



WELLINGTON ROQUE

Contribuição ao estudo do sensor de umidade do solo
que utiliza a técnica de dissipação de calor baseado
em um transistor de junção bipolar (NPN).

CAMPINAS
2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO
QUE UTILIZA A TÉCNICA DE DISSIPACÃO DE CALOR BASEADO
EM UM TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR (NPN).

Autor: Wellington Roque

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Este exemplar corresponde à versão final da Tese defendida pelo aluno Wellington Roque e orientado pelo Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

CAMPINAS

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R685c	<p>Roque, Wellington</p> <p>Contribuição ao estudo do sensor de umidade do solo que utiliza a técnica de dissipação de calor baseado em um transistor de junção bipolar <i>npn</i>. / Wellington Roque. – Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: José Antonio Siqueira Dias. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Solos - Umidade. 2. Agricultura de precisão. 3. Água e irrigação. 4. Eletrônica na Agricultura. 5. Irrigação agrícola - Automação. I. Dias, José Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	---

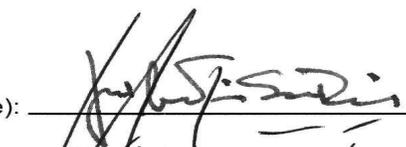
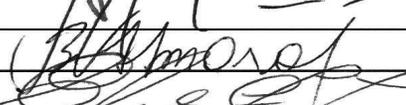
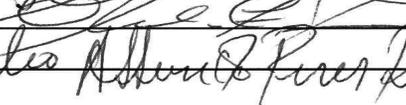
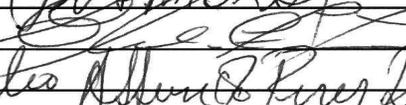
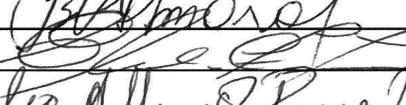
Título em Inglês:	Contribution to the study of soil moisture sensor utilizing the technique of heat dissipation based a <i>npn</i> bipolar junction transistor.
Palavras-chave em Inglês:	Soil - Moisture, Precision Agriculture, Water and Irrigation, Eletronics in agriculture, Agricultural irrigation - Automation
Área de concentração:	Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.
Titulação:	Doutor em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora:	José Alexandre França, Wellington Avelino do Amaral, Elnatan Chagas Ferreira, Tulio Assunção Ribeiro.
Data da defesa:	19/12/2012
Programa de Pós Graduação:	Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Wellington Roque

Data da Defesa: 19 de dezembro de 2012

Título da Tese: "Contribuição ao Estudo do Sensor de Umidade do Solo que Utiliza a Técnica de Dissipação de Calor Baseado em um Transistor de Junção Bipolar (NPN)"

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):  _____
Prof. Dr. José Alexandre de França:  _____
Prof. Dr. Wellington Avelino do Amaral:  _____
Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:  _____
Prof. Dr. Túlio Assunção Pires Ribeiro:  _____

Agradecimentos

Ao professor Dr. José Antonio Siqueira Dias pela orientação, não somente no sentido da palavra mas principalmente pelo o que ela representa, hoje e sempre.

Ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira, por me apoiar e confiar quando eu mais precisei.

Aos professores do Departamento DEMIC/FEE/UNICAMP, Dr. Marco Antonio Robert Alves, e Dr. Edmundo da Silva Braga pela convivência e amizade nesses anos.

Aos amigos da CG e CPG da Faculdade de Engenharia Elétrica - Unicamp.

À Faculdade de Engenharia Elétrica - Unicamp, pela oportunidade da realização do curso.

À CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudo.

A amiga Ana Elisa, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado nos momentos mais felizes e tristes da minha vida.

Aos amigos do Departamento de Eletrônica (DEMIC), Alcides Cremonesi, Alcino Biazon, Alex Dante, Anderson Spengler, Davi, Felipe Pfrimer, Hugo Bertone, Jefferson Moro, Maria Bernadete, Marcela Koyama, Rodrigo Bacurau, Luis Duarte, Sérgio, pelas sugestões e contribuições para realização deste trabalho e principalmente pelo convívio e amizade durante o tempo que passamos juntos.

Ao amigo Flávio Moraes e Pedro Dias pela imprescindível ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos da Feagri Anderson, Douglas, Laura, Túlio, Marcelo e Gelson pelo tempo que convivemos, hoje já não tão presentes, mas para sempre em meu coração.

A secretária Ester pelo carinho e dedicação.

A todos aqueles que não foram citados, mas que colaboraram para a realização deste trabalho.

A minha mãe, Luzia, você é uma gerreira, Ao meu pai, Sicardi, que sempre esteve ao meu lado em todos momentos da minha vida e sempre estará, Ao meu irmão, pela humildade, perseverança e conhecimento dedicados a mim, A minha cunhada Dr. Prof. Aline Piedade, por me dar o meu maior presente, A Julia Piedade Roque (JuJu), um pedacinho de mim, A toda minha família, Aos meus amigos.

Nenhum de nós é melhor do que todos nós juntos
UBUNTU

Resumo

A aplicação de sensores de umidade do solo, vem aumentando devido a necessidade do uso eficiente da água para irrigação. Uma das técnicas amplamente utilizadas para o desenvolvimento desses sensores é a de dissipação de calor. Nesta técnica, um elemento aquecedor é usado para aplicar um pulso de calor no solo, gerando um aumento de temperatura, o qual é mensurado e relacionado com a umidade do solo. Porém, um dos principais problemas desse tipo de sensor é sua baixa sensibilidade. Buscando resolver esse problema, foi desenvolvido um sensor que utiliza um transistor bipolar como único elemento aquecedor e transdutor de temperatura. Uma energia aplicada causa aquecimento no transistor e conseqüentemente provoca uma variação na tensão da junção base-emissor. Com isso, realizamos um estudo, a fim de determinar qual o valor ideal de energia aplicada que proporcionaria a máxima sensibilidade na medida da variação da temperatura. Para isso foram utilizados para fabricação dos sensores 16 transistores com encapsulamento metálico ($TO - 18$). Os sensores foram inseridos em amostras de solo deformadas, que foram saturadas para realização da medida da umidade do solo, através do método gravimétrico. Foram realizados com cada sensor curvas de calibração relacionando a umidade do solo com a com o valor de ΔT , para os diferentes valores de energias fornecidos no sensor. Após análise dos dados, foram escolhidos dois sensores que apresentaram maior variação entre suas curvas de calibração para serem inseridos em uma solução de Agar Agar e no Ar, realizando várias medidas nos sensores, sempre com os mesmos valores de energia, para verificar a repetibilidade dos mesmos. Os resultados mostraram que, em relação a energia aplicada no sensor, àquela que proporcionou uma maior sensibilidade em função da umidade do solo foi de $1.5J$ (25 V, 6,3 mA, 10 s). Foi constatado que a sensibilidade do sensor melhora com o aumento da potência, sendo que esta melhora é relativamente independente da energia fornecida. Em relação as medidas realizadas no Agar Agar, observamos uma melhora considerável do erro em função das medidas realizadas no solo, de 10% para o solo, para 4% no Agar Agar. Para as medidas realizadas no Ar, o valor do erro diminui para 1%. Para as medidas realizadas no solo, na solução de Agar Agar e no Ar, chegamos a conclusão que a diminuição do erro das medidas realizadas em cada um deles, ocorre devido a mudança do contato do sensor com o solo durante as medidas, visto que o solo, quando começa perder umidade ele altera o seu volume, levando a uma diminuição da superfície de contato do mesmo com o sensor. Esse erro pode ser também em função da variação da densidade do solo que ocorre durante a realização dos ensaios, causando uma diferença no valor das medidas, já citadas em outras literaturas. Observamos também que para a melhor utilização do sensor em diferentes faixas de umidade do solo, há a necessidade de alterar a energia aplicada, devido a sensibilidade do sensor ser maior para umidades mais baixas (abaixo de 30%), necessitando de um acréscimo do valor da energia aplicada para se obter uma melhor sensibilidade para umidades altas (acima de 30%).

Palavras-chave: Solos - Umidade, Agricultura de Precisão, Água e Irrigação, Eletrônica na Agricultura, Irrigação Agrícola - Automação.

Abstract

The use of soil moisture sensors is increasing due to the need for efficient use of water for irrigation. One technique widely used for the development of these sensors is the heat dissipation. In this technique, a heater element is used for applying a pulse of heat into the soil, causing a rise in temperature, which is measured and related to the soil moisture. However, a major problem of this type of sensor is its low sensitivity. To solve this problem, we developed a sensor that uses a bipolar transistor as a single element heater and temperature transducer. Energy applied to the transistor causes its heating, which in turn causes a variation on the voltage of the base-emitter junction. So we conducted a study to determine the optimal value of energy applied to provide maximum sensitivity in the measurement of temperature variation. To do this, 16 metal case TO-18 package transistors were used in the fabrication of the sensors. The sensors were inserted in deformed soil samples, which were water-saturated to perform the measurement of soil moisture using the gravimetric method. With each sensor we obtained calibration curves relating the soil moisture to the value of temperature for the different values of energy supplied to the sensor. After analyzing the data, two sensors that showed greater temperature variation in their calibration curves were chosen to be inserted into a solution of Agar Agar and in the air, in order to perform multiple measurements with the sensors at the same energy values to check their repeatability. The results showed that the energy which provided a greater sensitivity as a function of soil moisture was 1,5 J (25 V, 6,3 mA 10 s). We have found that the sensor sensitivity improves with increasing dissipated power and this improvement is relatively independent of the energy supplied. Regarding the measurements performed in Agar Agar, we observed a significantly lower error compared to the measurements taken in the soil: from 10% for the soil measurements to 4% in the Agar Agar. For the measurements made in air, the error decreased to 1%. For the measurements made in soil, in solution of Agar Agar and in air, we concluded that the decrease of the measurements errors performed in each of them occurs due to a changing in the contact between the sensor and the media during the measurements, because the soil changes its volume when it begins to lose moisture, leading to a decreased surface contact with the sensor. This error can also be due to the variation of soil density that occurs during the tests. We also observed that for the best use of this sensor in different ranges of soil moisture there is a need to change the applied power due to the higher sensitivity of the sensor for moisture content below 30%, needing an increase in the amount of this power to obtain a better sensitivity to humidity above 30%.

Keywords: Soil Moisture, Precision Agriculture, Water and Irrigation, Electronic in Agriculture, Agricultural Irrigation - Automation.

Sumário

Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do problema	3
1.2 Motivação e Justificativa	3
1.3 Objetivo Geral	3
1.3.1 Objetivos Específicos	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Técnicas de medida de dissipação de calor	4
2.2 Sensor de pulso de calor com duas pontas(DPHP)	4
2.3 Sensor de pulso de calor com multi-hastes (MPHP)	6
2.4 Sensor de pulso de calor com ponta simples (SPHP)	6
2.5 Sensor de pulso de calor com ponta no formato de botão (BHPP)	8
3 Desenvolvimento do projeto	11
3.1 Princípio de operação do sensor	12
3.2 Diagrama simplificado do interrogador	12
3.2.1 Circuito gerador de pulso de corrente	13
3.2.2 Circuito gerador do pulso de tensão	15
3.3 Calculando a temperatura usando o V_{BE} do transistor	16
3.4 Metodologia dos ensaios	17
3.5 Caracterização do transistor bipolar <i>npn</i>	18
3.6 Construção dos sensores	20
4 Resultados e Discussões	22
4.1 Resultados encontrados para medidas realizadas no solo utilizando a técnica de inter- rogação do sensor (T1)	22
4.2 Resultados encontrados para medidas realizadas no solo utilizando a técnica interro- gação do sensor (T2).	26
4.3 Análise dos resultados para as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar utilizando a técnica (T3) e (T4).	28
4.4 Amostra dos dados de V_{BE} para medidas realizadas no Agar Agar e no Ar.	35

5 Conclusão

37

Bibliografia

39

Lista de Figuras

1.1	(a) Sistema radicular da planta e a distribuição física de um solo. (b) Esquema didático da capacidade de água disponível (CAD).	2
2.1	Sensor de pulso de calor de duas hastes.	5
2.2	Sensor de umidade do solo de dissipação de calor com multi-hastes	6
2.3	Sensor de umidade do solo de dissipação de calor encapsulado com bloco cerâmico.	7
2.4	Sensor de umidade do solo coconhecido como TMAS.	7
2.5	Gráfico que relaciona a variação de temperatura em °C em função do tempo para valores de umidade do solo entre 10 e 28% para o sensor SPHP.	8
2.6	Dimensões do sensor de umidade dos solo BHPP.	9
2.7	BHPP mostrando (a) o elemento de aquecimento em forma de anel, (b) o corpo de plástico de resina acetal com um furo central de 0,6 mm de profundidade em corte, e (c) a BHPP montada	9
2.8	Gráfico que relaciona a variação da temperatura $\Delta(T)$ em função do tempo [s] para valores de umidade do solo entre 5% a 37% para o sensor BHPP.	10
3.1	Esquema básico da medida do valor de V_{BE} e aplicação do pulso de calor.	12
3.2	Diagrama de bloco do interrogador do sensor.	13
3.3	Diagrama de blocos do circuito gerador de pulso de corrente.	14
3.4	Esquemático simplificado do gerador de pulso de tensão.	15
3.5	Não linearidade do valor de $V_{BE}(T)$ em função da temperatura.	16
3.6	Valores de energia em [mJ] aplicados nos sensores utilizados nos ensaios.	17
3.7	Técnicas utilizadas para interrogação do sensor utilizadas no cálculo de ΔT	18
3.8	O valor de dV_{BE}/dT medidos nos 100 transistores bipolares do tipo <i>npn</i> utilizados para caracterização.	19
3.9	Desvio padrão das 100 amostras utilizadas no ensaio.	20
3.10	Materiais utilizados para fabricação dos sensores e do bloco poroso.	21
3.11	Utilização de cola quente e da resina spray para isolar os terminais dos transistores.	21
4.1	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para os 16 sensores metálicos com pulsos de energia de 1.5 J	23
4.2	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 com pulsos de corrente de 10 segundos e amplitude de 3,3, 4,7 e 6,3 mA com tensão de 25V.	24
4.3	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 para os diferentes valores de energia utilizados nos ensaios.	25

LISTA DE FIGURAS

4.4	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para os 16 sensores metálicos com pulsos de energia de 1,5 J.	26
4.5	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 com pulsos de corrente de 10 segundos e amplitude de 3,3, 4,7 e 6,3 mA com tensão de 25 V.	27
4.6	Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 11 com pulsos de energia para os diferentes valores de energia utilizados nos ensaios.	28
4.7	Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 3 realizadas na solução de Agar Agar.	29
4.8	Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 3 realizadas no Ar.	30
4.9	Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 11 realizadas no Agar Agar.	31
4.10	Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 11 realizadas no Ar.	32
4.11	Comparação das técnicas 1, 2 e 3 da variação de ΔT e o desvio padrão para o sensor metálico 3.	32
4.12	Comparação das técnicas 1, 2 e 3 da variação de ΔT e o desvio padrão para o sensor metálico 11.	33
4.13	Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 3 utilizando a técnica 4.	33
4.14	Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 11 utilizando a técnica 4.	34
4.15	Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 11 utilizando a técnica 4.	34
4.16	Comparação da medida do valor de V_{BE} usando a técnica (T1) para as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar.	35
4.17	Comparação da medida do valor de V_{BE} usando a técnica (T1) para as medidas realizadas no Agar Agar, no Ar, no solo à 37% e 7%.	36

Capítulo 1

Introdução

Pesquisadores que trabalham com sistemas de irrigação têm um grande interesse no estudo do gerenciamento e controle de coleta e uso de informações sobre o contínuo solo-água-planta-atmosfera buscando um melhor gerenciamento do mesmo. Para isso é inevitável a utilização de tecnologia envolvendo a instrumentação e automação.

Alguns trabalhos como o [1] tem como principal objetivo o controle e o uso eficiente da água no solo, buscando o correto fornecimento de uma quantidade adequada de água às plantas para prevenir o estresse hídrico que pode afetá-las, tanto em quantidade como em qualidade, a produção das culturas.

Em grandes sistemas de produção agrícola, principalmente em locais com irrigação em grande escala, extensas áreas cultivadas são tratadas de maneira uniforme. Isso leva a um dos maiores problemas que os técnicos e agricultores enfrentam no estabelecimento de estratégias de manejo destes sistemas, a variabilidade espacial e temporal [2].

Nesse contexto, surge um termo conhecido como “Agricultura de Precisão” que [3] define como sendo: “A aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental”.

A instrumentação e automação de sistemas agrícolas irrigados no Brasil utilizando técnicas da “Agricultura de Precisão”, ainda é muito pequena. Com o uso da eletrônica, sistemas embarcados, sensores e atuadores é possível melhorar esse quadro e buscar alternativas para o desenvolvimento e uso de instrumentação visando a aquisição, transferência e o armazenamento de dados, bem como o controle e automação desses sistemas [4].

Nos últimos anos uma série de inovações tecnológicas possibilitaram aos produtores controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo o manejo de água no solo de forma mais precisa às necessidades hídricas das culturas, de forma a possibilitar, assim, aumentos importantes na quantidade e melhorias da qualidade dos produtos explorados [5].

Para irrigar satisfatoriamente, o consumo de água das culturas deve ser bem quantificado, pois, irrigações insuficientes e frequentes, repõem água apenas na superfície do solo, não umedecendo toda a zona das raízes, ou seja, seu sistema radicular.

Irrigações excessivas também são prejudiciais, pois acarretam perda de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes. Nesse contexto, é fundamental a decisão correta de “quando” irrigar e “quanto” de água aplicar em cada irrigação. Para isso, a técnica conhecida como manejo de

água no solo faz-se necessária [6].

Segundo [7] o manejo de água no solo considera, como água disponível às plantas, aquela retida entre as tensões equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, ambos determinados em laboratório. Desta forma, considera-se como indicativo do ponto de murcha permanente o teor de água retida no solo sob tensão de 1,5 MPa e, como da capacidade de campo, o retido a 0,033 MPa para solos argilosos e 0,010 MPa para arenosos, independentemente do vegetal cultivado.

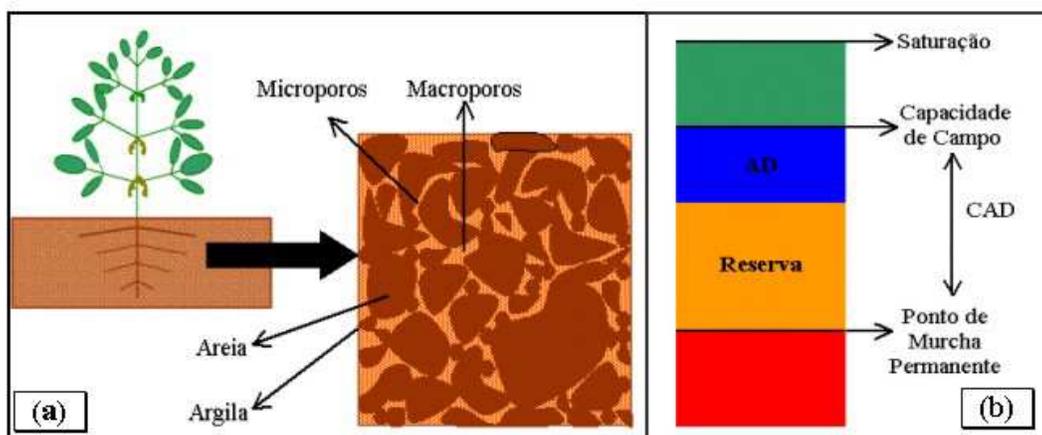


Fig. 1.1: (a) Sistema radicular da planta e a distribuição física de um solo. (b) Esquema didático da capacidade de água disponível (CAD).

O solo se constitui em um sistema trifásico, que é formado por uma parte sólida (minerais, matéria orgânica, etc.), uma parte líquida (solução do solo) e uma parte gasosa (ar do solo). A parte líquida e gasosa ocupam os espaços livres do solo que são os poros, que variam em tamanho dividindo-se em macroporos e microporos.

Os macroporos têm um diâmetro maior (superior a 0,1 mm) e por isso perdem água mais facilmente pela ação da gravidade. Já os microporos estão dispostos em forma de capilares contínuos de pequeno comprimento que se dirigem em muitas direções diferentes, e por terem um diâmetro bem menor (menor que 0,05 mm) em relação aos macroporos, têm maior capacidade de resistir à perda de água, Figura 1.1(a).

Segundo [8], a faixa de diâmetro de poros que é responsável pela retenção e disponibilização de água para as plantas é de 0,05 mm a 0,0002 mm, sendo que dos poros menores que 0,0002 mm as plantas não conseguem retirar água.

Esses espaços livres conferidos pelos poros do solo permitem que a água (da chuva ou irrigação) seja armazenada em quantidade que varia de acordo com a proporção entre macroporos e microporos. Ou seja, quanto maior a quantidade de microporos maior será a capacidade deste solo em armazenar água sem que haja perdas por gravidade e vice-versa. Dessa capacidade total de armazenamento de água no solo, a parte que as plantas conseguem absorver é conhecida como CAD (Capacidade de Água Disponível), que é uma importante informação para o manejo da irrigação.

Conforme pode ser observado, na Figura 1.1(b) a CAD de um solo é definida por dois limites de umidade. O limite superior, que é chamado de capacidade de campo (CC), é o máximo que um solo armazena de água sem que haja perdas por percolação. Isto ocorre por que neste momento a força da

gravidade exercida para baixo através do peso, entra em equilíbrio com as forças de capilaridade dos poros, cessando assim a percolação de água.

No limite inferior da CAD, que é chamado de ponto de murcha permanente (PMP), o armazenamento é tão pequeno que a planta mesmo gastando muita energia, não consegue retirar a água dos poros, porque neste momento a tensão de água no solo é muito alta (15 atm). Quando o solo está com todos os seus poros preenchidos com água, diz-se que ele está saturado ou na umidade de saturação.

1.1 Contextualização do problema

Os sensores que atualmente utilizam a técnica de dissipação de calor utilizam dois elementos para calcular o valor de ΔT (diferença entre as temperaturas inicial e final) em função da umidade do solo, um elemento aquecedor, responsável em fornecer o pulso de calor no solo, e o outro elemento sendo um medidor de temperatura, utilizados para realização da medida da temperatura inicial e final do solo.

Entretando, os resultados encontrados nos sensores que utilizam essa técnica atualmente têm baixa sensibilidade, ou seja, o valor máximo de ΔT para a faixa de umidade entre 8 e 38%, é de apenas 1 °C, como encontrados em [9], [10], [11], dificultando assim, a realização de uma medida precisa.

1.2 Motivação e Justificativa

Um novo sensor de umidade do solo *STHP* (*Single Transistor Heat Pulse*), que usa a técnica de dissipação de calor foi desenvolvido para aumentar a sensibilidade, no qual um transistor do tipo *npn* é utilizado como aquecedor e medidor de temperatura, [12]. A dificuldade está em saber qual a quantidade de energia utilizada para aquecer o transistor, que cause uma máxima variação no valor de $\Delta(T)$, sem ocasionar um desperdício dessa energia.

1.3 Objetivo Geral

Realizar um estudo no sensor de umidade do solo (*STHP*), que utiliza a técnica de dissipação de calor, a fim de determinar qual a menor energia aplicada, que proporcione a máxima sensibilidade na medida de variação de temperatura, em função da umidade do solo.

1.3.1 Objetivos Específicos

1. Desenvolver uma metodologia para fabricação dos sensores de dissipação de calor utilizando um transistor do tipo “npn”.
2. Caracterizar os transistores utilizados nos ensaios.
3. Propor e avaliar diferentes técnicas de interrogação do sensor.
4. Verificar a repetibilidade das medidas para as diferentes técnicas de interrogação do sensor, realizadas no solo e na solução de AgarAgar.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Técnicas de medida de dissipação de calor

O princípio de operação dos sensores que utilizam a técnica de pulso de calor baseia-se na variação da condutividade térmica de um material poroso, que pode ser um bloco poroso (por exemplo, feito de gesso ou cerâmica) ou o próprio solo.

A condutividade térmica do material poroso é alterada pela quantidade de água absorvida nos seus poros e, portanto, as suas propriedades de transferência de calor mudam com a quantidade de água. Através da aplicação de uma quantidade controlada de calor irradiada por um aquecedor, pode-se medir a temperatura e relacioná-la com a quantidade de água no solo.

Dentre os vários sensores utilizados para medir umidade do solo, pode-se citar quatro tipos. O primeiro utiliza duas hastes, uma para aplicar o pulso de calor e a outra para efetuar a leitura da temperatura, DPHP (*Dual Probe Heat Pulse*) [14, 15, 17]. O segundo é o MPHP (*Multi Probe Heat Sensor*), que utiliza um elemento central para produzir o pulso de calor e quatro hastes com termopares para realizar a leitura da temperatura que é feita através da média desses valores [10]. O terceiro é o SPHP (*Single Probe Heat Pulse*), que utiliza uma haste como um elemento para gerar um pulso de calor e um elemento responsável em realizar a medida da temperatura [?, 18]. O quarto é o BHPP (*Button Heat Pulse Probe*), que utiliza um anel como elemento aquecedor e um termistor para realizar a medida da temperatura, [11].

2.2 Sensor de pulso de calor com duas pontas(DPHP)

Os sensores DPHP são formados por duas hastes, montados a uma distância fixa (geralmente 6 mm), com um elemento de aquecimento em uma sonda e um elemento sensor de temperatura na outra sonda. O elemento de aquecimento é sempre um resistor fabricado por um fio de Níquel-Cromo (NiCr) e o elemento sensor de temperatura pode ser um termopar, um termistor ou um circuito integrado para a medição de temperatura. A Figura 2.1 apresenta o esquema básico de um sensor de haste dupla, [17].

Para realizar a medição da umidade do solo com estes sensores, em primeiro lugar o pulso de calor é aplicado ao elemento de aquecimento durante um período fixo de tempo t_m . A energia do pulso de calor depende da corrente controlada I_0 que é forçada no resistor R_0 de modo que a energia

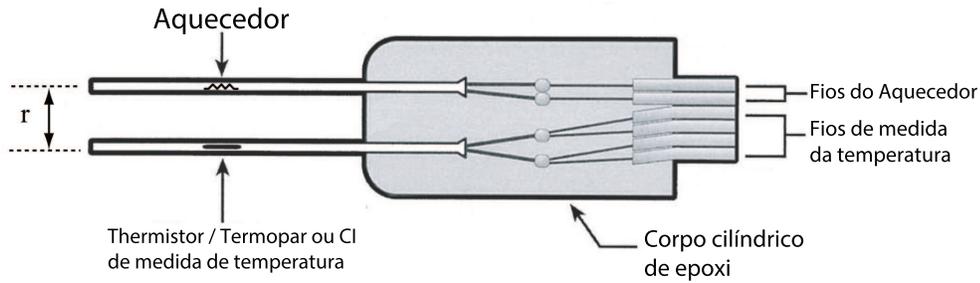


Fig. 2.1: Sensor de pulso de calor de duas hastas.

dissipada no elemento de aquecimento é dada por:

$$W_m = (R_0 I_0^2) \cdot t_m \quad (2.1)$$

O pulso de calor é dissipado através do solo e a temperatura máxima atingida no sensor é medida. O menor valor da medida da temperatura ocorre quando o solo se encontra saturado pois a energia é dissipada rapidamente. À medida que o solo vai perdendo umidade, o valor da temperatura medida no sensor começa a sofrer um acréscimo no seu valor, até alcançar seu valor máximo quando o solo se encontra seco.

Por conseguinte, após procedimento de calibração, a quantidade de água no solo pode ser determinada medindo a temperatura máxima atingida no sensor de temperatura. A relação que descreve o aumento da temperatura ΔT_m no elemento sensor localizado a uma distância r do elemento de aquecimento, como função da energia de calor q e do teor de água θ_v no solo desenvolvido por [?], é apresentado na Equação 2.2:

$$\Delta T_m = \frac{q}{e\pi r^2(1.92X_m + 2.5X_o + 4.18\theta_v)}, \quad (2.2)$$

onde q é a quantidade de calor liberado por unidade de comprimento do aquecedor (em $J \cdot m^{-1}$), e é a base do logaritmo natural, X_m, X_o são, respectivamente, as frações volumétricas de mineral e conteúdo orgânico do solo [?] e, θ_v é a fração volumétrica de água no solo. Em solos com baixo conteúdo orgânico o termo X_o é desprezado [?]. Os coeficientes de 1,92, 2,5 e 4,18 são dados em $MJ \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$.

A fração volumétrica de água no solo θ_v , dada em $m^3 \cdot m^{-3}$, é definida pelo quociente entre o volume de água e o volume de solo seco na região sob medida, que normalmente é expressa em porcentagem. Por exemplo, se 100 ml de solo seco é hidratado com 30 ml de água, diz-se que o solo resultante tem uma humidade volumétrica de 30%.

É importante notar que a Equação 2.2 foi determinada utilizando não só a teoria de transferência de calor, mas através da medição experimental exaustiva e montagem de dados [?, ?], e pode ser usada em qualquer tipo de solo .

2.3 Sensor de pulso de calor com multi-hastes (MPHP)

Alguns autores têm proposto a fabricação de sensores MPHP [?, 10, 14], com um elemento de aquecimento central e 4 (ou mais) elementos sensores distribuídos uniformemente em torno do elemento de aquecimento, como mostrado na Figura 2.2. Ao realizar uma média das leituras dos 4 elementos, os erros devidos a deflexão/flexão das sondas durante a aplicação no solo ou mesmo durante a construção podem ser minimizados.

No entanto, seu custo aumenta drasticamente, uma vez que o componente mais caro é o elemento sensor de temperatura (termopar ou termistor). Além dessa limitação do custo, o procedimento de calibração do sensor é muito demorado, uma vez que todos os elementos de detecção de temperatura devem ser calibrados individualmente.

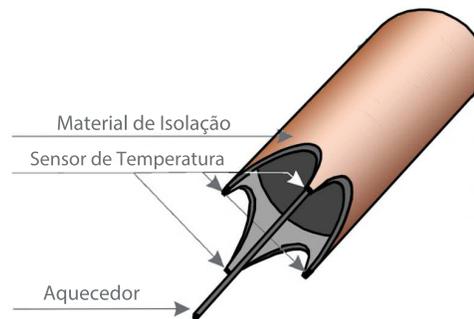


Fig. 2.2: Sensor de umidade do solo de dissipação de calor com multi-hastes

2.4 Sensor de pulso de calor com ponta simples (SPHP)

O terceiro tipo de sensor de umidade do solo com pulso de calor é o sensor com única ponta SPHP. Seu funcionamento é semelhante aos sensores DPHP e MPHP, no entanto, o elemento de aquecimento e de detecção são encapsulados na mesma haste. Os elementos de aquecimento e medidor de temperatura são montados em conjunto, tão próximo quanto possível e, em vez de medir a temperatura máxima atingida a uma distância fixa do aquecedor, um pulso de calor longo é aplicado (tipicamente 20 – 30 s) e a temperatura atingida pelo elemento aquecedor é medida imediatamente antes da fonte de calor ser desligada, como descrito em [18].

Existem basicamente duas técnicas para a fabricação de sensores SPHP. Na primeira, ambos os dispositivos de aquecimento e elemento de detecção de temperatura são encapsulados no interior do material condutor térmico, por exemplo, agulha de aço inoxidável. Para alcançar um bom caminho com baixa resistividade térmica entre os dois elementos, a agulha é preenchida com uma resina epóxi condutora térmica e encapsulada dentro de um bloco poroso, como gesso ou cerâmica. O esquemático do sensor SPHP é apresentado na Figura 2.3.

Na segunda técnica, utilizada para avaliar a umidade do solo em aplicações espaciais de voo, o elemento aquecedor e sensor são encapsulados, também muito próximos, no interior de um reves-

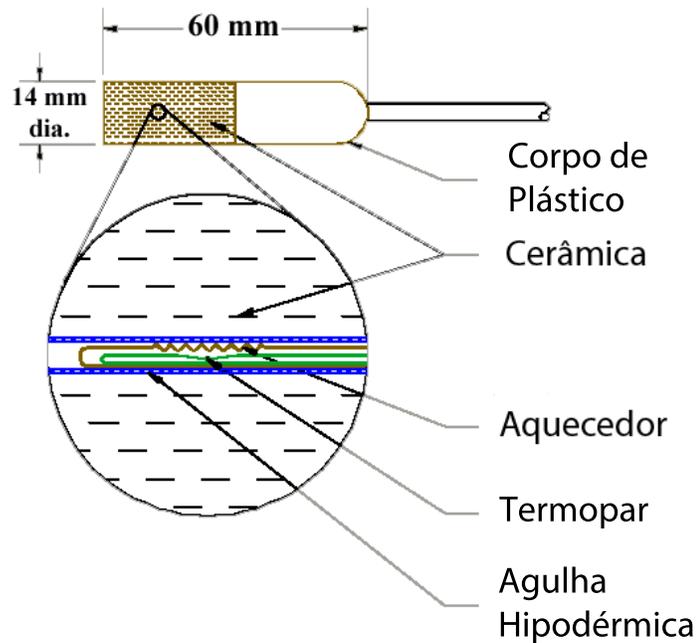


Fig. 2.3: Sensor de umidade do solo de dissipação de calor encapsulado com bloco cerâmico.

timento de resina epóxi juntamente com resina térmica condutora. Não há cerâmica que envolve o encapsulamento de epóxi, de modo que o material poroso é o solo em si.

Estes sensores são muito pequenos e leves (7,6 mm x 2,5 mm), chamados TMAS (*Temperature and Moisture Acquisition System*), estão sendo desenvolvidos e avaliados para serem utilizados em sistemas automatizados de plantas que crescem em ambiente de microgravidade, para futuros estudos de produções auto-sustentáveis no espaço. Uma fotografia dos sensores TMAS produzidos pela Orbital Technologies Inc. [?], [?] é apresentado na Figura 2.4.

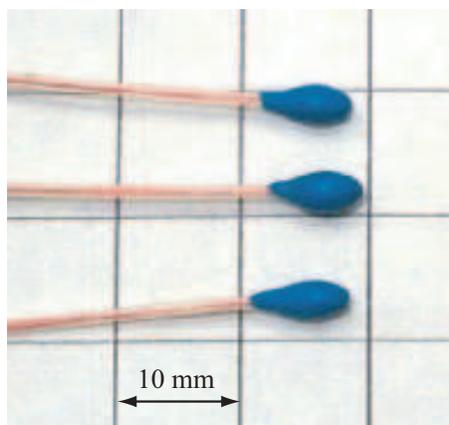


Fig. 2.4: Sensor de umidade do solo coconhecido como TMAS.

O sensor SPHP geralmente apresenta maior sensibilidade quando comparado ao DPHP, como

pode ser observado na Figura 2.5, onde apresenta uma curva do sensor fabricado pela Campbell Scientific [18]. Para a faixa de umidade do solo entre 10 - 28%, há uma variação de temperatura de aproximadamente 1,5 °C, mostrando que é necessário medir a temperatura com resolução de 0,05 °C, se for desejado detectar uma variação de 1% no valor de θ_v .

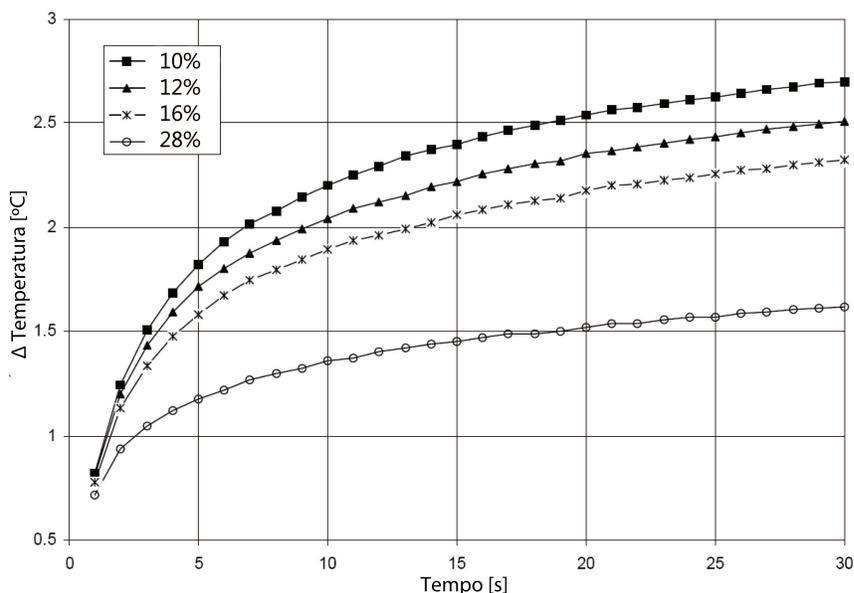


Fig. 2.5: Gráfico que relaciona a variação de temperatura em °C em função do tempo para valores de umidade do solo entre 10 e 28% para o sensor SPHP.

Isso representa aproximadamente duas vezes o valor da variação da temperatura encontrada nos sensores DPHP, que foi de 0,8 °C. Esse valor é obtido usando uma maior energia para aquecer a sonda. Embora a potência dissipada no elemento de aquecimento seja aproximadamente a mesma utilizada nos sensores DPHP (85 mW), o tempo necessário para realizar a medição é mais longo (geralmente 30 s), ao passo que para o DPHP esse tempo é de 8 – 10 s. Portanto, a energia dissipada nos sensores SPHP é cerca de 2,5 J.

2.5 Sensor de pulso de calor com ponta no formato de botão (BHPP)

A técnica BHPP [11], que assemelha-se a DPHP, apresenta uma melhora nos resultados em comparação com os sensores citados anteriormente. O BHPP não utiliza agulhas, mas em vez disso, é constituído por um elemento de aquecimento em forma de anel de 6 mm de raio e de um termistor central, ambos incorporados na face de um disco de plástico, como pode ser observado na Figura 2.6.

O sensor BHPP é construído com materiais semelhantes aos relatados por [10]. O elemento aquecedor foi moldado por tubos de aço inoxidável em torno de uma haste. O fio aquecedor é introduzido através do tubo, e o espaço restante no interior do tubo é preenchido com epóxi termicamente condutora, como pode ser visto na Figura 2.7.

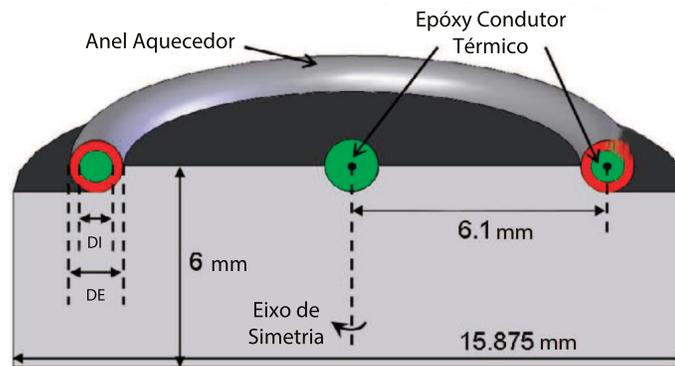


Fig. 2.6: Dimensões do sensor de umidade dos solo BHPP.

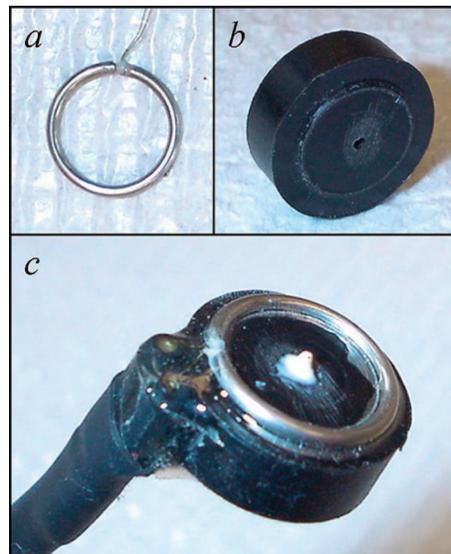


Fig. 2.7: BHPP mostrando (a) o elemento de aquecimento em forma de anel, (b) o corpo de plástico de resina acetil com um furo central de 0,6 mm de profundidade em corte, e (c) a BHPP montada

O elemento de aquecimento é unido ao corpo do sensor com cola epóxi, garantindo um contato sólido. Uma fonte de alimentação regulada é usada para fornecer cerca de 12,6 V para o aquecimento do elemento, garantindo uma energia constante durante o aquecimento. A corrente através do elemento de aquecimento é medida para determinar a entrada de calor e para verificar se a constante de aquecimento foi alcançada. O elemento aquecedor completo tem uma resistividade de $892,0 \Omega m^{-1}$. Para realizar a medida da temperatura um termistor foi inserido através de um orifício no centro do corpo do sensor e coberto com epóxi termicamente condutora.

Assim como realizado em [18], o BHPP é imerso em uma solução de Agar Agar $4 gL^{-1}$ e submetido a uma temperatura constante ($20 \pm 1^\circ C$). Uma potência térmica de $85 W^{-1}$ foi aplicada ao aquecedor por 8 s, resultando em uma entrada de calor total de cerca de $680 Jm^{-1}$ e a resposta à temperatura medida no termistor foi registrada durante 120 s, iniciando em 0,5 s após o aquecimento,

resultando em um total de 241 medições para a resposta da curva da temperatura. As medidas nos intervalos 120 s na solução de Agar Agar foram repetidas quatro vezes. Para garantir equilíbrio térmico antes de cada medição foram aguardados no mínimo 45 minutos para realização de novas medidas.

Os resultados mostraram que houve um acréscimo no valor da temperatura em torno de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para faixa de umidade de 5% a 37% de umidade do solo conforme observado na Figura 2.8.

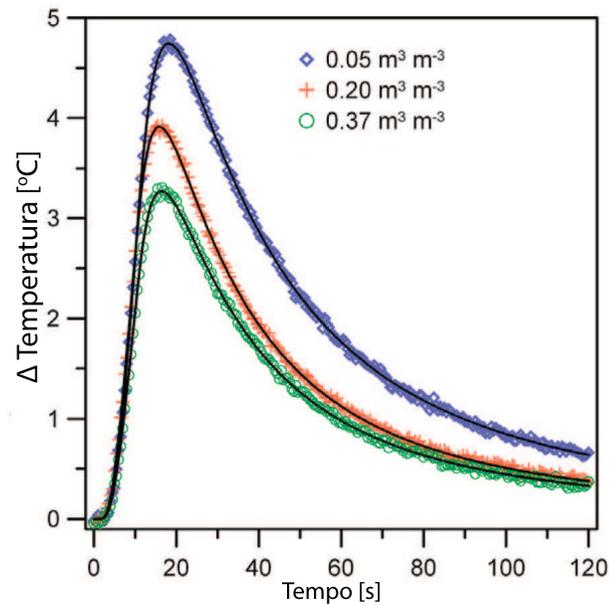


Fig. 2.8: Gráfico que relaciona a variação da temperatura $\Delta(T)$ em função do tempo [s] para valores de umidade do solo entre 5% a 37% para o sensor BHPP.

Capítulo 3

Desenvolvimento do projeto

Como exposto anteriormente os sensores de SPHP apresentam uma sensibilidade que é tipicamente duas vezes maior que dos sensores DPHP, $1,5\text{ }^\circ\text{C}$, para uma faixa de umidade entre 5 e 37% de umidade, porém ainda pequena, se desejarmos controlar a umidade do solo, por exemplo, entre 27 e 33%. Por isso estudos que investigam uma melhoria deste tipo de sensores quanto à sua sensibilidade e processo de fabricação se fazem necessários.

O primeiro trabalho a relatar o uso de um semicondutor de junção *npn* como o elemento sensor de temperatura em sensores de umidade do solo foi apresentado por [13], onde um fio de NiCr enrolado em um diodo foi envolto em um bloco poroso. Muitas técnicas modernas usam circuitos integrados para medir a temperatura [14, 15], mas eles utilizam dois elementos distintos: o dispositivo de medição de temperatura baseado em silício e um resistor de NiCr como o dispositivo de aquecimento.

Uma abordagem completamente nova foi usada [12] para empregar um transistor *npn* em um sensor de umidade do solo SPHP. Uma junção *npn* (a junção base-emissor de um transistor bipolar) foi utilizada para medir a temperatura e, ao invés de usar um outro elemento para aquecer o semicondutor, a outra junção do transistor (base-coletor) foi controlada externamente para aquecer todo o dispositivo.

A potência dissipada (P_D) em um transistor bipolar é dada pela equação:

$$P_D = I_C V_{CE} + I_B V_{BE} \quad (3.1)$$

onde o segundo termo ($I_B V_{BE}$) geralmente pode ser negligenciado, já que $I_B \ll I_C$.

Assim, para aumentar a potência dissipada em um transistor é necessário aumentar simultaneamente a corrente do coletor I_C e a tensão de coletor-emissor V_{CE} . Isto é especialmente importante quando é necessário obter uma potência elevada com uma corrente baixa. Assim, para a mesma corrente aplicada, se o V_{CE} for aumentado por um fator de 20 (por exemplo, a partir de 1 V a 20 V), a potência dissipada no transistor será aumentada por um fator de 20.

Todos os sensores disponíveis no mercado como o DPHP e o SPHP utilizam correntes na ordem de 50 mA para dissipar uma potência de 80 mW. Para ilustrar a importância desta técnica para a utilização de pequenas correntes para a dissipação de potência, em um transistor com $V_{CE} = 30$ V, será necessário apenas 2,67 mA para dissipar a mesma energia de 80 mW. Como esses sensores serão utilizados no campo geralmente alimentados com uma bateria, faz-se necessário que o gasto da energia do mesmo seja o menor possível, aumentando com isso a vida útil da bateria.

Além disso, o transistor bipolar discreto é provavelmente o dispositivo semicondutor mais conhe-

cido. Seu processo de fabricação é dominado há décadas, seus parâmetros elétricos e térmicos são bem modelados, é pequeno, leve e tem um custo muito baixo (aproximadamente 20 centavos). O corpo do metal de um transistor 2N2222 mede 4,9 mm x 5,3 mm e tem pesos inferiores a 1 g.

A seguir será discutido como um transistor do tipo *npn* foi utilizado na fabricação de um sensor de umidade do solo usando a técnica de dissipação de calor aproveitando as suas características intrínsecas.

3.1 Princípio de operação do sensor

O sensor é constituído unicamente por um transistor, onde, antes do pulso de calor, o transistor é polarizado com baixos valores de tensão e corrente (I_{Ci} , V_{CBi}). Um pulso de corrente é aplicado no transistor, e simultaneamente aumenta-se a corrente do colector I_{Cm} e a tensão de base-colector V_{CBm} . Após um pulso de corrente com duração $t_f - t_i$, volta o valor de corrente e da tensão aos seus valores iniciais I_{Ci} and V_{CBi} . O valor de V_{BE} é medido antes e após o pulso de calor, e a diferença ΔV_{BE} é usado para calcular a variação da temperatura no transistor. O diagrama dos pontos de medição da técnica de aplicação de pulsos de corrente é apresentado na Figura 3.1.

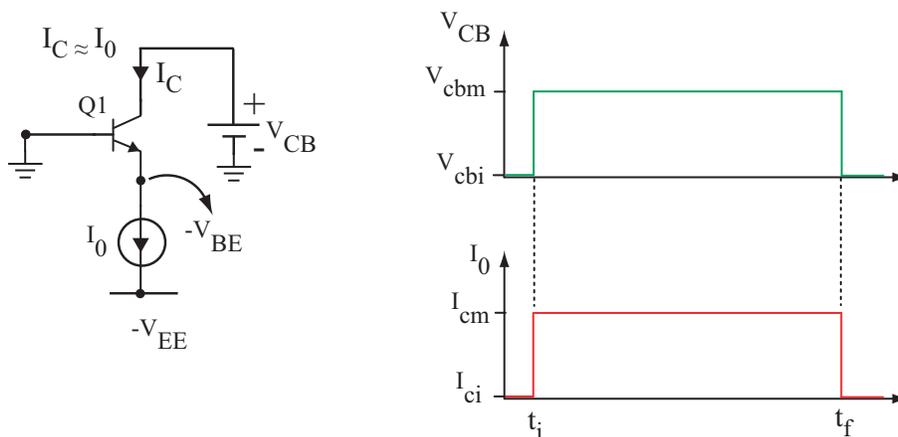


Fig. 3.1: Esquema básico da medida do valor de V_{BE} e aplicação do pulso de calor.

3.2 Diagrama simplificado do interrogador

O interrogador do sensor mostrado em [12] que aplica o pulso de calor, e mede o V_{BE} do transistor (usando um conversor A/D), os dados são armazenados em um vetor e depois transmitidos para um computador que irá processar os dados e gerar instruções para o sistema de irrigação.

A Figura 3.2 mostra um diagrama de blocos do sistema de interrogação completo, onde quatro blocos principais são mostrados: um conversor DC-DC, um circuito gerador de pulso de tensão, um circuito gerador de pulso de corrente e um microcontrolador. O equipamento é alimentado com baterias de ($\pm 9V$) e um conversor DC-DC é usado para elevar a tensão da bateria de 30 V, de modo a fornecer ao V_{CB} do transistor com 25 V.

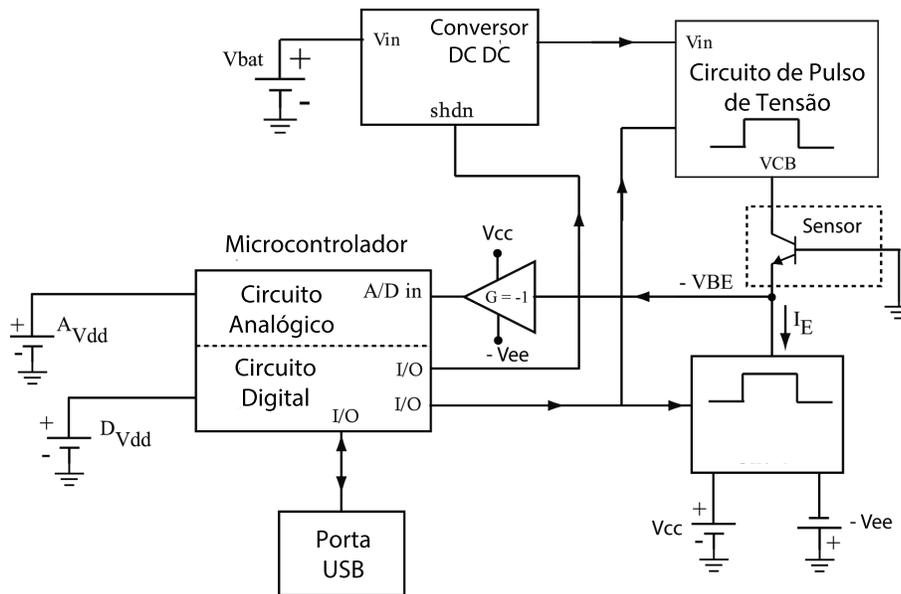


Fig. 3.2: Diagrama de bloco do interrogador do sensor.

Os geradores de pulsos de tensão e corrente são circuitos que fornecem a polarização necessária para o sensor. Um microcontrolador MSP430FE251 (TexasInstruments, 2009) com um conversor interno A/D é usado para executar o controle digital de pulsos de tensão e corrente, efetuar a conversão A/D dos valores de V_{BE} e controlar a transmissão de dados (via USB) para o computador, onde os valores das variações de temperatura do sensor são calculados.

Uma fonte de corrente é ligada ao emissor do transistor, de modo que a corrente de coletor $I_c = \alpha_F I_E$ (onde α_F é o ganho de corrente de base-comum) será praticamente independente do efeito *Early*, e das características dos transistores, uma vez que uma variação de 100 % em β_F , por exemplo, de 200 para 400, provoca uma variação de apenas 0,25 % em α_F .

Assim, se a fonte de corrente I_E é bem controlada, a potência dissipada pelo sensor será bem controlada e independente dos parâmetros do transistor. Conectar a base do transistor ao terra é uma escolha interessante, porque as tensões que precisam ser medida em V_{BE} ou aplicado em V_{CB} no circuito serão referenciadas ao terra.

3.2.1 Circuito gerador de pulso de corrente

A idéia base para produzir o pulso de corrente é por meio da comutação de duas fontes diferentes de corrente. A amplitude do pulso varia de uma corrente baixa $I_{ci} = 150 \mu A$ (que não irá aquecer o sensor quando $V_{CB} = 0$) para uma corrente de $I_{cm} = 3,3 \text{ mA}$, $I_{cm} = 4,7 \text{ mA}$, e $I_{cm} = 6,3 \text{ mA}$, o qual será mantido durante o pulso de corrente usado para aquecer o transistor. O circuito gerador de corrente desenvolvido utiliza um amplificador operacional LT1490, uma fonte de corrente, um espelho de corrente e uma chave analógica ADG819. A Figura 3.3 mostra o esquema simplificado do circuito gerador de pulsos de corrente desenvolvido.

O circuito integrado REF200 tem duas fontes de corrente de precisão de $100 \mu A$ e um espelho de corrente. No circuito desenvolvido o espelho de corrente é utilizado para dividir uma das fontes

de corrente em $100 \mu A$, a fim de produzir duas fontes de correntes idênticas de $50 \mu A$ (I_a e I_b). A segunda fonte de corrente no REF200 não é usada e não drena qualquer corrente da fonte de alimentação, se o seu pino de saída for deixado aberto. As fontes de corrente I_a e I_b estão ligados ao emissor do transistor através das resistências R_5 e R_6 , forçando o transistor fornecer um total de $100 \mu A$ para os resistores. O transistor também fornece a corrente drenada pela saída do amplificador operacional (através da resistência R_7).

Quando a chave S_2 está na posição S_i , a queda de tensão na resistência R_7 é a mesma que em R_6 . Portanto, ao fazer $R_7 = R_6$, a corrente através de R_7 também será de $50 \mu A$, e a corrente total do emissor do transistor será $150 \mu A$.

Quando a chave é alterada para a posição S_m , a queda de tensão na resistência R_7 é a mesma de R_5 e, assim, $R_5/R_7 = I_{R7}/I_{R5}$. Portanto, ao fazer $R_5/R_7 = 118$, a corrente através de R_7 será $I_{R7} = 188 * I_{R5} = 188 * 50 \mu A = 5,9 \text{ mA}$, e a corrente total aplicada no emissor do transistor será de 6 mA , como desejado. Para aplicar os outros valores de corrente ($3,3 \text{ mA}$ e $4,7 \text{ mA}$), basta ajustar o valor do resistor R_7 .

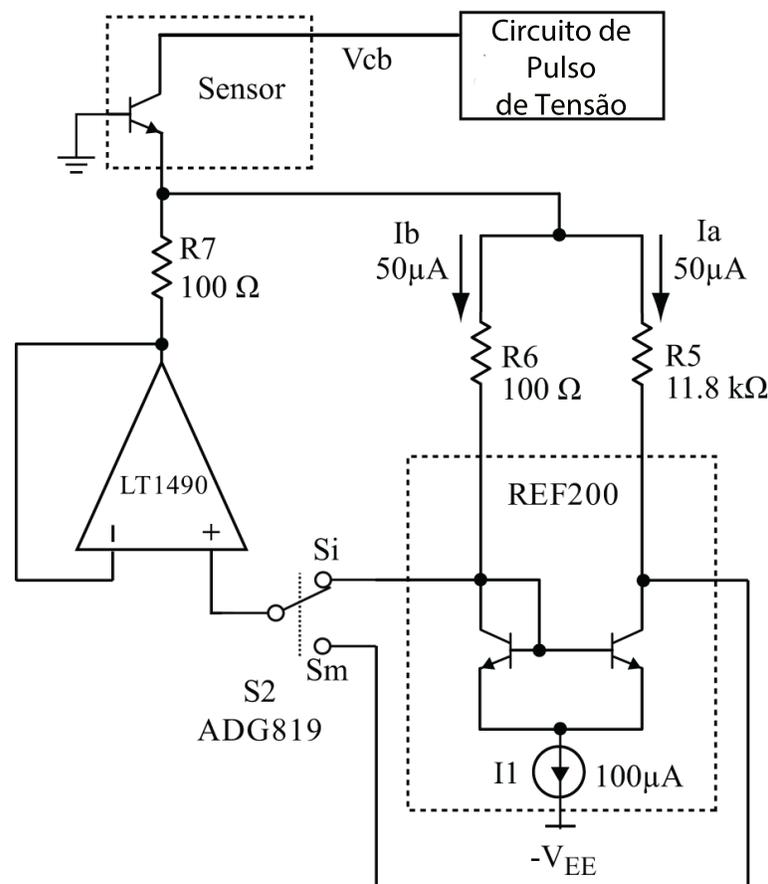


Fig. 3.3: Diagrama de blocos do circuito gerador de pulso de corrente.

3.2.2 Circuito gerador do pulso de tensão

A Figura 3.4 mostra o circuito do gerador do pulso de tensão, constituído por um regulador de tensão LTC3008, um amplificador operacional LT1490, e uma chave analógico ADG819. O regulador de tensão LTC3008 opera com uma corrente de repouso ultra-baixa ($3\mu\text{A}$), aceita tensões de entrada de até 45 V, tem um baixa tensão de saída (tipicamente 270 mV a 10 mA), e mais importante, possui um pino de ajuste com uma temperatura estabilizada de tensão $V_{REF} = 600\text{ mV}$.

A tensão de saída do LTC3008, que é utilizada como alimentação do amplificador operacional LT1490, é dada por $V_{ref} = 600\text{mV} \times (1 + R1/R2)$, e o seu valor é ajustado em $V_{reg} = 26,3\text{ V}$ usando $R1 = 475\text{ k}\Omega$ e $R2 = 11,1\text{ k}\Omega$.

A tensão V_{CB} do transistor (que está fixada em 0 V ou 25 V) é fornecida pelo amplificador operacional *rail-to-rail* LT1490, de baixo *offset* ($V_{OS} = 500\mu\text{V}$) e baixa potência. O pulso de tensão é gerado comutando (com S_1) a entrada não-inversora do amplificador entre 600 mV e 0 V. O ganho do circuito amplificador, dado por $G = (1 + R3/R4)$, é calculado para proporcionar 25 V quando há 600 mV no pino de ajuste do LTC3008. O ganho $G = 41,667$ necessário, é obtido usando resistores $R3 = 453\text{ k}\Omega$ e $R4 = 11,1\text{ k}\Omega$ de filme metálico de baixo coeficiente térmico de 0,1 %.

As chaves analógicos ADG819 utilizadas em ambos os circuitos operam com uma fonte de alimentação e aceitam até 5,5 V *rail-to-rail* de entrada. Assim, se S_1 e S_2 são alimentadas por uma fonte de ($\pm 2,5\text{V}$), as tensões mínima e máxima de entrada (600 mV a partir de S_1 e $-1,2\text{ V}$ a partir de S_2) vão cair dentro da faixa operacional especificada. As tensões de alimentação ($\pm 2,5\text{V}$) são derivadas de duas referências de tensão de dois terminais e de baixo custo LT1004.

Um amplificador operacional adicional foi necessário na configuração inversora para adaptar as tensões de saída do microcontrolador (0 V = nível baixo e 3,3 V = nível alto) para, respectivamente, 0 V e $-2,2\text{ V}$, os quais são adequados para os chaves ADG819.

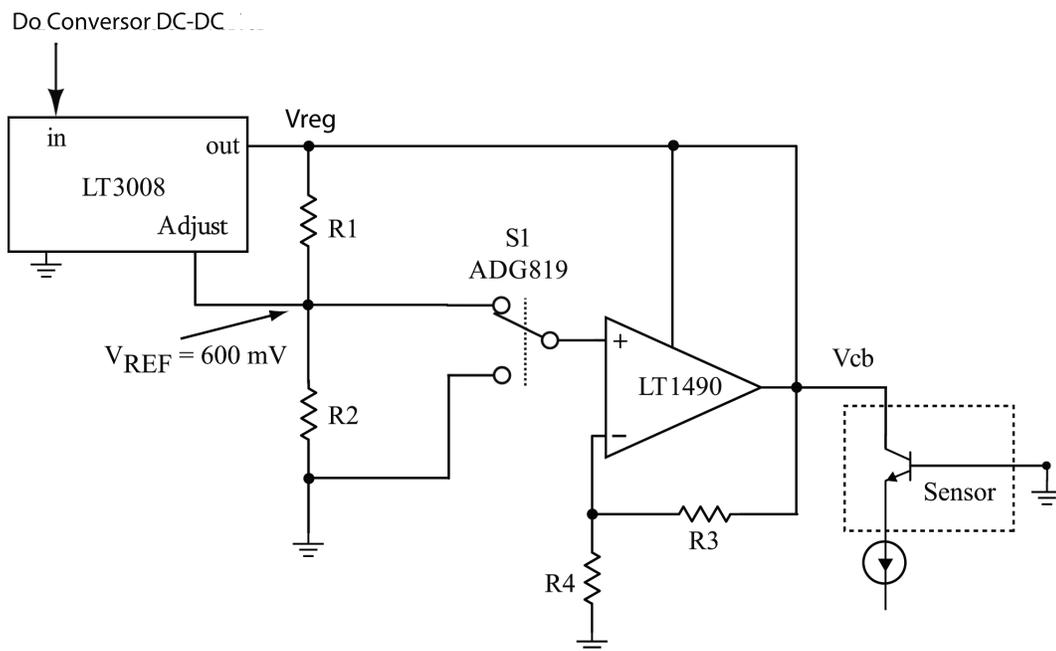


Fig. 3.4: Esquemático simplificado do gerador de pulso de tensão.

3.3 Calculando a temperatura usando o V_{BE} do transistor

O conhecimento preciso da variação de V_{BE} como uma função da temperatura é a base para a concepção de todas as referências de tensão bipolar e sensores de temperatura. Para um transistor com uma corrente de colector dada por $I_C = AT^m$ onde A é uma constante (por exemplo, se $m = 0$ a corrente do colector é independente da temperatura), a expressão que descreve V_{BE} como uma função da temperatura é [16]:

$$V_{BE}(T) = V_{G0} - \left[\frac{V_{G0} - V_{BE}(T_r)}{T_r} \right] T + (\eta - m) \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_r} \right) \quad (3.2)$$

onde V_{G0} é a tensão de bandgap do silício extrapolada para 0 K (≈ 1170 mV), k é a constante de Boltzmann, q é a carga do elétron, η é um parâmetro dependente do processo de fabricação (tipicamente $\eta \approx 3,5$), T_r é a temperatura de referência e $V_{BE}(T_r)$ é a tensão do transistor de base-emissor à temperatura T_r . O primeiro termo da equação 3.2 é uma tensão CTAT (*Complementary to Absolute Temperature*) que tem uma inclinação dada por:

$$\frac{d}{dT} \left[V_{G0} - \left(\frac{V_{G0} - V_{BE}(T_r)}{T_r} \right) T \right] = \frac{-V_{G0} + V_{BE}(T_r)}{T_r} \quad (3.3)$$

que, para valores típicos de $V_{BE} = 570$ mV medido a 300 K dá o resultado bem conhecido de -2 mV/°C.

O segundo termo da expressão $V_{BE}(T)$, apresenta uma dependência não-linear com a temperatura que é muito pequena quando comparada com o V_{BE} , como mostrado em [12], e irá ser despresada.

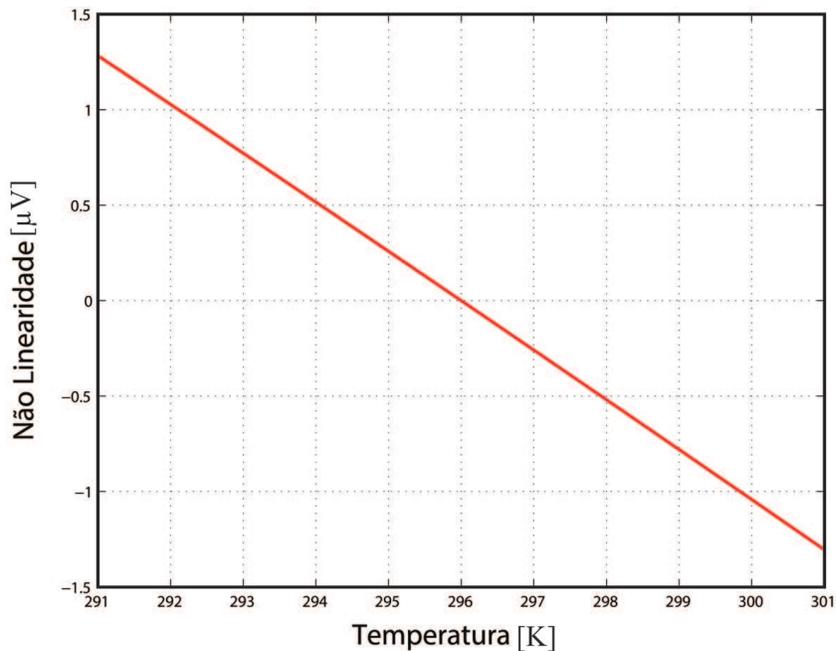


Fig. 3.5: Não linearidade do valor de $V_{BE}(T)$ em função da temperatura.

3.4 Metodologia dos ensaios

Para realização dos ensaios, foram fabricados 16 sensores utilizando transistores com encapsulamento metálico (TO-18). Os sensores foram inseridos em amostras de solo deformadas, que foram saturadas para realização da medida da umidade do solo, através do método gravimétrico.

Conhecendo o peso da massa de água e a massa do solo seco, calcula-se a umidade com base em peso ou umidade gravimétrica, em que:

$$U = \frac{m_a}{m_s} \quad (3.4)$$

em que:

U = umidade gravimétrica (kg/kg);

ma = massa de água (Kg)

ms = massa de solo seco (Kg).

Conhecendo-se a umidade, pode-se, portanto, calcular a umidade volumétrica do solo (parâmetro usualmente utilizado na área de agricultura), que é dada pela equação:

$$\theta_v = U * D_s \quad (3.5)$$

onde:

θ_v = umidade volumétrica [$m^3 \cdot m^{-3}$]

U = umidade gravimétrica [$kg \cdot kg^{-1}$]

D_s = densidade do solo [$Kg \cdot dm^{-3}$]

Para fornecer o pulso de calor no solo, utilizando o transistor, foram fornecidos para cada ensaio um valor de energia diferente, onde para um mesmo valor de tensão de 25 Volts, três valores de amplitudes de corrente foram utilizados, 3,3 mA, 4,7 mA e 6,3 mA, e quatro tempo de duração, 5 s, 10 s, 15 s e 20 s, resultando em 12 combinações possíveis de energia, como mostra a Figura 3.6.

Tensão [V]	Corrente [mA]	Energia em 5 s: [mJ]	Energia em 10 s: [mJ]	Energia em 15 s: [mJ]	Energia em 20 s: [mJ]
25	3,3	412,50	825,00	1.237,50	1.650,00
	4,7	587,50	1.175,00	1.762,50	2.350,00
	6,3	787,50	1.575,00	2.362,50	3.150,00

Fig. 3.6: Valores de energia em [mJ] aplicados nos sensores utilizados nos ensaios.

As medidas da tensão V_{BE} nos transistores foram realizada em três fases, antes, durante e depois da aplicação da energia, obtendo respectivamente 5, 185 e 10 amostras em cada fase, um total de 200 pontos amostrados. Foi desenvolvido um programa em LabView para armazenar os valores desses 200 pontos medidos de (V_{BE}) para poderem serem visualizados em um gráfico. Esses valores também eram inseridos em uma planilha para realização do cálculo do valor de ΔT .

Para o cálculo do valor de ΔT , foram propostas quatro técnicas diferentes de interrogação dos sensores, onde os valores de (V_{BE}) utilizados eram de diferentes posições do vetor, como explicado a seguir:

- Técnica (T1): As medidas do V_{BE} utilizadas foram, na posição 1 (antes do pulso) e na posição 190 (após o pulso);

- Técnica (T2): As medidas do V_{BE} utilizadas foram, na posição 6 (durante o pulso) e na posição 185 (durante o pulso)
- Técnica (T3): As medidas do V_{BE} utilizadas foram, na posição 6 (durante o pulso) e na posição 150 (durante o pulso)
- Técnica (T4): As medidas do V_{BE} utilizadas foram, na posição 1 (antes do pulso) e na posição 190 (após o pulso)

Cada técnica utilizada está representada respectivamente como sendo T1, T2, T3 e T4, de acordo com a Figura 3.7.

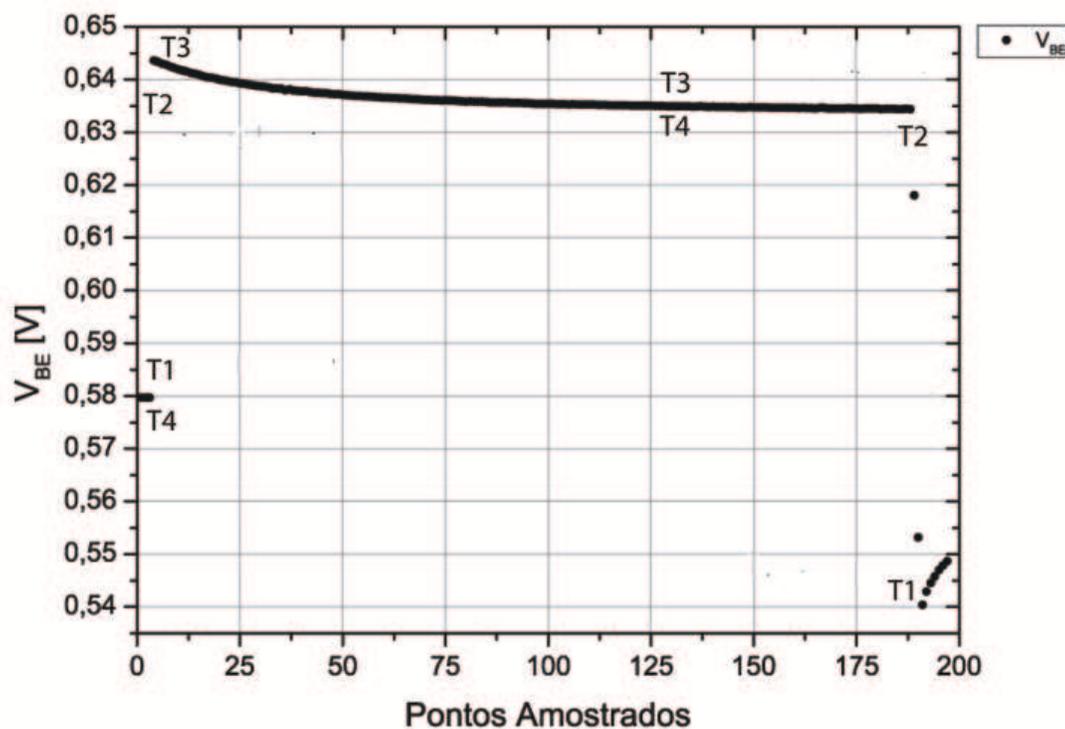


Fig. 3.7: Técnicas utilizadas para interrogação do sensor utilizadas no cálculo de ΔT .

3.5 Caracterização do transistor bipolar *npn*

Para caracterização dos transistores foi realizado ensaios com 100 transistores bipolares do tipo *npn*. Para cada transistor foi medido o V_{BE} em função da temperatura (T_r), aplicando sobre eles uma mesma corrente de polarização.

Na Figura 3.8, é exibido um histograma que indica o número de transistores em cada faixa de dV_{BE}/dT . Pode ser observado que a grande maioria dos sensores apresenta o valor aproximado de $-2,08 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

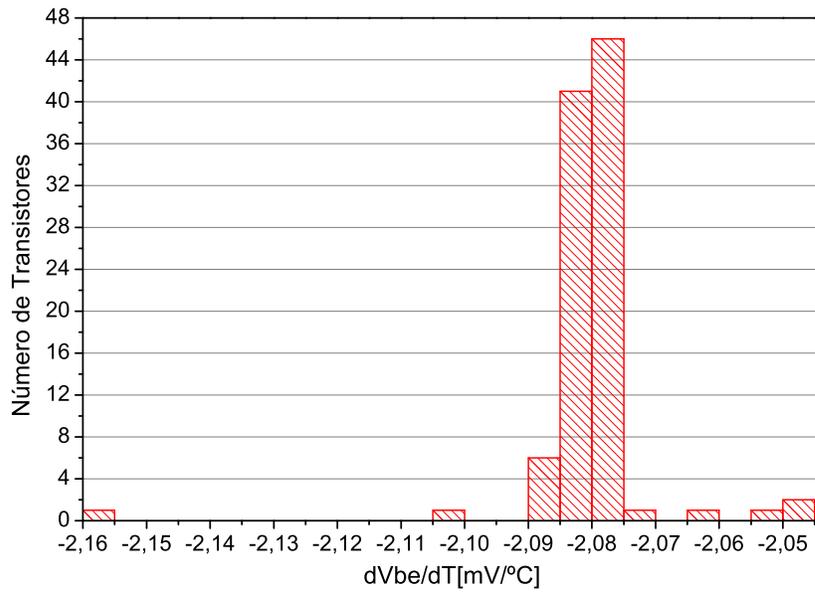


Fig. 3.8: O valor de dV_{BE}/dT medidos nos 100 transistores bipolares do tipo *npn* utilizados para caracterização.

Outro dado que pode ser observado na Figura 3.9, é o erro de dV_{BE}/dT em relação a média dos 100 transistores, onde a maioria dos sensores ficaram dentro de uma faixa de erro de menos de 0,5% de variação.

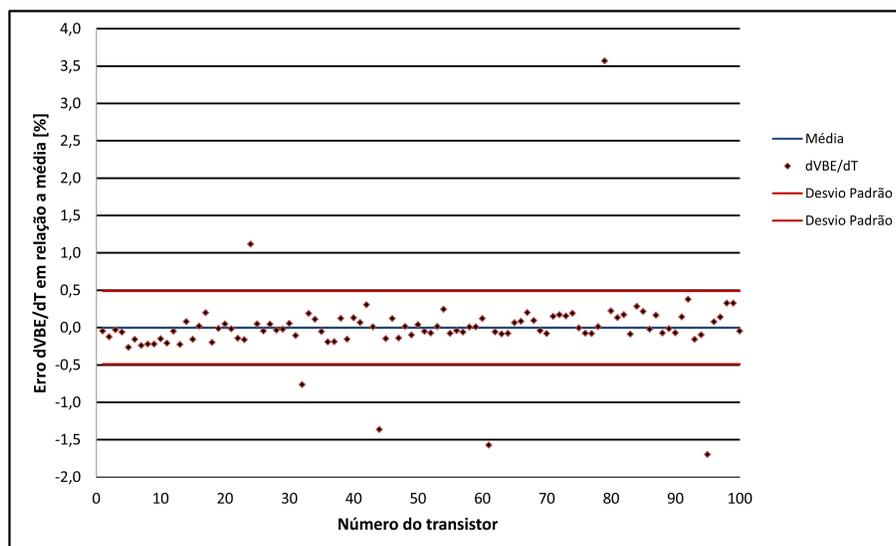


Fig. 3.9: Desvio padrão das 100 amostras utilizadas no ensaio.

3.6 Construção dos sensores

A construção dos sensores foi realizada no laboratório LIS (Laboratório de Instrumentação e Sensores) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE/UNICAMP), no município de Campinas-SP.

O solo sendo um material expansivo quando saturado mantém uma boa resistência de contato com o transistor, mas basta que ele comece a perder umidade que esse contato começa a ser prejudicado. Devido a essa característica buscou-se inicialmente um molde para que fosse possível encapsular o transistor em um bloco poroso de gesso, buscando com isso um melhor contato entre o sensor e o solo. Pois, mesmo que a cápsula porosa perca contato com o solo, a interface entre o sensor e a cápsula permanece a mesma.

Inicialmente foram utilizados diversos tipos de recipientes de formas diferentes para fabricação como molde do bloco poroso, mostrado na Figura. 3.10.

Como esses sensores seriam inseridos no solo úmido os terminais dos transistores teriam de ser isolados, pois qualquer quantidade de água que entrasse em contato com os terminais, causaria erros na medida ou a queima do componente. Inicialmente, buscando essa isolação dos terminais do transistor foi utilizado cola quente, como observado na Figura 3.11. Com essa técnica a maioria dos sensores, quando imersos em água não funcionaram adequadamente pois não ficaram devidamente isolados.

Para resolver esse problema foi utilizado um verniz que protegeu e isolou esses terminais. Esse verniz além de resolver o problema da isolação permitiu uma melhor manipulação dos sensores, Figura 3.11.

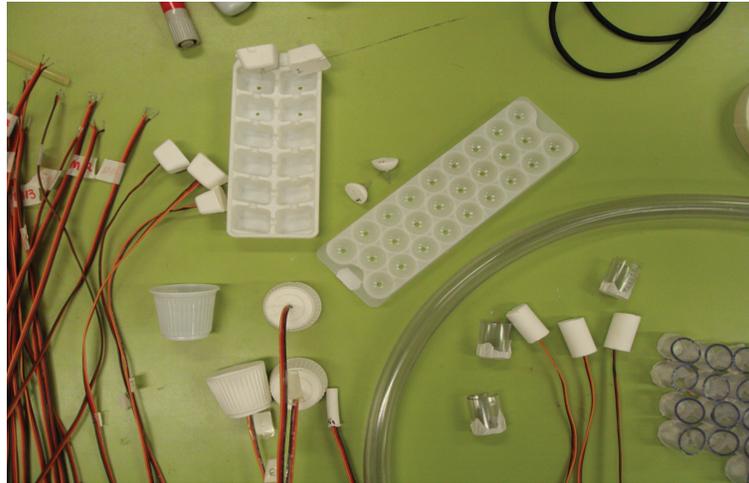


Fig. 3.10: Materiais utilizados para fabricação dos sensores e do bloco poroso.



(a) Cola quente.



(b) Resina spray.

Fig. 3.11: Utilização de cola quente e da resina spray para isolar os terminais dos transistores.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Entre os 16 sensores utilizados para realização dos ensaios, os que tiveram melhores respostas foram escolhidos para serem discutidos neste capítulo. Para uma melhor compreensão dos dados, eles serão apresentados variando-se a potência e a energia fornecida nos sensores para diferentes valores de umidade.

4.1 Resultados encontrados para medidas realizadas no solo utilizando a técnica de interrogação do sensor (T1) .

Os 16 sensores com encapsulamento metálico foram analisados para diferentes energias, mas a que apresentou uma melhor resposta foi a de 1,5 J. A Figura 4.1, mostra que a grande maioria dos sensores apresentou uma variação máxima do valor de ΔT de aproximadamente 4 °C (16 °C a 20 °C), para uma faixa de umidade de 8% a 42% de umidade do solo.

Alguns sensores, como o M4, M5 e M12, tiveram um valor de ΔT ainda maiores, de aproximadamente 6 °C. Esses valores são 4 vezes maiores do que o sensor BPHP, que foi o que obteve uma máxima variação do valor de ΔT , de aproximadamente 1,5 °C, para uma faixa de umidade de 5% a 37%, apresentados em [11].

Os resultados apresentados na Figura 4.2 mostram diferentes valores de energia (0,8 J, 1,1 J e 1,5 J) fornecidos no sensor metálico 7 para diferentes valores de umidade do solo.

Para o valor de energia de 0,8 J e 1,1 J a máxima variação de ΔT foi de aproximadamente 3,5 °C, já para a energia de 1,5 J, esse valor sobe para 6 °C.

Se compararmos com os os sensores apresentados anteriormente, como o DPHP [17] , MPHP [10] , SPHP [18], que tiveram o valor máximo de ΔT em torno de 1 °C para uma faixa de umidade do solo em torno de 5% a 37%, observa-se que para esse valor de ΔT de 1 °C para os resultados apresentados na Figura 4.2, é obtido para faixa de umidade entre 30% a 35%, com isso, aumenta-se bastante a sensibilidade do sensor apresentados nesse trabalho em relação aos outros sensores.

A Figura 4.3, mostra os resultados dos 16 sensores utilizados nos ensaios, submetidos aos diferentes valores de energias, esses valores já foram apresentados na figura 3.6.

Observa-se que esse valores tendem a se agruparem em função da potência fornecida que foi de 82 mW, 117,5 mW e 157,5 mW, independente da energia aplicada. Isso mostra que para aumentar o valor máximo obtido no cálculo de ΔT é preciso aumentar o valor da potência e não da energia.

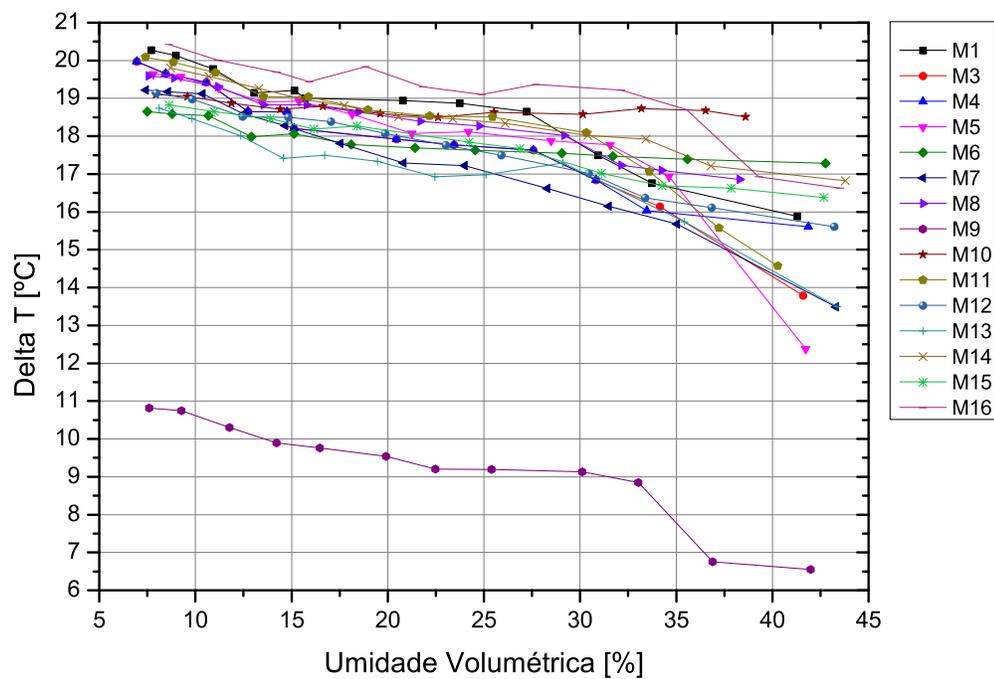


Fig. 4.1: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para os 16 sensores metálicos com pulsos de energia de 1.5 J

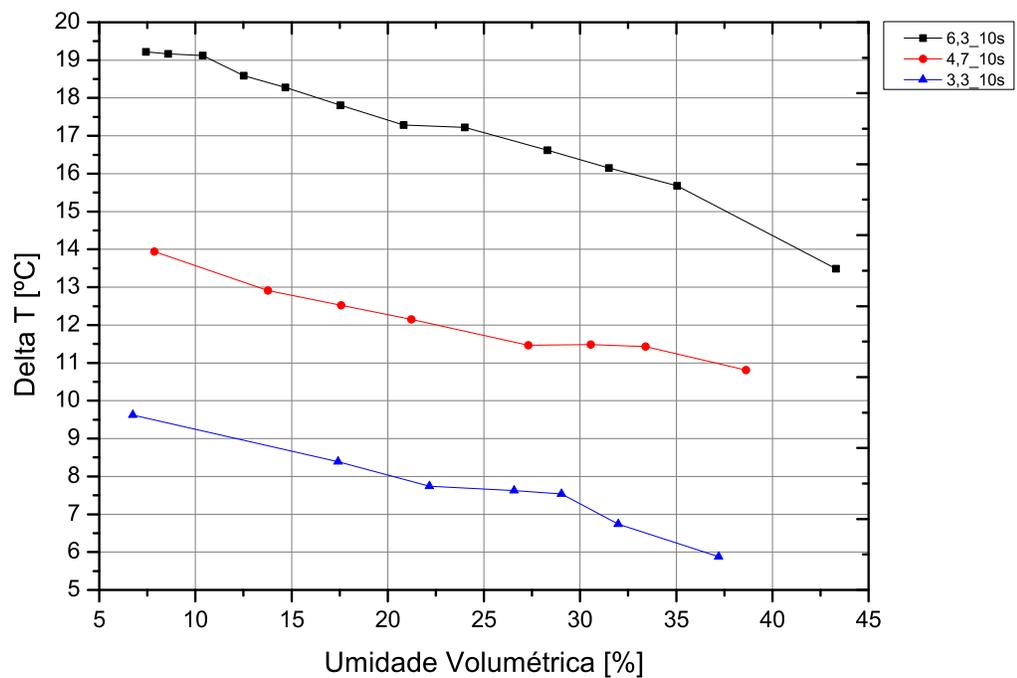


Fig. 4.2: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 com pulsos de corrente de 10 segundos e amplitude de 3,3, 4,7 e 6,3 mA com tensão de 25V.

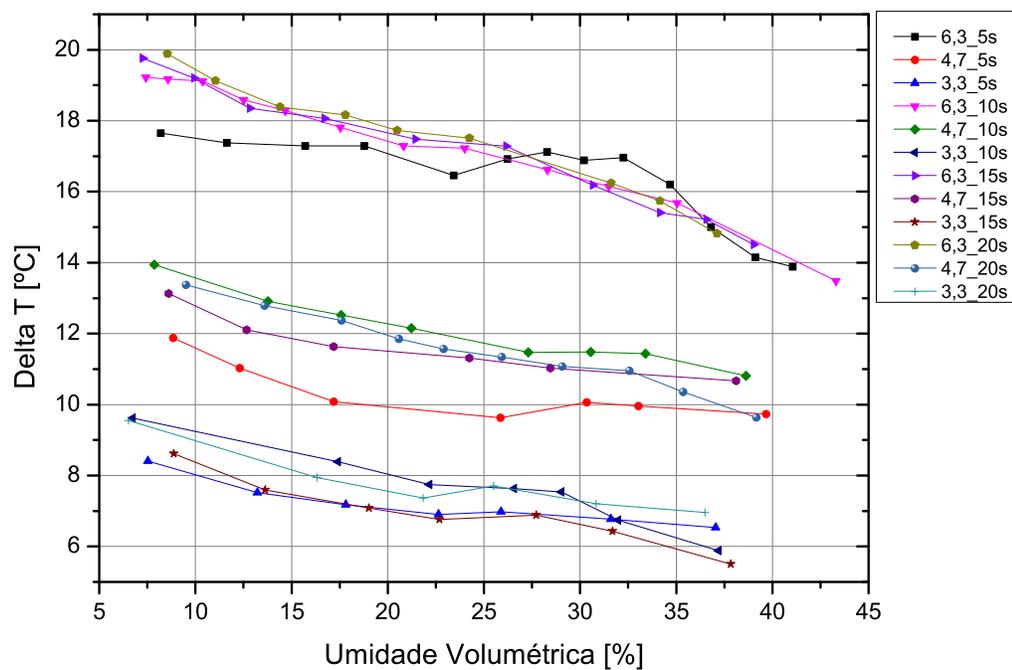


Fig. 4.3: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 para os diferentes valores de energia utilizados nos ensaios.

4.2 Resultados encontrados para medidas realizadas no solo utilizando a técnica interrogação do sensor (T2).

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através da técnica de interrogação 2 (T2) do sensor, já descrita anteriormente.

Os 16 sensores com encapsulamento metálico foram analisados para diferentes energias, mas a que apresentou uma melhor resposta foi a de 1,5 J. A Figura 4.4, mostra que a grande maioria dos sensores apresentou uma variação máxima do valor de ΔT de aproximadamente 1,5 °C (4,5 °C a 6 °C), para uma faixa de umidade de 8% a 42% de umidade do solo.

Alguns sensores, como o M4, M5, M11 e M12, tiveram um valor de ΔT ainda maiores, de aproximadamente 2 °C. Esses valores são aproximadamente os mesmos encontrados nos sensor BPHP, que foi de aproximadamente 1,5 °C, para uma faixa de umidade de 5% a 37%, apresentados em [11].

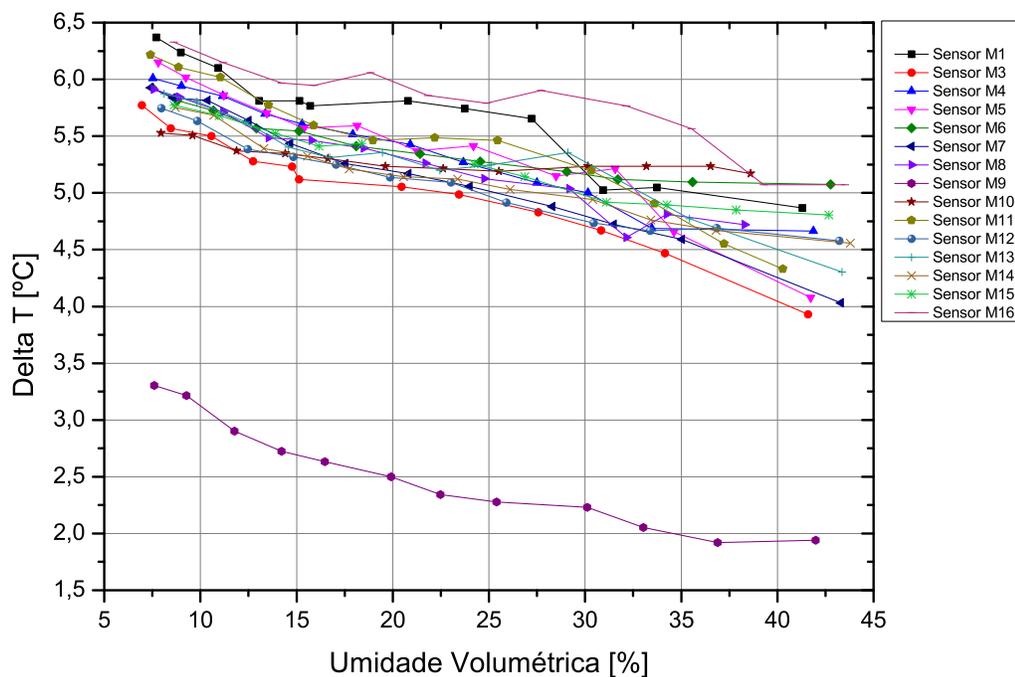


Fig. 4.4: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para os 16 sensores metálicos com pulsos de energia de 1,5 J.

Os resultados apresentados na Figura 4.5 mostram diferentes valores de energia (0,8 J, 1,1 J e 1,5 J) fornecidos no sensor metálico 7 para diferentes valores de umidade do solo.

Para o valor de energia de 0,8 J e 1,1 J a máxima variação de ΔT foi de aproximadamente 1 °C, já para a energia de 1,5 J, esse valor sobe para 2 °C.

Se compararmos com os os sensores apresentados anteriormente, como o DPHP [17], MPHP [10], SPHP [18], que tiveram o valor máximo de ΔT em torno de 1 °C para uma faixa de umidade do

solo em torno de 5% a 37%, ainda assim, utilizando a técnica de interrogação do sensor 2 (T2), conseguimos uma máxima variação de ΔT maiores que os observados nas literaturas mencionadas.

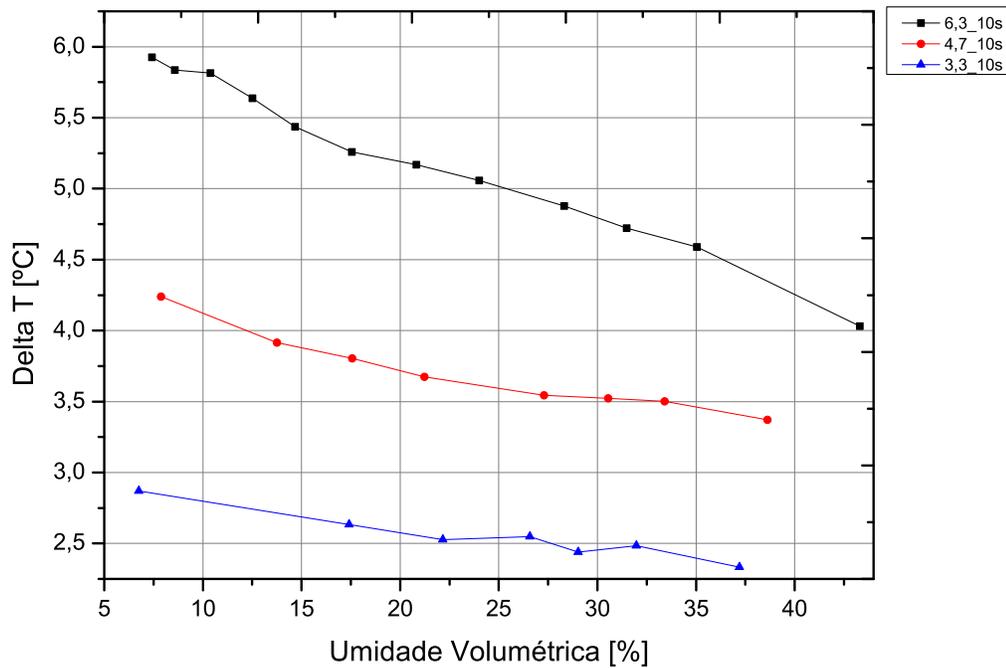


Fig. 4.5: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 7 com pulsos de corrente de 10 segundos e amplitude de 3,3, 4,7 e 6,3 mA com tensão de 25 V.

A Figura 4.6, mostra os resultados dos 16 sensores utilizados nos ensaios, submetidos aos diferentes valores de energias, esses valores já foram apresentados na figura 3.6.

Observa-se, novamente, assim como obtido na técnica de interrogação do sensor 1 (T1), que esse valores tendem a se agruparem em função da potência fornecida que foi de 82 mW, 117,5 mW e 157,5 mW, independente da energia aplicada. Isso mostra que para aumentar o valor máximo obtido no cálculo de ΔT é preciso aumentar o valor da potência e não da energia.

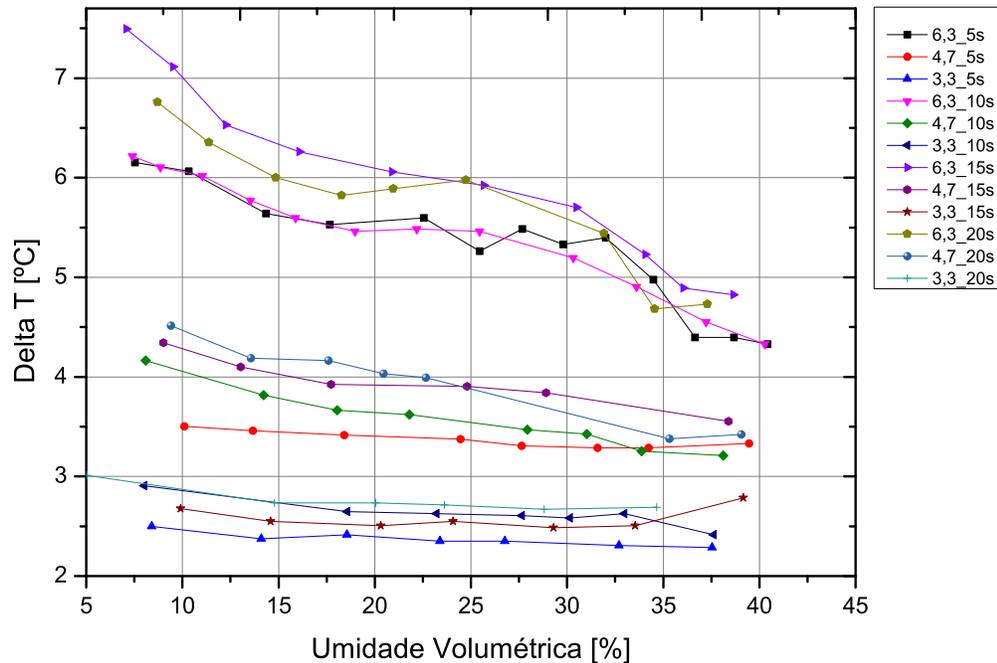


Fig. 4.6: Variação de ΔT em função da umidade volumétrica para o sensor metálico 11 com pulsos de energia para os diferentes valores de energia utilizados nos ensaios.

4.3 Análise dos resultados para as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar utilizando a técnica (T3) e (T4).

Após avaliar os resultados foram escolhidos dois sensores que apresentavam maior variação no valor de ΔT em relação aos demais sensores utilizados nos ensaios, os sensores metálicos 3 e 11. Com eles foram realizados testes no Agar Agar, representando o solo saturado, e testes no Ar, representando o solo seco.

O objetivo desses ensaios foi observar se os dados teriam uma melhor repetibilidade na medida de ΔT para as mesmas condições, pois para os ensaios realizados no solo, a interface do sensor com o solo alterava-se durante as medidas, alterando os resultados medidos de ΔT .

As técnicas utilizadas para interrogação do sensor nos ensaios realizados no Agar e no Ar, foram as mesmas técnicas utilizadas para as medidas realizadas nas amostras de solo deformadas, que foram as técnicas 1 (T1), 2 (T2), 3 (T3) e 4 (T4), já explicadas anteriormente na Figura 3.7.

A técnica de interrogação do sensor chamada de T3 foi utilizada, pois foi observado após a análise dos resultados, que no final da curva o valor de V_{BE} tende a ter uma pequena variação no seu valor, ocorrendo imprecisões para o cálculo de ΔT , pois o mesmo apresenta grande sensibilidade em função do valor de V_{BE} .

Já, a técnica de interrogação do sensor 4 (T4), apresenta uma diferença fundamental em relação as

outras técnicas, o valores usados para comparação em função da umidade do solo, foram os próprios valores de ΔT , ou seja, foi calculado um ΔV_{BE} do transistor e não um ΔT como nas outras técnicas.

Os erros das técnicas de interrogação dos sensores, encontrados nos ensaios do sensor metálico 3, realizadas no Agar Agar e no Ar são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8. Os erros maiores são encontrados na solução de Agar Agar ficando em $\approx 10\%$ para a técnica (T1), que foi a que apresentou os piores resultados, e em $\approx 2\%$ para técnica (T4) que apresentou melhores resultados. Para as medidas realizadas no ar os erros encontrados foram em $\approx 0,5\%$ para a técnica (T1) e menor do $0,5\%$ para a técnica (T4).

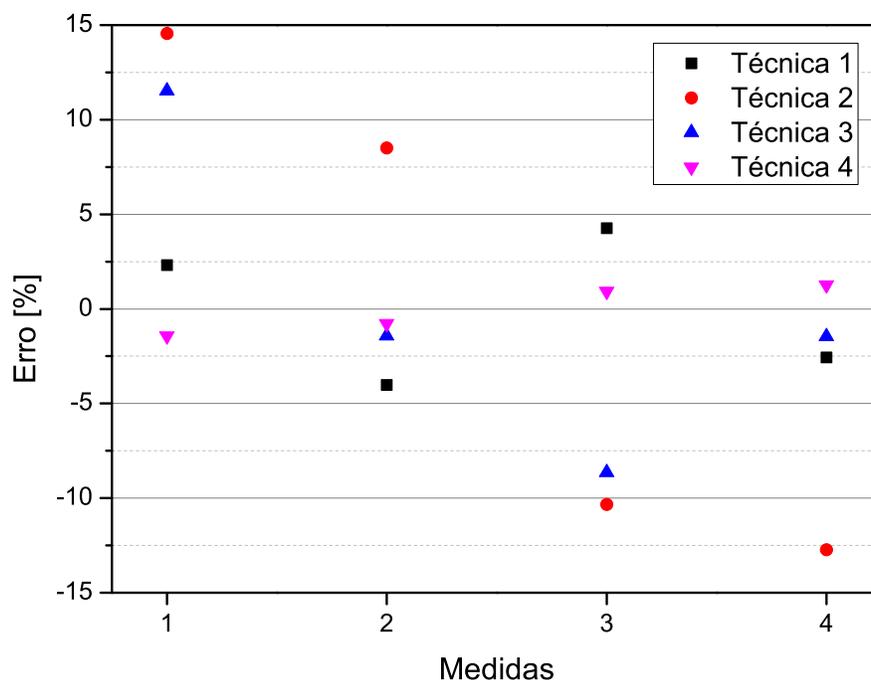


Fig. 4.7: Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 3 realizadas na solução de Agar Agar.

Os erros das 4 técnicas para o sensor metálico 11 realizadas no Agar Agar e no ar são apresentados na Figura 4.9 e 4.10. Esse sensor mostrou-se mais estável, em relação ao metálico 3, em realização das medidas realizadas anteriormente no solo, os valores encontrados foi de $\approx 5\%$ para a técnica (T1) e $\approx 0,5\%$ para a técnica (T4).

As valores dos erros das medidas realizadas no Ar no sensor metálico 11 ficaram em $\approx 1\%$ para a técnica (T1) e para a técnica (T4).

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram o máximo valor de ΔT e o desvio padrão para os sensores metálicos 3 e 11 respectivamente, comparando as técnicas 1 (T1), 2 (T2), 3 (T3), e, para as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar, como se fossem respectivamente, solo saturado e solo seco.

A técnica que apresentou o máximo valor de ΔT foi a técnica (T1), $\approx 1\%$, mas foi também a que obteve um maior desvio padrão entres a técnicas, de $\approx 1^\circ\text{C}$, e a técnica (T3) mostrou ser a técnica que

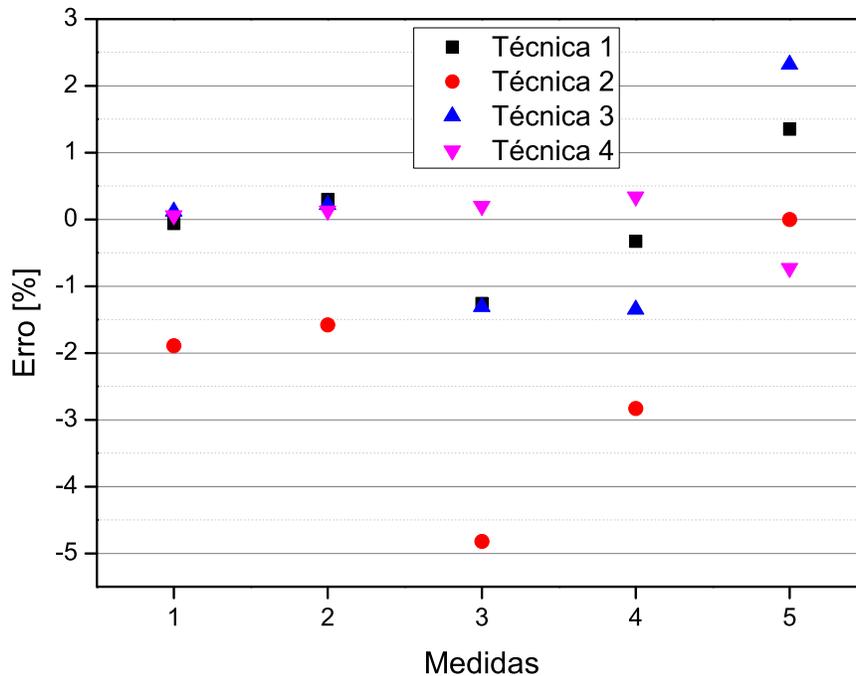


Fig. 4.8: Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 3 realizadas no Ar.

obteve uma menor variação de ΔT , porém o seu desvio padrão também foi menor, de $\approx 0,13^\circ\text{C}$.

A técnica (T4) não foi comparada com as demais técnicas, pois como já explicado anteriormente, a técnica (T4) trata-se de uma abordagem diferente, onde os valores utilizados para comparação com as medidas no Agar Agar e no solo, são os valores de ΔV_{BE} e não de ΔT , assim não podendo ser comparadas.

Por isso, os resultados encontrados através da técnica (T4), serão discutidos a seguir individualmente.

O máximo valor de ΔV_{BE} , obtido através da técnica (T4), realizadas também nos sensores metálico 3 e 11 são mostrados nas Figuras 4.13 e 4.15, para os ensaios realizados no Agar Agar e no Ar, como feito anteriormente. Os dois sensores metálicos 3 e 11 tiveram uma variação do valor de ΔV_{BE} de $\approx 0,65\text{V}$ e o desvio padrão de $\approx 0,06\text{V}$.

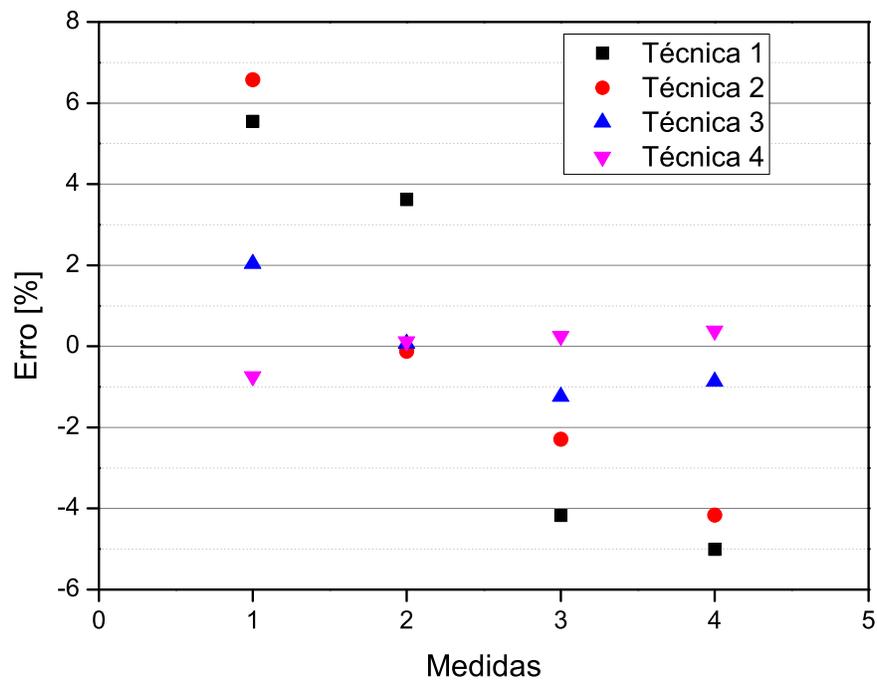


Fig. 4.9: Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 11 realizadas no Agar Agar.

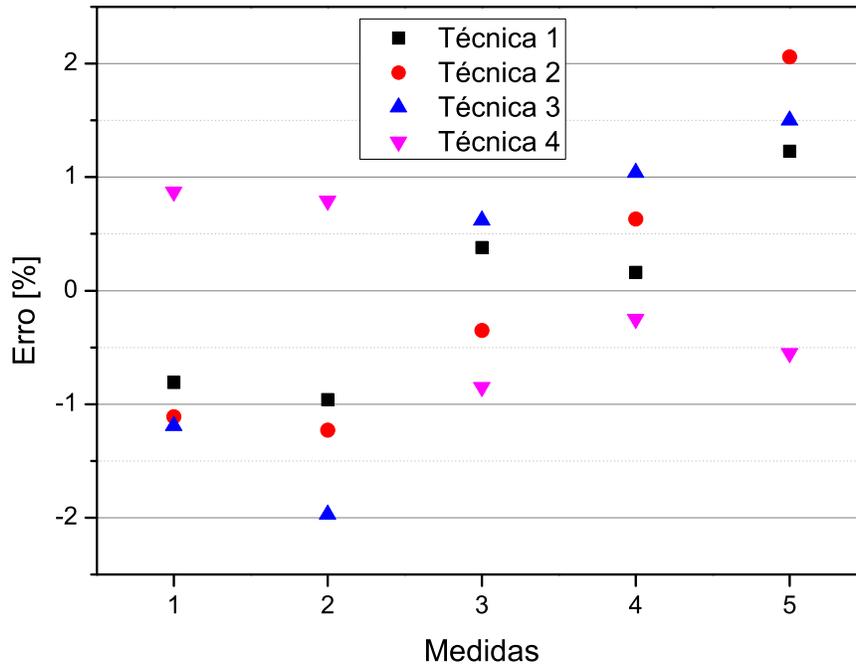


Fig. 4.10: Erros das 4 técnicas utilizadas para o cálculo do valor ΔT no sensor metálico 11 realizadas no Ar.

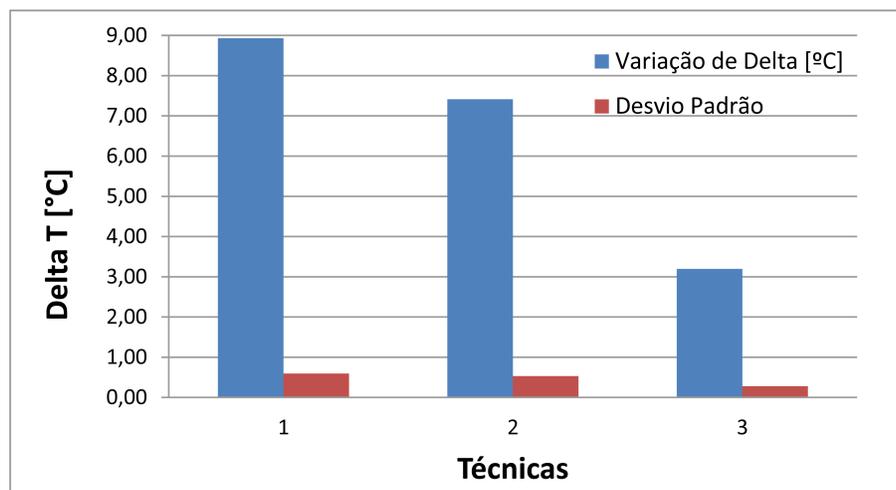


Fig. 4.11: Comparação das técnicas 1, 2 e 3 da variação de ΔT e o desvio padrão para o sensor metálico 3.

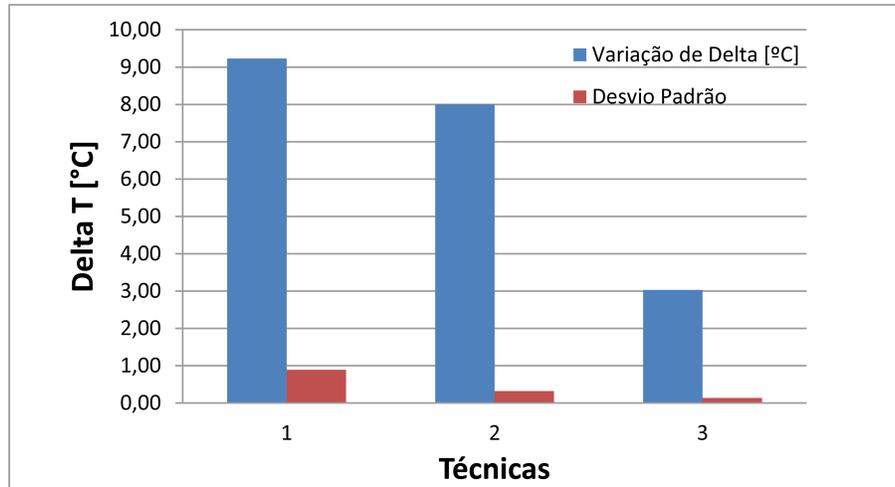


Fig. 4.12: Comparação das técnicas 1, 2 e 3 da variação de ΔT e o desvio padrão para o sensor metálico 11.

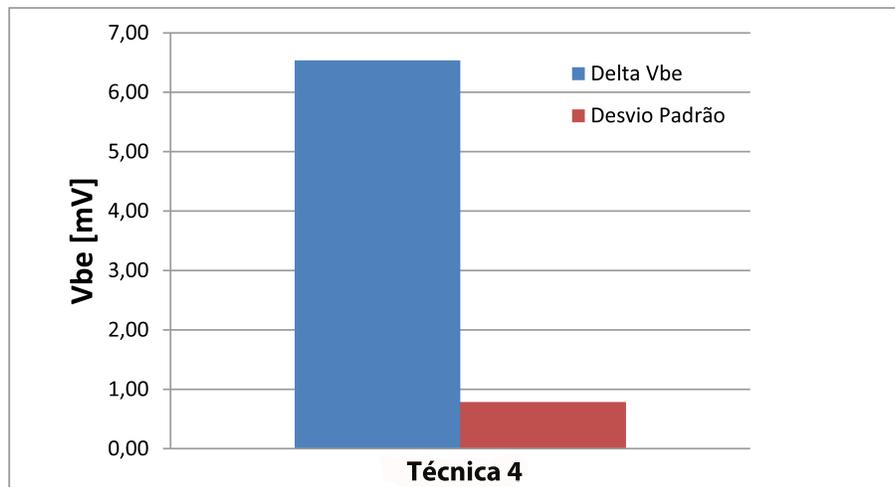


Fig. 4.13: Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 3 utilizando a técnica 4.

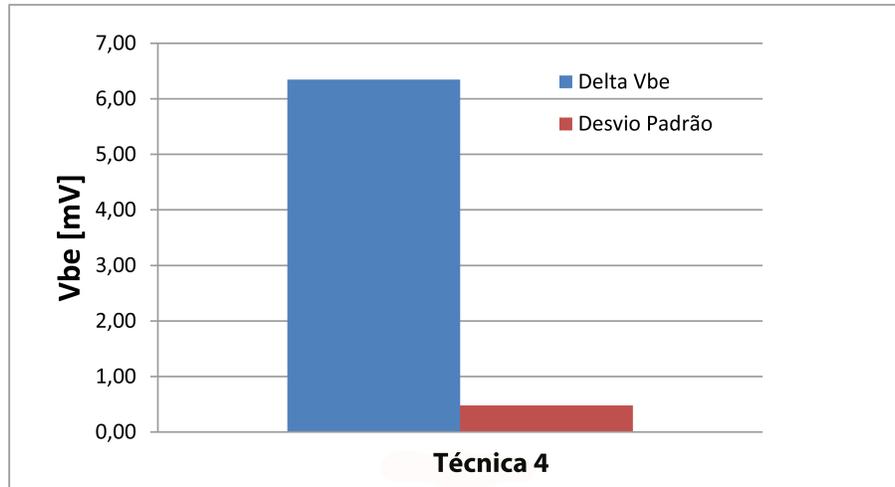


Fig. 4.14: Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 11 utilizando a técnica 4.

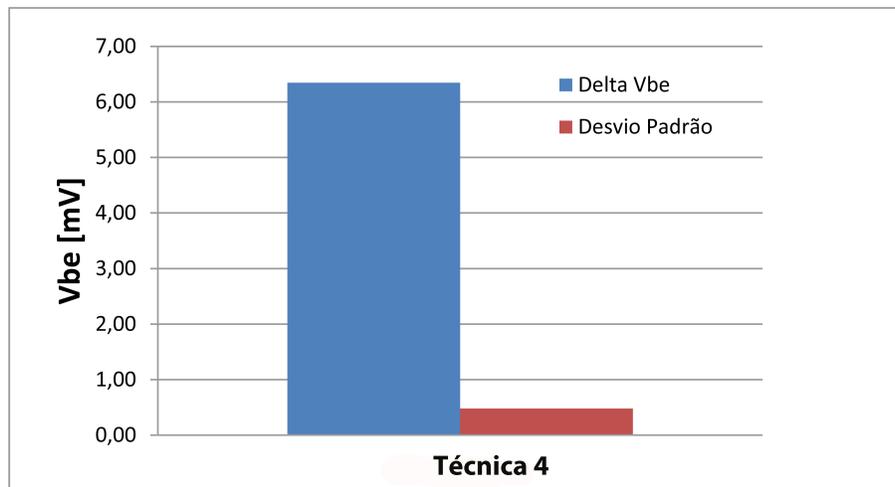


Fig. 4.15: Variação da medida de V_{BE} e o desvio padrão para o sensor metálico 11 utilizando a técnica 4.

4.4 Amostra dos dados de V_{BE} para medidas realizadas no Agar Agar e no Ar.

A Figura 4.16 mostra a utilização da técnica de interrogação do sensor (T1), para aquisição dos valores de V_{BE} medidos nos sensores inseridos no Agar Agar e no Ar no intervalo de 10 segundos. Pode se observar que para as medidas realizadas no Agar Agar, o valor de V_{BE} tende a entrar em equilíbrio térmico em função da energia fornecida, que foi de 1,5 J, em aproximadamente 4 segundos. Já, para as medidas realizadas no Ar, até o intervalo de 10 segundos, que foram realizadas as medidas, o valor de V_{BE} ainda continua caindo, o que levaria a um aumento do valor do cálculo de ΔV_{BE} .

4.17

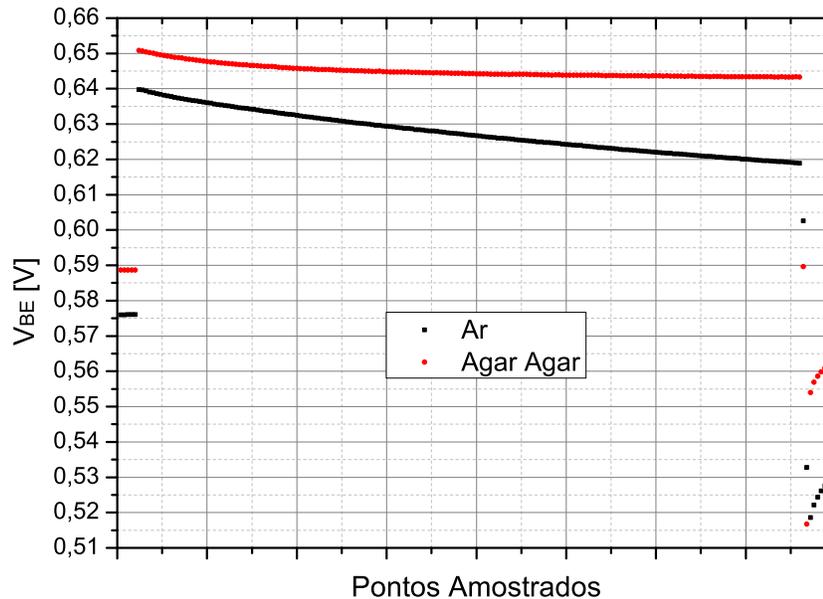


Fig. 4.16: Comparação da medida do valor de V_{BE} usando a técnica (T1) para as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar.

O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.17, onde as medidas realizadas no Agar Agar e no Ar, foram comparadas com as medidas realizadas no solo, a 37% de umidade e 7% de umidade. Pode se observar que para as medidas realizadas no Agar Agar e no solo a 37% de umidade, a tendência do V_{BE} entrar em equilíbrio térmico logo no início da medida, em aproximadamente 4 segundos. Já, para as medidas realizadas no Ar e no solo a 7%, o valor de V_{BE} continua a cair até o intervalo de 10 segundos, o que mostra que o valor do cálculo de ΔV_{BE} seria ainda maior para medidas realizadas com intervalos maiores que 10 segundos.

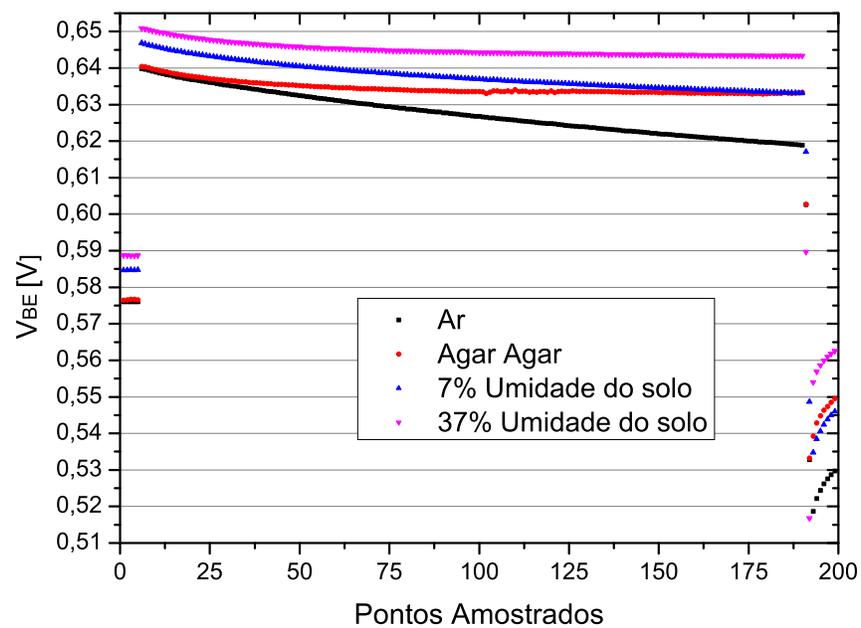


Fig. 4.17: Comparação da medida do valor de V_{BE} usando a técnica (T1) para as medidas realizadas no Agar Agar, no Ar, no solo à 37% e 7%.

Capítulo 5

Conclusão

A pós análise dos resultados, observamos que a sensibilidade do valor de ΔT em função da umidade do solo, é menor para umidades maiores, em geral, acima de 35%, para valores de energia de 1,5 J. Como foi observado que o sensor responder em função da potência fornecida e não da energia aplicada, para medidas com valores de umidade maiores que 35% existe a necessidade de aumentar a potência fornecida.

Os resultados das medidas dos sensores realizadas no solo, com a umidade do solo de aproximadamente 7% à 40%, evidenciou que a energia de 1,5 J, proporciona energia suficiente para elevar o valor de ΔT em aproximadamente 6 °C (lembrando que para um sensor comercial, esta faixa é de 1,5).

Após a realização das medidas utilizando as duas técnicas de interrogação do sensor (T3) e (T4), no Agar Agar e no Ar, observamos que os erros das medidas diminuem em relação as medidas realizadas no solo, isso ocorre devido a problemas relacionados com a superfície de contato do sensor com o solo, durante a realização dos ensaios. Como as medidas foram realizadas em uma amostra de solo deformada, é difícil garantir o mesmo contato durante todo o ensaio, pois o solo ao secar diminui o seu volume, diminuindo assim o contato do mesmo com o sensor, o que não ocorre no Agar Agar e no Ar.

O maior valor de ΔT utilizando a técnica 1 (T1), em relação as medidas realizadas no Agar Agar, representado o solo saturado, e no Ar, representado solo seco, com energia de 1,5 J, foi de aproximadamente 9 °C, com desvio padrão de 0,59 °C.

O maior valor de ΔT utilizando a técnica 1 (T2), em relação as medidas realizadas no Agar Agar, representado o solo saturado, e no Ar, representado solo seco, com energia de 1,5 J, foi de aproximadamente 8 °C, com desvio padrão de 0,32 °C.

O maior valor de ΔT utilizando a técnica 1 (T3), em relação as medidas realizadas no Agar Agar, representado o solo saturado, e no Ar, representado solo seco, com energia de 1,5 J, foi de aproximadamente 3 °C, com desvio padrão de 0,13 °C.

O maior valor de ΔT utilizando a técnica 1 (T4), em relação as medidas realizadas no Agar Agar, representado o solo saturado, e no Ar, representado solo seco, com energia de 1,5 J, foi de aproximadamente 6,5 mV (equivalente a aproximadamente 3 °C), com desvio padrão de 0,13 mV.

A fabricação de sensores de umidade do solo baseado na técnica de dissipação de calor, utilizando um único transistor bipolar, demonstrou ter grande aplicação na área de gerenciamento de sistemas de irrigação. Pois estes apresentam uma maior sensibilidade em comparação a outros sensores citados

nesse trabalho, tal como DPHP, MPHP, SPHP e BPHP.

Referências Bibliográficas

- [1] E. E. R. M. W. S. A. L. BIZARI, D. R.; MATSURA, “Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional,” *Ciência Rural, Santa Maria, ISSN 0103-8478*, vol. 39, n.7, pp. p.2073–2079, out, 2009.
- [2] A. M. COELHO, “Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas,” *Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN1518-4277*, vol. 46, p. 60, 2005.
- [3] P. PIERCE, F. J.; NOWAK, “Aspects of precision agriculture. advances in agronomy,” *Advances in Agronomy, Elsevier*, vol. 67, pp. 1–85, 1999.
- [4] E. E. e. a. MATSURA, “Importância da automação nos sistemas agrícolas irrigados, visando a irrigação inteligente e a agricultura de precisão,” *Aplicações da técnica de TDR na Agricultura, ISBN 85-902101-1-1*, p. 178, 2001.
- [5] C. C. e. a. SOUZA, “Avaliação de métodos de determinação de água disponível em solo cultivado com algodão,” *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 37, n. 3, pp. p. 337–341, 2002.
- [6] A. S. e. a. LOPES, “Manejo da irrigação: (tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional.” *Eng. Agríc., Jaboticabal*, vol. v.24, n.1, pp. p. 89–100, jan./abr. 2004.
- [7] L. RICHARDS, “Pressure-membrane apparatus, construction and use,” *Agronomy Engineering, Madison*, vol. n. 28, pp. p. 451–454, 1947.
- [8] P. SAAD, A.M.; LIBARDI, “Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante.” *São Paulo: IPT, 1992.*, vol. 67, p. 27p, 1992.
- [9] J. A. S. Dias, W. Roque, F. W. D. Pfrimer, and E. C. Ferreira, “A combined wenner-array/heat dissipation sensor for measuring electric conductivity and moisture of soils.” *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 2009.
- [10] 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.
- [11] G. J. H. J. W. KAMAI, T; KLUITENBERG, “Design and numerical analysis of a button heat pulse probe for soil water content measurement.” *Vadose Zone Journal*, vol. 8, pp. 167–173, 2009.

- [12] P. L. KLEIN, V. A.; LIBARDI, “A novel high sensitive single probe heat soil moisture sensor based on a single *npn* bipolar junction transistor.” Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP., 2008.
- [13] C. J. Phene, G. J. Hoffman, and S. Rawlins, “Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body,” *Soil Sci. Soc. Am Proc.*, vol. 35, pp. 27–33, 1971.
- [14] 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.
- [15] A. Valente, R. Morais, C. Couto, and J. H. Correia, “Modeling and simulation of a silicon soil moisture sensor based on the DPHP method for agriculture,” *EUROPEAN CONFERENCES ON SOLID-STATE TRANSDUCERS*, vol. 17, pp. 564–567, 2003.
- [16] M. Gunawan, G. C. M. Meijer, J. Fonderie, and J. H. Huijsing, “A curvature-corrected low-voltage bandgap reference,” *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, vol. 28, no. 6, pp. 667 – 670, JUNE 1993.
- [17] 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, July-August 2004.
- [18] C. Scientific, 229 *Heat Dissipation Matric Water Potential Sensor Instruction Manual*, 2006.