o Meia Ponte. A principal diferença entre eles está na disposição dos resistores na estrutura que estará em contato com o meio a ser medido a umidade, ou seja, no sensor a ser encapsulado. Como já foi dito, no Ponte Completa, os quatro resistores da ponte estão na mesma placa e encapsulados juntos, enquanto que no Meia Ponte, apenas os resistores de alto coeficiente de temperatura estão encapsulados.

#### 3.3.1 Implementação e funcionamento do sensor

Para implementar a ponte de Wheatstone do sensor de autoaquecimento, foram utilizados quatro resistências iguais de 270  $\Omega$ , que inicialmente, é condição necessária para manter a ponte equilibrada, ou seja,  $V_{o1} - V_{o2} = 0$ . Dois resistores da ponte ( $R_{S1} \in R_{S2}$ ) são do tipo SMD, de alto coeficiente térmico (3.900 ppm/°C  $\Rightarrow 1.053 \text{ m}\Omega/°C$ ) e os outros, do tipo axial com precisão de 0,1%. A ponte foi polarizada com uma tensão 5 V, capaz de fornecer uma potência de aproximadamente 23 mW a cada um dos resistores. Quando aplicada essa potência, os resistores de alto coeficiente térmico variam seus valores iniciais, desbalanceando a ponte, ou seja,  $V_{o1} - V_{o2} \neq 0$ . Esse desbalanceamento da ponte, devido a variação da temperatura nos resistores  $R_{S1}$  e  $R_{S2}$ , é afetado pelo meio onde encontra-se a estrutura. Dessa forma, ela pode ser utilizada para inferir a umidade no solo, visto que a umidade pode alterar o comportamento da temperatura nos resistores.

Os resistores  $R_{S1} \in R_{S2}$  foram montados em uma placa de circuito impresso de 1 cm<sup>2</sup>. Para testar essa estrutura em ambiente úmido, também foi utilizado o epóxi Epotherm 180 da empresa Transene . Na Figura 3.8 são apresentadas fotos da placa com os resistores com e sem o encapsulamento epóxi.





Figura 3.8: (a) Foto do sensor sem encapsulamento. (b) Foto de dois sensores encapsulados com epóxi.

#### 3.3.2 O interrogador e a coleta/envio dos dados

Para viabilizar os ensaios de validação do sensor foi implementado um sistema muito semelhante ao usado no sensor anterior, composto basicamente por um interrogador e um módulo de coleta e envio de dados. Um diagrama desse sistema pode ser visto na Figura 3.9.

O sensor desenvolvido, chamado aqui de Meia Ponte, é conectado a um circuito que contém os outros dois sensores fixos da ponte, um circuito de referência de tensão e um amplificador de instrumentação, além de conectores para o sensor e para o circuito de coleta e envio de dados. A Figura 3.10 apresenta o esquemático do circuito implementado para esse sensor.

A alimentação desse circuito é promovida por duas baterias de 9V, que são conectadas ao circuito através dos *jumpers*  $J_1 \in J_2$ . Uma tensão de referência estável é necessária



Figura 3.9: Diagrama do sistema desenvolvido para os ensaios do sensor Meia Ponte.



Figura 3.10: Esquemático do interrogador do sensor de autoaquecimento em Meia Ponte.

para a ponte de Wheatstone. Esta tensão é obtida do circuito integrado U<sub>1</sub> LT1461-5 da Linear Technology, que é uma referência de tensão que combina alta precisão e baixo drift, com baixo consumo de corrente da fonte e alta corrente na saída, [30].

Com uma tensão de alimentação na ponte de 5 V aplicada, tem-se uma corrente inicial

em cada resistor de 9,26 mA, que proporciona uma potência aplicada em cada um dos resistores  $R_{S1} e R_{S2} de 23,15$  mW. Essa potência dissipada afeta seus valores de resistência, proporcionando um desequilíbrio na ponte. As tensões  $V_{O1} e V_{O2}$  são as entradas não inversora e inversora, respectivamente, do amplificador de instrumentação U<sub>3</sub> INA122, cujo ganho é dado pela relação apresentada na Eq. 3.7. Um resistor  $R_G$  de 33 k $\Omega$  foi utilizado, resultando em um ganho de 11. A saída do amplificador de instrumentação é adquirida pelo conversor analógico/digital de 16 bits do microcontrolador da Texas, MSP430AFE253 [31], que também é responsável pelo envio dos dados da tensão de saída do interrogador.

#### 3.3.3 Resultados

Foi pesada uma amostra de solo seco e acondicionada em um recipiente plástico, onde a estrutura foi colocada em contato com o solo. Essa amostra de solo foi umidecida até o ponto de saturação de acordo com o procedimento padrão apresentado em 3.2.4 e, uma nova pesagem foi realizada para determinação da quantidade de água presente na amostra, assim como o ensaio do sensor e os demais foram realizados em intervalos de 24 horas, sempre fazendo uma nova pesagem, antes de cada ensaio, para determinação do teor de umidade da amostra de solo. Os resultados encontram-se nos gráficos apresentados nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13.



Figura 3.11: Resposta do sensor Meia Ponte para valores diferentes de umidade do solo.

Os dados da variação da temperatura em função do teor de umidade da amostra de solo também estão apresentados na Tabela 3.2.



Figura 3.12: Resultados da variação da ponte no tempo de 60 s em função das umidades dos solos testados.



Figura 3.13: Resultados da variação de temperatura no solo, no tempo de 60 s em função do teor de umidade da amostra.

## 3.4 Conclusões

Observando as Figuras 3.11 e 3.12, nota-se que o desbalanceamento da ponte do sensor Meia Ponte é bem menor que o obtido no Ponte Completa para situações de umidades parecidas. Mesmo tendo usado resistores com coeficiente térmico maior e de valor de resistência também maior. Esse resultado está relacionado a quantidade de calor que cada estrutura produz. No Meia Ponte o calor produzido é devido apenas à dois resistores,

Umidade (%)	$\Delta T(^{\circ}C)$
9,5	3,77
11,8	$3,\!69$
27,5	$2,\!19$
34,0	1,61

Tabela 3.2: Resultados da variação da temperatura lida pelo sensor em função das umidades.

enquanto que no Ponte Completa existem quatro resistores dissipando potência. De outra forma, pode-se explicar essa diferença pela energia entregue na forma de calor  $(P[W] \times t[s])$  para cada sensor. No caso do Ponte Completa, considerando o tempo de 60 s e a potência dissipada pelos quatro resistores da estrutura de 132,96 mW, tem-se uma energia é de 7,98 J. Para o sensor Meia Ponte, onde a potência é devida apenas a dois resistores, considerando o mesmo tempo de 60 s a energia é de 2,76 J.

Uma outra diferença é notada entre as respostas dos sensores no tempo. Considerando o tempo dos ensaios de 120 s, a variação da tensão  $V_{OUT}$  obtida no Ponte Completa parece ter atingido um estágio de acomodação, enquanto que no Meia Ponte, ainda existe uma derivada bastante acentuada. Esse comportamento é notado mesmo no tempo de 60 s, que foi escolhido como a referência de tempo para a resposta dos sensores.

Na Tabela 3.3 é apresentado um resumo dos resultados dos sensores SHPP implementados e mostrados nesse capítulo e os apresentados por [28] - Transistor bipolar e [10] -Campbell.

Tabela 3.3: Resultados dos sensores SHPP.			
Sensor	$\Delta T\Delta \theta_v (^{\circ}C / m^3 \cdot m^{-3})$	Energia (J)	
Transistor bipolar	21,2	1,5	
Campbell	6,1	$1,\!5$	
Ponte completa	5,7	$7,\!98$	
Meia ponte	9,37	2,78	

# Capítulo 4

# Novos Sensores de Ponteira Dupla

### 4.1 Introdução

Com o objetivo de desenvolver uma nova estrutura para um sensor em ponteira botão BHPP, apresentado em [6], foram montados em PCB duas geometrias de sensores. A primeira, onde no centro são dispostos resistores SMD de alto coeficiente térmico e na periferia, resistores em série responsáveis pela dissipação de potência, ou seja, pelo fornecimento do calor, que será conduzido até o centro através do meio que os separa. Na segunda, o elemento aquecedor é colocado no centro, e os resistores de alto coeficiente térmico na periferia, na tentativa de um maior aproveitamento do calor dissipado pelo resistor do centro. Nesses dois sensores, os elementos responsáveis pelo aquecimento e sensoriamento são distintos e encapsulados em áreas diferentes, logo são classificados como DHPP . Nas próximas seções serão apresentados esses sensores, seus circuitos de condicionamento e aquisição de dados, bem como os resultados de testes em amostras de solo e conclusões.

### 4.2 Primeira estrutura - BHP1

#### 4.2.1 Placa do sensor

Na primeira estrutura, aqui chamada de BHP1, foram montados uma série de 8 resistores do tipo through hole de 6,2  $\Omega$  e 1/8 W na parte periférica, como pode ser observado na Figura 4.1(a). Aplicando uma tensão de 5V nessa série de resistores, obtém-se uma corrente de 100 mA e uma potência total de 500 mW. Na parte central, foram montados quatro resistores de 470  $\Omega$  com alto coeficiente térmico (3.900 ppm/°C  $\Rightarrow$  1,83  $\Omega$ /°C), ligados em dois pares de paralelo, dispostos em formato de *cross quad*, como pode ser visto na Figura 4.1(a). Essa disposição foi pensada para maximizar o sensoriamento do fluxo de calor vindo da parte aquecedora. Os resistores em *cross quad*, por sua vez, fazem parte de uma ponte resistiva de Wheatstone, com dois resistores de 235  $\Omega$ , que não sofrem efeito da temperatura do aquecedor e estão dispostos na placa do interrogador.

Foi utilizado o epoxi da Transene sobre os componentes da estrutura do sensor para que testes no solo pudessem ser realizados. Uma foto do sensor encapsulado pode ser vista na Figura 4.1(b). Nessa estrutura, tem-se cinco pontos de conexão com o circuito interrogador, que são: a tensão que alimenta o aquecedor,  $V_H$ , a referência terra, GND, a tensão de polarização da ponte,  $V_{REF}$  e as tensões nos ramos da ponte,  $V_{O1}$  e  $V_{O2}$ .



Figura 4.1: Fotos da estrutura BHP1 com aquecedor na periferia e sensor no centro, sem e com encapsulamento epoxi.

A seguir, para facilitar a leitura, serão repetidas as principais relações apresentadas no Capítulo 3 para a ponte de Wheatstone, pois as mesmas são válidas para essa estrutura de sensor.

$$\Delta V_{ponte} = V_{O1} - V_{O2} = \frac{\Delta R_O}{2R_O + \Delta R_O} \times V_{REF},\tag{4.1}$$

$$\Delta R_O = -\frac{2R_O \times \Delta V_{ponte}}{\Delta V_{ponte} - V_{REF}} \tag{4.2}$$

е

$$\Delta T = \frac{\Delta R_O \times 10^6}{CT \times R_O}.$$
(4.3)

onde,  $\Delta T$  é a variação de temperatura em °C, CT é o coeficiente térmico em ppm/°C e  $R_O$  é o valor inicial da resistência sensor em  $\Omega$ .

#### 4.2.2 Interrogador do sensor BHP1

O circuito interrogador para esse sensor faz basicamente três tarefas. A primeira é gerar o pulso de tensão aplicado aos resistores aquecedores,  $V_H$ . Dessa forma, controla o pulso de calor que atravessa o meio e é sentido pelos resistores do centro. Esse pulso de calor causa uma variação nos valores das resistências, provocando um desbalanceamento na tensão da ponte. A segunda é medir essa tensão de desbalanceamento da ponte, que por sua vez depende do meio que envolve a estrutura. E por último, enviar esses dados para o computador.

Um diagrama básico do sistema completo implementado para os testes com o sensor BHP1 é apresentado na Figura 4.2. Um conector de cinco pinos,  $\text{CON}_1$  (Figura 4.4), faz a interface entre a estrutura e a placa do interrogador.



Figura 4.2: Diagrama do sistema completo do sensor BHP1.

#### Geração do Pulso de Calor

A geração de calor na estrutura desse sensor é feita através da potência dissipada na série de resistores, chamados aqui de aquecedores  $(R_{H1}, ..., R_{H8})$ . Esses resistores são

todos iguais de 6,2  $\Omega$  de 1/6 W. Então, a resistência equivalente do bloco aquecedor é de 49,6  $\Omega$ , cuja corrente elétrica é de 100 mA para uma tensão aplicada de 5 V. A potência elétrica total dissipada, nessas condições, é de 500 mW.

A figura 4.3 apresenta o circuito implementado para o gerador do pulso de calor no sensor. O timer do microcontrolador é configurado para gerar um pulso de 20 s após o acionamento do push bottom, PB. Esse pulso, por sua vez é aplicado às entradas de controle das chaves do ADG821. Assim, a tensão de referência de 5 V é aplicada ao bloco de aquecedores da estrutura, durante os 20 s. Um relé acionado por um transistor bipolar, foi usado para controlar a alimentação do amplificador operacional, que implementa o driver de corrente juntamente com o transistor Darlington TIP 120, na geração da tensão do aquecedor,  $V_H$ . A retirada da alimentação do amplificador se dá em fase com o final do pulso de tensão no aquecedor, para garantir que nenhuma tensão seja de fato entregue ao aquecedor. A tensão de 5 V é estabelecida por uma referência de tensão LT1461-5, da Linear Technology.



Figura 4.3: Circuito do gerador de pulso de calor no sensor BHP1.

#### Alimentação da ponte e amplificação

A ponte de Wheatstone é alimentada com uma tensão de referência de 1,2 V vinda do regulador de tensão LM385BYZ-1.2 polarizado com um resistor de 470 k $\Omega$ , como pode ser

observado na Figura 4.4. Esta tensão entra em um *buffer* de tensão, implementado com um amplificador operacional OP07, antes de alimentar a ponte. A corrente total consumida pela ponte é de 5,1 mA que foi fornecida pela saída do amplificador operacional. A corrente de polarização de cada resistor sensor,  $R_{S1A}$ ,  $R_{S1B}$ ,  $R_{S2A}$  e  $R_{S2B}$  é de 1,28 mA, que resulta em uma potência dissipada de 0,76 mW. Esse valor é muito baixo, dessa forma foi desconsiderado o autoaquecimento desses resistores.

A tensão da ponte,  $V_{ponte}$ , dada por  $V_{O1} - V_{O2}$ , varia quando os resistores  $R_{S1A}$ ,  $R_{S1B}$ ,  $R_{S2A}$  e  $R_{S2B}$  têm seus valores alterados. Essa tensão é amplificada pelo ganho de 25 através de um amplificador de instrumentação INA122, com  $R_G$  de 10 k $\Omega$ . A saída desse amplificador  $V_{OUT}$  é convertida em 16 bits pelo conversor AD do microcontrolador e enviada pela interface SPI para um módulo de rádio frequência, que por sua vez transmite para outro módulo de RF conectada à porta USB do computador. Esses dados são adquiridos a uma taxa de 1 amostra por segundo.



Figura 4.4: Circuito da referência de tensão e amplificação da tensão da ponte do sensor BHP1.

#### 4.2.3 Resultados

Para os ensaios com essa estrutura foi adotado um outro procedimento. Primeiramente, foram preparadas seis amostras de solo com teores de umidades diferentes (43%, 35%, 25%, 15%, 10% e 5%). Essas amostram foram doadas pelo pessoal técnico de um laboratório de solos. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e depois colocadas em recipiente plástico cobrindo completamente o sensor no momento do teste. Cada ensaio teve duração superior a 120 s. Na Figura 4.5 são apresentadas algumas curvas da variação da tensão da ponte em função do tempo para amostras com teores de umidades diferentes. São mostrados 120 pontos para cada curva.



Figura 4.5: Variação da tensão da ponte no sensor BHP1 em função do tempo.

Observa-se que a tensão na ponte alcança seu valor máximo em tempos diferentes, dependendo da quantidade de água presente na amostra. Quanto mais seca a amostra, mais tempo leva para que essa tensão máxima seja atingida.

Na Figura 4.6 é apresentado o gráfico com a tensão máxima alcançada pelo desbalanceamento da ponte, após a aplicação do pulso de calor no aquecedor, em função da umidade da terra. Foram considerados os valores de umidade fornecidos pelo pessoal do laboratório que preparou as amostras de terra, pois os ensaios foram realizados próximos da data de preparação das mesmas.

Com os resultados da variação de tensão na ponte destes ensaios, foram usadas as Eq. 4.2 e 4.3 para determinar as variações da resistência e temperatura nos resistores sensores. A Tabela 4.1 apresenta os valores encontrados, que também podem ser observados na Figura 4.7

Observa-se que os valores tanto para a resistência quanto para a temperatura são muito pequenos. Com certeza, a potência do pulso de calor aplicado e a geometria dessa estrutura, quanto a distância entre os aquecedores e os sensores, sejam os motivos dessa variação tão pequena.



Figura 4.6: Variação da tensão da ponte do sensor BHP1 em função do teor de umidade do solo.

Tabela 4.1: Resultados da variação da resistência e temperatura do sensor BHP1 em função das umidades.

Umidade (%)	$\Delta \mathbf{R}_S (\mathbf{m}\Omega)$	$\Delta T(m^{\circ}C)$
5	$16,\!27$	0,88
10	9,76	0,53
15	8,25	$0,\!45$
25	$7,\!47$	0,41
35	6,93	0,38
43	6,03	0,33

## 4.3 Segunda estrutura - BHP2

#### 4.3.1 Placa do sensor

Uma segunda estrutura para um sensor de umidade do solo baseado na transferência de calor BHPP foi desenvolvida e é chamada ao longo do texto de BHP2. Nessa nova proposta o elemento aquecedor é colocado no centro da placa e os resistores sensíveis com a temperatura são dispostos na periferia. Na Figura 4.8 é apresentado o layout da estrutura, com suas principais medidas e fotos da placa sem e com encapsulamento epóxi.

Diferente das demais estruturas desenvolvidas e apresentadas até aqui, essa não usa uma ponte de Wheatstone. Os resistores sensíveis à temperatura foram conectados em paralelo. São quatro resistores de 470  $\Omega$  com alto coeficiente de temperatura (3.900 ppm/°C  $\Rightarrow 1,833\Omega/°$ C), resultando em uma resistência equivalente de 117,5  $\Omega$ . Esses são polarizados através de um resistor de 118  $\Omega$  que formam um divisor de tensão. O



Figura 4.7: Variação da temperatura no solo medida pelo sensor BHP1 em função do teor de umidade do solo.



Figura 4.8: Layout da placa do sensor BHPP com aquecedor na periferia e sensor no centro (BHP2) e fotos da estrutura sem e com encapsulamento epoxi.

aquecedor é um resistor de 100  $\Omega$ , que recebe um pulso de tensão de 5 V, durante 6 s, resultando em uma corrente de 50 mA e pulso de potência de 250 mW. O arranjo aquecedor-sensor possui apenas três pontos de conexão com seu circuito interrogador, que são: a tensão do sensor, V<sub>S</sub>, a tensão do aquecedor, V<sub>H</sub> e a referência terra, GND.

#### 4.3.2 Sistema de Medição

Na Figura 4.9 é apresentado o diagrama do sistema de medição da variação da tensão  $V_S$  do sensor BHP2. Nesse diagrama tem-se os seguintes subsistemas:

módulo de alimentação, responsável pela geração das tensões de alimentação do

microcontrolador e dos demais componentes e, da tensão aplicada no aquecedor.

amostragem da tensão inicial do sensor,  $V_{S0}$ .

geração do pulso de calor.

Polarização do sensor, que foi implementada de duas formas: em tensão e em corrente.

medida e amplificação diferencial da tensão no sensor:  $V_{OUT} = Ganho \times (V_S - V_{SO})$ .

microcontrolador, responsável pelos controles do pulso de calor, do procedimento de medida da tensão do sensor e aquisição e envio desses dados para o rádio.

transmissão via rádio frequência dos dados para o microcomputador, onde os dados são salvos em formato texto para posterior análise e processamento.



Figura 4.9: Diagrama do sistema de medição da tensão do sensor BHP2.

#### Alimentação

Um circuito mais elaborado foi desenvolvido para fornecer a alimentação para o interrogador desse sensor. Esse circuito foi projetado para receber uma tensão de entrada vinda de um super capacitor ( $C_{STORE}$ ) carregado por um colheitador de energia (*Energy*) *Harvesting*). Assim seu uso no campo pode ser facilitado quanto a autonomia da fonte de alimentação.

Sabe-se que a queda de tensão pelo tempo em um capacitor, depende da sua corrente elétrica pela seguinte relação:

$$\frac{\Delta V_C}{\Delta t} = \frac{I_C}{C},\tag{4.4}$$

$$\Delta V_C = \Delta t \frac{I_C}{C}.\tag{4.5}$$

Para o pulso de calor aplicado no aquecedor gerado pela corrente de 50 mA, no intervalo de 6 s, e o capacitor  $C_{STORE}$  de 2 F, tem-se por 4.5 uma queda de tensão na fonte de alimentação de 150 mV. Que pode ser diminuída caso aumente-se o valor do  $C_{STORE}$  ou diminua-se o valor da corrente no aquecedor.

Para o divisor de tensão formado pelos resistores sensíveis à temperatura ( $R_{EQU} = 117, 5 \Omega$ ) e o 118  $\Omega$ , com uma tensão de 1,2 V, a corrente resultante é de 5,1 mA. Considerando que o ensaio para medição da umidade do solo dure 60 s, tem-se uma queda de tensão do capacitor  $C_{STORE}$  de 153 mV. Sendo assim, o impacto da alimentação da estrutura do sensor BHP2 na fonte de alimentação vindo do colheitador de energia é de um decréscimo de 300 mV por dia, para o caso de uma medição diária.

O circuito implementado para fornecer a alimentação para o sensor BHP2 e seu interrogador é apresentado na Figura 4.10.  $V_{BAT}$  corresponde a tensão vindo do  $C_{STORE}$ . Foram usados dois reguladores TPS78223 da Texas, de baixo *dropout* (130 mV) e baixíssima corrente de polarização (500 nA). Um deles está sempre habilitado e fornece a alimentação do microcontrolador. O outro, tem sua saída de 2,3 V ligada a um elevador de tensão (*charge pump*) TPS60141, que fornece os 5 V para o gerador do pulso de calor, assim como alimenta outros componentes do interrogador. Este segundo regulador é habilitado pelo microcontrolador apenas durante o procedimento de medição da umidade do solo, através de um pino de I/O, denominado de **Habilita Medida**.

#### Amostragem da tensão inicial do sensor

Considerando a polarização do sensor feita com uma tensão de referência  $V_{REF}$  de 1,2 V, antes da aplicação do pulso de calor no aquecedor, a tensão  $V_S$  é aproximadamente igual a metade dessa tensão, ou seja, 600 mV. Essa tensão é amostrada e guardada em um capacitor,  $C_{SH}$  do circuito de *sample and hold*, como é apresentado na Figura 4.11. Foi usada uma chave analógica ADG819 da Analog Devices, que apresenta uma resistência típica de 0,5  $\Omega$  [32], para realizar essa amostragem no comando **Controle SH** vindo



Figura 4.10: Circuito responsável pela alimentação do sistema.

do microcontrolador. A tensão inicial do sensor amostrada,  $V_{SO}$ , é disposta na saída de um amplificador operacional LMP7721. O capacitor  $C_{SH}$  é de filme de polipropileno metalizado e suporta até 450  $V_{DC}$  com uma resistência  $R_P = 100 G\Omega$  da Panasonic.

Essa tensão inicial é guardada até o final do ensaio e usada no procedimento de medição da variação da tensão do sensor, que será apresentada em outra seção.

Mesmo na polarização do sensor feita em corrente, sua tensão inicial, antes da aplicação do pulso de calor é de 600 mV, pois a corrente de polarização do sensor foi mantida a mesma, ou seja, 5,1 mA.



Figura 4.11: Circuito do amostrador da tensão inicial do sensor BHP2 e circuito gerador do pulso de calor aplicado no aquecedor.

#### Geração do pulso de calor

O pulso de calor aplicado à estrutura é resultado da potência dissipada no resistor aquecedor,  $R_H$ , quando aplicada uma tensão  $V_H$  de 5 V. Essa tensão é aplicada durante 6 s através de chave ADG819, que tem capacidade de forncecer até 200 mA. A entrada de controle da chave (**Controle Pulso de Calor**) vem de uma porta de IO do microcontrolador. O circuito desse gerador de pulso de calor é apresentado na Figura 4.11.

#### Medida e amplificação diferencial

Como essa estrutura não é uma ponte, onde consegue-se medir diretamente um desbalanceamento de tensão devido a variação da resistência nos sensores de temperatura, foi elaborado um esquema para obter-se a medida diferencial. Com o auxílio do amplificador de instrumentação INA333 da Texas e das chaves analógicas LT1043 da Linear, foi implementado um bloco de instrumentação de precisão com um capacitor de chaveamento duplo, com balanceamento de cargas, como pode ser observado na Figura 4.12.

As tensões  $V_S$  e  $V_{S0}$  que correspondem à tensão no sensor e sua tensão inicial, respectivamente (ver Figura 4.11), são ligadas ao capacitor  $C_S$ , através das chaves, e é carregado com a diferença entre essas duas tensões. Essa diferença é amplificada pelo INA333, cujo ganho é dado por,

$$A_v = 1 + \frac{100k}{R_G}.$$
 (4.6)

O resistor  $R_G$  usado foi de 2,2 k $\Omega$ , o que resulta em um ganho de aproximadamente 46,5. O amplificador INA333 é alimentado com 0 V e 5 V e recebe uma tensão de referência de 1,2 V para deslocamento do *off-set* na saída, para que dessa forma evite-se problema com uma variação negativa do sensor. Essa tensão de 1,2 V é obtida de uma tensão de *bandgap*,  $V_{BG}$ , fornecida pelo microcontrolador. Assim, a tensão de saída  $V_{OUT}$  do amplificador é,

$$V_{OUT} = V_{REF} + A_v (V_S - V_{S0}). ag{4.7}$$

Como pode ser observado na Figura 4.12, tanto a saída do amplificador quanto a tensão de referência são ligadas ao conversor AD do microcontrolador, que foi configurado para fazer conversão diferencial, para medir apenas a variação de tensão no sensor  $\Delta(V_S - V_{S0})$ . Ele também foi programado para fazer leitura dual, ou seja, sua conversão pode resultar em valores positivos ou negativos. Como esse conversor é de 16 bits e considerando sua configuração, o valor de tensão que corresponde a variação de um bit na sua saída é 18,3  $\mu V$ . Ou seja, variações na tensão menores que esse valor não serão lidos corretamente.

O sinal de controle das chaves LT1043 é obtido do coletor de uma transistor bipolar configurado como inversor, cujo sinal da base é gerado pelo temporizador do microcontrolador e disponibilizado em uma de suas portas IO, denominada de **Controle Medida**. Isso foi necessário para adequação do nível de tensão desse controle para 5 V, que é a alimentação das chaves.



Figura 4.12: Circuito do processo de medida e amplificação da tensão do sensor BHP2.

#### Microcontrolador

Foi implementado no microcontrolador um programa que realiza as seguintes tarefas:

Disponibiliza em um dos seua pinos de saída a tensão de *bandgap*,  $V_{BG}$ , usada como referência no processo de medida da variação da tensão do sensor.

Habilita o circuito de alimentação do sistema durante 120 s de cada ensaio, através da saída **Habilita Medida**.

Gera o sinal de controle da chave no circuito de amostragem da tensão inicial do sensor, através da saída **Controle SH**, nos primeiros 200 ms do ensaio.

Gera um sinal periódico de 2 Hz na saída **Controle Medida**, responsável pelo chaveamento das tensões  $V_S$  e  $V_{S0}$  nas entradas do amplificador de instrumentação INA333.

Faz a conversão AD em 16 bits da saída do amplificador. Sendo a conversão diferencial entre seus canais que recebem as tensões de referência e de saída do INA333. Realiza média de 20 leituras para cada medida, sendo uma medida a cada 0,5 s.

Gera um pulso de 6 s na saída **Controle Pulso de Calor**, aplicado em uma chave responsável pela alimentação do resistor aquecedor,  $V_H$ , ou seja, gera o pulso de calor aplicado à estrutura.

Envia os dados pela interface SPI para um módulo de transmissão de RF.

#### Módulos de transmissão RF

Foram utilizados os mesmos módulos de transmissão de dados dos outros sensores.

#### 4.3.3 Polarização do Sensor com Tensão

Como foi mencionado na Seção 4.3.2, a estrutura do sensor BHP2 foi polarizada de duas formas. A primeira com fonte de tensão,  $V_{REF}$ , como pode ser observado na Figura 4.11.

Para essa forma de polarizar os resistores sensores de temperatura, pode-se fazer uma análise da variação da tensão do divisor,  $\Delta V_O$ , com a temperatura, T, como segue (Ver Figura 4.13).

$$V_O = \frac{R_O + \Delta R_O}{2R_O + \Delta R_O} \times V_{REF},\tag{4.8}$$

sendo  $R_O e \Delta R_O$ , a resistência inicial do sensor e a sua variação em função da temperatura, respectivamente. Considerando, inicialmente, sem variação de temperatura,  $\Delta R_{O0} = 0$  e depois uma variação de temperatura tal que  $\Delta R_O = \Delta R_{O1}$ , tem-se,

$$V_{O0} = \frac{1}{2} V_{REF} \ e \ V_{O1} = \frac{R_O + \Delta R_{O1}}{2R_O + \Delta R_O 1} \times V_{REF}.$$
(4.9)

A variação a ser medida em  $V_O = V_{O1} - V_{O0}$ , será,

$$\Delta V_O = \frac{R_O + \Delta R_{O1}}{2R_O + \Delta R_O 1} \times V_{REF} - \frac{1}{2} \times V_{REF}.$$
(4.10)

Para  $V_{REF} = 1, 2 V, R_O = 118 \Omega$ , como foi implementado, tem-se que,

$$\Delta V_O = \frac{0.6\Delta R_{O1}}{236 + \Delta R_{O1}}.$$
(4.11)

A partir da Eq. 4.11, pode-se observar que a variação da tensão V<sub>O</sub> não é diretamente proporcional à variação da resistência do sensor, ou seja, com a temperatura. Para o cálculo de  $\Delta R_{O1}$ , tem que:

$$\Delta R_{O1} = -\frac{236\Delta V_O}{\Delta V_O - 0, 6}.$$
(4.12)

Então com a medida da variação da tensão no sensor, pode-se através da Eq. 4.12, determinar a variação do resistor devido a temperatura, que pode ser calculada como sendo:

$$\Delta T = \frac{\Delta R_O \times 10^6}{CT \times R_O} = \Delta R_O \times 0,54555.$$
(4.13)



Figura 4.13: Polarização por divisor de tensão.

Para esse tipo de polarização, a estrutura do BHP2 foi colocada em recipiente plástico com amostras de solo, para que os ensaios fossem realizados. Os pesos das amostras em todos os ensaios, desde a situação de saturada até seca, foram guardados para determinação da umidade. Os ensaios foram feitos dutante um período de 120 s. Um intervalo mínimo de 24 horas foi esperado entre cada ensaio.

Na Figura 4.14 são apresentados alguns gráficos da variação da tensão no sensor BHP2 em função do tempo. Apesar dos ensaios terem sido realizados em 120 s, optou-se em apresentar os resultados até 70 s, visto que a variação máxima obtida nos ensaios ocorreu antes dos 50 s.

Com os dados de peso da amostra de solo ensaiada com o sensor BHP2, desde a saturação até o seco, determinou-se a umidade dessa terra em cada ensaio. A tensão máxima atingida na saída do amplificador,  $V_{OUT}$ , para cada situação de umidade também foi determinada e o plote dos pontos correspondentes a cada teste estão apresentados no gráfico da Figura 4.15.

A partir das medidas de  $V_{OUT}$  apresentadas na Figura 4.15, foram calculadas as variações das temperaturas correspondentes usando a Eq. 4.13 e os resultados encontram-se na Tabela 4.2, assim como também podem ser observados no gráfico da Figura 4.16.



Figura 4.14: Variação da tensão do sensor BHP2 no tempo, polarizado com tensão.



Figura 4.15: Variação da tensão do sensor BHP2 polarizado com tensão em função de umidades do solo.

### 4.3.4 Polarização do Sensor com Corrente

Considerando a polarização em fonte de corrente, I, como pode ser visto na Figura 4.17, tem-se que,

$$V_O = I \times (R_O + \Delta R_{O1}). \tag{4.14}$$

Fazendo a mesma análise apresentada para a polarização em tensão, considerando uma

	Umidade (%)	$\Delta T(^{\circ}C)$	
	3,7	0,198	
	8,1	0,163	
	14,9	0,142	
	29,9	0,122	
	41,2	0,117	
	51,2	0,102	
220			
220			
200 ×			
180			
			3
♀ 160 <b>-</b> ^^			
	×		-
120 E		×	
120		×	-
100			×
E			
80 4 1 1 1 1	<u> </u>	<u> </u>	<u>50 60</u>
0 1	Umid	ade (%)	50 00

Tabela 4.2: Resultados da variação da temperatura do sensor BHP2 polarizado em tensão em função das umidades.

Figura 4.16: Variação da temperatura do solo medida pelo sensor BHP2 polarizado com tensão em função das umidades do solo.

variação nula de temperatura para  $V_{O0}$  e uma variação finita para  $V_{O1}$ , obtem-se  $\Delta V_O$ ,

$$\Delta V_O = I \times \Delta R_{O1}.\tag{4.15}$$

Logo, fazendo a polarização do sensor BHP2 com fonte de corrente obtém-se uma relação linear da variação da tensão do sensor com a variação de sua resistência e consequentemente, com a variação da temperatura.

Com o objetivo de obter-se uma relação direta entre a tensão medida no sensor BHP2 e a temperatura, implementou-se a polarização do sensor em fonte de corrente, como pode ser observado na Figura 4.18.

O circuito REF200 da Texas, possue duas fontes de corrente de precisão de 100  $\mu$ A. Usou-se uma delas como referência para gerar a corrente de polarização do sensor BHP2, como é apresentado na Figura 4.18. Na polarização com tensão, a corrente inicial no sensor



Figura 4.17: Polarização por fonte de corrente.

foi de aproximadamente 5 mA, então para manter essa mesma corrente, foi considerado um fator de multiplicação da corrente de referência,  $\alpha = 50$ , que corresponde à razão entre essas correntes. Isso foi conseguido através do *buffer* de corrente e da razão entre os resistores R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>, que é,

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2}.\tag{4.16}$$

Então, foi implementada essa fonte de corrente com os resistores de valores  $R_1 = 20 k\Omega$ e  $R_2 = 390 \Omega$ .



Figura 4.18: Circuito do interrogador do sensor com polarização em corrente.

Da mesma forma, ensaios com o sensor BHP2 polarizado com corrente foram feitos em uma amostra de solo, devidamente pesada e saturada. Os pesos do solo seco, saturada e nas demais situações de umidade testados foram usados para o cálculo da umidade da amostra ensaiada. As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados dos ensaios para essa última estrutura.



Figura 4.19: Variação da tensão de saída do interrogador do BHP2 no tempo, polarizado com corrente para umidades do solo diferentes.



Figura 4.20: Variação da tensão do sensor BHP2 polarizado com corrente para umidades do solo diferentes.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da variação de temperatura em função do teor de umidade da amostra de solo ensaiada.



Figura 4.21: Variação da temperatura do solo medida pelo sensor BHP2 polarizado com corrente em função das umidades do solo.

Tabela 4.3: Resultados da variação da temperatura do sensor BHP2 polarizado em corrente em função das umidades.

Umidade (%)	$\Delta T(^{\circ}C)$
5,0	0,338
9,6	0,310
19,0	0,301
27,0	0,280
35,0	0,264
42,5	0,241
50,0	0,223
56,0	0,201

### 4.4 Conclusões

Como pode ser observado, tanto nos gráficos (Figuras 4.16 e 4.21) quanto nos resultados das tabelas (Tabelas 4.2 e 4.3), a polarização por corrente do sensor BHP2 resultou em uma maior sensibilidade para o sensor, em relação a este polarizado em tensão, além de uma linearidade em praticamente toda a faixa de umidade. Com esse sensor, independente da forma de polarização, também obteve-se melhores resultados em comparação com ao BHP1 apresentada na Seção anterior, além da potência e energia do aquecedor ser muito menor.

Na Tabela 4.4 são apresentados os principais resultados para os sensores mostrados nesse capítulo e o BHPP apresentado por [6] - Hopmans. Os dados referentes aos resultados dos sensores BHP1 e BHP2 polarizado com tensão, para o menor teor de umidade do solo, foram desconsiderados, para que a sensibilidade pudesse ser calculada na faixa mais linear da resposta dos sensores. Sendo o BHP2 polarizado com corrente, o mais promissor dos sensores desenvolvidos nesse trabalho, para os objetivos citados na introdução da tese.

Sensor	$\Delta T/\Delta \theta_v (^{\circ}C / m^3 \cdot m^{-3})$	Energia (J)
Hopmans	4,68	26
BHP1	$0,6 \times 10^{-3}$	10
BHP2 (tensão)	0,14	$1,\!5$
BHP2 (corrente)	0,24	$1,\!5$

Tabela 4.4: Resultados dos novos sensores BHPP e do apresentado na principal referência.

# Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Sensores de umidade do solo baseados na técnica de transferência de calor, ainda despertam interesse de projetistas de sensores e são estudados e desenvolvidos há muito tempo. Principalmente, em busca de melhorias de características que são limitantes em alguns tipos, como o erro devido a deflexão das hastes no sensor de ponteira dupla clássico e o consumo de potência no de ponteira simples clássico. Uma alternativa foi apresentada por [6], o ponteira em botão, que não apresenta o problema da deflexão das hastes. Entretanto, para seu uso em aplicações no campo, com bateria, o mesmo necessitaria de um reprojeto quanto a potência aplicada no aquecedor para gerar o pulso de calor, pois a energia nesse sensor é de  $q \approx 26$  J. Além da complexidade da estrutura do sensor.

Utilizando circuitos convencionais da Engenharia Elétrica, como ponte de Wheatstone e divisor de tensão, foram implementados novos sensores à transferência de calor, de forma simples e prática. Todos foram devidamente testados em amostras de solos com umidades diferentes, fornecendo respostas que podem ser consideradas boas medidas de umidade dos solos ensaiados. Para tanto, uma etapa de calibração dos sensores deve ser realizada.

Foram implementadas quatro novas estruturas de sensor de umidade do solo, sendo três baseadas no circuito da ponte de Wheatstone e uma em divisor de tensão. Em todas, foram utilizados resistores de alto coefiente térmico como sensores de temperatura. Como aquecedores foram usados resistores de baixo coeficiente térmico. Esses novos sensores foram classificados de dois tipos: ponteira simples e ponteira dupla em botão.

Conhecendo a potência dissipada pelo aquecedor de cada sensor e o seu tempo de aplicação, pode-se obter a energia, q, do pulso de calor de cada um. Então, tem-se que: (a) no sensor de ponteira simples Ponte Completa, onde os quatro resistores são encapsulados juntos e contribuem com o calor do sensor,  $q \approx 7,9$  J; (b) no sensor de autoaquecimento Meia Ponte, onde apenas dois resistores são encapsulados,  $q \approx 2,7$  J;

(c) no tipo ponteira dupla em botão BHP1,  $q \approx 10$  J e (d) no ponteira dupla em botão BHP2,  $q \approx 1,5$  J, para ambas as formas de polarização (tensão e corrente). Nota-se que todos apresentam uma energia do pulso de calor bem menor que a usada em [6].

Quanto a sensibilidade obtida para cada sensor (em °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>), ou seja, o quanto variou a temperatura lida pelo sensor para a faixa de seco a saturado, tem-se que: (a) no sensor de ponteira simples Ponte Completa foi de aproximadamente 5,7 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>; (b) no sensor de autoaquecimento Meia Ponte, foi de 9,37 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>; (c) no tipo ponteira dupla em botão BHP1, obteve-se 0,6 ×10<sup>-3</sup> °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup> e (d) no ponteira dupla em botão BHP2, polarizada por tensão a sensibilidade foi de 0,14 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup> e para a polarização em corrente foi de 0,24 °C / m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>. Observa-se que entre os sensores de ponteira simples implementados, a maior sensibilidade foi obtida pelo sensor com energia do pulso de calor maior, o que era esperado. Entre os tipo ponteira dupla em botão, a melhor sensibilidade foi alcançada com o BHP2 polarizado com corrente, que por sua vez tem uma menor energia de pulso de calor. Sendo esse a melhor opção para uso em sistema de medição remoto em campo, alimentado por bateria.

O BHP2, para uma leitura por dia, provoca um decréscimo de 300 mV da tensão de alimentação fornecida por um capacitor de 2 F, que pode ser de um sistema de colheita de energia. Comparando as duas formas de polarização do sensor botão com aquecedor no centro, o polarizado em corrente apresentou uma sensibilidade um pouco maior, além de uma maior linearidade com a umidade do solo. A razão entre a sensibilidade e a energia térmica aplicada, em J, no sensor botão proposto por Hopmans foi de  $1, 8 \times 10^{-3}$ . Praticamente a mesma obtida no último sensor apresentado, porém este não se aplica a um sistema de baixo consumo.

Todos os sensores foram ensaiados em amostras de solos em laboratório, necessitando serem testados em campo, mas antes disso é necessário uma etapa de calibração, assim como em todos os sensores a tranferência de calor.

Outras geomerias podem ser implementadas utilizando essa técnica com circuitos simples e resistores como sensores de temperatura. A confecção desses sensores foi relativamente fácil, devido a facilidade em fazer placas em PCB. Uma ressalva é quanto a manipulação do epoxi, que não é tão prática e faz-se necessário o uso de um molde para controle do formato exato do encapsulamento.

# Bibliografia

- [1] The water footprint of humanity, ser. 9, vol. 109, Boston, February 2012.
- [2] Wilson and Scott, "Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application," *Journal of Production Agriculture*, vol. 7, no. 2, pp. 195–201, 1982.
- [3] A. Rende and M. Biage, "Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, vol. 24, pp. 226–233, 2002.
- [4] D. Christofidis, "Os recursos hídricos e a prática da irrigação no brasil e no mundo," Irrigação e Tecnologia Moderna, vol. 49, pp. 8– 13, 2001.
- [5] P. Dias, "A novel high sensitivity single probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn bipolar junction transistor," Ph.D. dissertation, UNICAMP, 2012.
- [6] T. Kamai, G. Kluitenberg, and J. Hopmans, "Design and numerical analysis of a button heat pulse probe for soil water content measurement," *Vadose Zone Journal*, vol. 8, pp. 167 – 173, 2009.
- [7] E. Greacen, "Soil water assessment by the neutron method," CSIRO Melbourne, 1981.
- [8] S. L. D.L. Corwin, "Characterizing soil spatial variability with apparentsoil electrical conductivity." *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46), pp. 103–133, 2005.
- [9] J. M. Hubbell and J. Sisson, "Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements," Soil Science, vol. 163, no. 4, pp. 271–277, April 1998.
- [10] C. Scientific, 229 Heat Dissipation Matric Water Potential Sensor Instruction Manual, 2006.
- [11] D. Robinson, T. Kelleners, J. Cooper, C. Gardner, P. Wilson, I. Lebron, and S. Logsdon, "Evaluation of a capacitance probe frequency response model accounting for bulk

electrical conductivity: Comparison with tdr and network analyzer measurements," *Vadose Zone Journal*, pp. 992–1003, November 2005.

- [12] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines," *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574–582, 1980.
- [13] G. C. Topp and J. L. Davis, "Measurement of soil water content using time-domin reflectometry (tdr: a field evaluation," Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 49, pp. 19–24, 1985.
- [14] J. Ham and E. Benson, "On the construction and calibration of dual probe heat capacity sensors," Soil Science Society of America Journal, vol. 68, pp. 1185 – 1190, 2004.
- [15] M. Thalheimer, "Tensiometer modification for diminishing errors due to the fluctuating inner water column," Soil Science Society of America Journal, vol. 67, pp. 737–739, 2003.
- [16] T. Saito, H. Fujimaki, H. Yasuda, and M. Inoue, "Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 73, pp. 1931–1937, 2009.
- [17] J. W. G.S. Campbell, C. Calissendorff, "Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method," Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 55, pp. 291–293, 1991.
- [18] D. D. Vries, Thermal properties of soil, ser. W.R. van Wijk. New York: John Wiley and Sons, 1963, pp. 210–234.
- [19] Y. Song and G. K. J.M. Ham, M.B. Kirkham, "Measuring soil water content under turfgrass using the dual-probe heat-pulse technique," *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, vol. 123, pp. 937–941, 1998.
- [20] M. Wen, G. Liu, B. Li, B. C. Si, and R. Horton, "Evaluation of a self-correcting dual probe heat pulse sensor," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 200, pp. 203–208, 2015.
- [21] G. Liu, M. Wen, X. Chang, R. Horton, and T. Ren, "A self-calibrated dphp sensor for in situ calibrating the probe spacing," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 77, pp. 417–421, 2013.

- [22] G. Liu, B. Li, R. Horton, and B. C. Si, "Analytical solution of heat pulse method in a parallelepiped sample space with inclined needles," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72, pp. 1208–1216, 2008.
- [23] Y. Mori, J. W. Hopmans, A. P. Mortensen, and G. J. Kluitenberg, "Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters," *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 561–571, 2003.
- [24] A. Valente, R. Morais, C. Couto, and J. H. Correia, "Modeling, simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method," *Sensors* and Actuators A, vol. 115, pp. 434–439, 2004.
- [25] J. A. S. Dias, W. Roque, F. W. D. Pfrimer, and E. C. Ferreira, "A combined wennerarray/heat dissipation sensor for measuring electric conductivity and moisture of soils." in *Proceedings of the CIGR*, vol. 125, 2009.
- [26] M. A. Ask, J. J. Prenger, D. Rouzan-Wheeldon, V. Rygalov, J. Norikane, and H. Levine, "Investigating local impacts of heat-pulse sensors for media moisture content," *Gravitational and Space Biology*, 2006.
- [27] J. H. Norikane, J. J. Prenger, D. T. Rouzan-Wheeldon, and H. G. Levine, "A comparison of soil moisture sensors for space flight applications," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 21, pp. 211–216, 2005.
- [28] P. C. Dias, W. Roque, E. C. Ferreira, and J. A. S. Dias, "A high sensitivity singleprobe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 96, pp. 139–147, 2013.
- [29] O. A. de Camargo, A. C. Moniz, J. A. Jorge, and J. M. A. S. Valadares, Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas, 2009.
- [30] L. Technology, LT1461 Micropower Precision Low Dropout Series Voltage Reference Family, 2012. [Online]. Available: http://cds.linear.com/docs/Datasheet/lt1461f.pdf
- [31] T. Instruments, MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1 Mixed Signal Microcontroller Datasheeet, 2011, http://www.ti.com/lit/gpn/msp430afe253.
- [32] A. Devices, ADG819/ADG820 0.5 Ohm CMOS 1.8 V to 5.5 V 2:1 Mux/SPDT Switches Data-Sheet, 2002.