Universidade Estadual de Londrina

JOSÉ CLÁUDIO DA SILVA JUNIOR

DETECÇÃO DE UMIDADE EM MATRIZES POROSAS UTILIZANDO PONTEIRAS COM TRANSISTOR BIPOLAR

Londrina
2018

JOSÉ CLÁUDIO DA SILVA JUNIOR

DETECÇÃO DE UMIDADE EM MATRIZES POROSAS UTILIZANDO PONTEIRAS COM TRANSISTOR BIPOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos
Especialidade: Instrumentação Eletrônica.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Bernadete de Morais França.

Londrina
2018

Ficha Catalográfica

da Silva Junior, José Cláudio

Detecção de umidade em matrizes porosas utilizando ponteiras com transistor bipolar. Londrina, PR, 2018. 47 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica .

1. Instrumentação eletrônica. 2. Grau de saturação de matrizes porosas. 3. Agricultura de precisão. 4. Regressão por minimos quadrados parciais. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Título.

JOSÉ CLÁUDIO DA SILVA JUNIOR

DETECÇÃO DE UMIDADE EM MATRIZES POROSAS UTILIZANDO PONTEIRAS COM TRANSISTOR BIPOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos.
Especialidade: Instrumentação Eletrônica.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Josê Antônio Siqueira Dias
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Londrina, 05 de junho de 2012.

"After climbing a great hill, one only finds that there are many more hills to climb."

Nelson Mandela

Agradecimentos

À Deus, por me guiar ao longo de mais uma etapa.

À minha família, por todo apoio e incentivo oferecidos.

Aos membros do Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente.

Aos colegas de outros laboratórios do programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, pelo apoio moral ao longo do processo.

À professora Dra. Maria Bernadete de Morais França pela orientação concedida ao longo deste projeto.

Aos demais professores do programa de mestrado em engenharia elétrica da Universidade Estadual de Londrina.

Ao Laboratório de solos do Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina pelo suporte e disposição da estrutura para execução de alguns testes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa.

José Cláudio da Silva Junior. Detecção de umidade em matrizes porosas utilizando ponteiras com transistor bipolar. 2018. 47 p. Dissertação do programa de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

Resumo

A medição do teor de água em matrizes porosas é um parâmetro de interesse para diversas áreas, como a agricultura e construção civil, as quais constantemente buscam por novas técnicas para quantificação desta variável. Neste contexto, os sensores de umidade por pulsos de calor têm se destacado dado o baixo custo e a boa confiabilidade. Normalmente, esta técnica utiliza modelos de calibração empíricos que requerem um conhecimento prévio de propriedades físicas das matrizes porosas, fato que dificulta seu uso em larga escala. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de sondas de calor em ponteiras simples com transistores bipolares. Regressões por mínimos quadrados parciais são utilizadas para predizer o teor de umidade em matrizes porosas. Tal modelo estima o conteúdo de água com base nas curvas de aquecimento e resfriamento dos sensores, sem o uso de um modelo de calibração empírico. As ponteiras são fabricadas com transistores bipolares de baixo custo, nas quais pulsos de calor de 1,6 J (80 mW em 20 s) são dissipados. São propostos e discutidos três circuitos de condicionamento para este tipo de sensor. O menor erro de medição foi obtido com o dispositivo que aplica um pulso de calor de tensão elevada e baixa corrente. Este sistema foi testado em matrizes porosas distintas como o gesso e solo roxo deformado. Em blocos de gesso foram obtidos, em média, modelos de predição do grau de saturação (0 % - 100 %) com R^2 de 0,9722 e RMSE de 4,78 %. Para amostras de solo, em média, as curvas de calibração do conteúdo de água na faixa de 5 % a 53 % atingiram R^2 de 0,9280 e RMSE de 2,37 % em validação cruzada.

Palavras-chave: *1. Instrumentação eletrônica. 2. Grau de saturação de matrizes porosas. 3. Agricultura de precisão. 4. Regressão por minimos quadrados parciais.*

José Cláudio da Silva Junior. Moisture detection in porous matrices using bipolar transistor probes. 2018. 47 p. Dissertation on a Master's degree in Electrical Engineering - Londrina State University, Londrina.

Abstract

The measurement of water content in porous matrices is a parameter of interest for several areas, such as agriculture and civil engineering, which are continually searching for new techniques to quantify this variable. In this context, the heat-pulse humidity sensors have been gathering further highlight due to low cost and the fair reliability. Typically, this technique uses empirical calibration models that require prior knowledge of the physical properties of porous matrices, which hampers large-scale applications. This work presents the development of single-probe heat-pulse devices with bipolar transistors. Partial Least Squares regressions are used to predict moisture content in porous matrices. This model estimates the water content based on the heating and cooling curves of the sensors, without the use of an empirical calibration pattern. The probes are made with low-cost bipolar transistors that dissipate 1.6 J (80 mW in 20 s) in the heat-pulse. Three conditioning circuits are proposed and discussed for this type of sensor. High-voltage pulses with low current led to the smallest measurement error. This system was tested in different porous matrices such as gypsum and deformed red soil. In gypsum blocks, on average, prediction models of the saturation degree (0 % - 100 %) were obtained with R^2 of 0.9722 and RMSE of 4.78 %. For soil samples, on average, the water content calibration curves in the range of 5 % to 53 % reached R^2 of 0.9280 and RMSE of 2.37 % in cross-validation.

Keywords: *1. Electronic instrumentation. 2. Degree of saturation of porous matrices. 3. Precision agriculture. 4. Partial Least Squares regression.*

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

1 Introdução **1**

2 Fundamentação Teórica **5**

2.1 O solo 5

2.2 Teor de água - Métodos diretos 6

2.2.1 Método gravimétrico 6

2.2.2 Método volumétrico 6

2.2.3 Grau de saturação (S_r) 6

2.3 Sensores de umidade por pulsos de calor 7

2.3.1 Princípio de funcionamento 7

2.3.2 Ponteira simples - *Single Probe Heat Pulse* (SPHP) 9

2.3.3 Ponteira dupla - *Dual Probe Heat Pulse* (DPHP) 10

2.4 Transistor bipolar como SPHP 11

2.5 Regressão por mínimos quadrados parciais 12

3 Materiais e Métodos **14**

3.1 Fabricação das ponteiras 14

3.2 Sistema de aquisição de dados 16

3.3 Sistema de aquisição de dados - Circuito 1 18
3.3.1 Fonte de tensão 18
3.3.2 Fonte de corrente 19
3.4 Sistema de aquisição de dados - Circuito 2 20
3.5 Sistema de aquisição de dados - Circuito 3 21
3.6 Regressão por mínimos quadrados parciais 23

4 Resultados **25**
4.1 Circuitos desenvolvidos 25
4.2 O transistor como sensor de temperatura 26
4.3 O transistor como SPHP 28
4.4 Sistema de aquisição de dados - Circuito 1 31
4.4.1 Adição de concentrações conhecidas de água 31
4.4.2 Análise ao longo do processo de secagem 33
4.4.3 Grau de saturação em blocos de gesso 36
4.5 Aquisição de dados - Circuitos 2 e 3 40

5 Conclusão **42**

Referências **44**

Lista de Figuras

2.1 Composição básica de um solo não saturado. 5

3.1 Exemplos de ponteiras desenvolvidas. 15

3.2 Diagrama de blocos do circuito 1. 18

3.3 Esquemático do conversor *boost* TPS61041. 19

3.4 Configuração do sensor como fonte de corrente - 1 canal. 20

3.5 Diagrama de blocos do circuito 2. 21

3.6 Circuito 3. 22

3.7 Variância explicada de Y em função do fator calculado. 23

3.8 Distribuição de *scores* para cada amostra em função do fator. . . 24

3.9 Coeficientes da regressão - Fator 3. 24

4.1 Sistema de aquisição de dados - Circuito 1. 25

4.2 Sistema de aquisição de dados - Circuitos 2 e 3. 26

4.3 Ensaio realizado em câmara térmica para avaliação das ponteiras como sensores de temperatura. 27

4.4 Temperatura medida pelos transistores por meio da Eq. (2.17). . . 27

4.5 Variação de V_{BE} ao longo da aplicação de pulsos de calor. 29

4.6 Variação de temperatura ao longo da aplicação de pulsos de calor - Circuito 1. 30

4.7 Amostra de solo. 31

4.8 Relação entre os valores preditos e os medidos para o conteúdo de água no solo - Conjunto de calibração e validação cruzada do bloco de gesso. 32

4.9 Relação entre os valores preditos e os medidos para o conteúdo de água no solo - Conjunto de calibração e validação cruzada do bloco de cimento. 33

4.10 Estrutura utilizada no ensaio. 34
4.11 Bancada do experimento. 34
4.12 Conteúdo de água na amostra de solo (θ) - Curva de calibração. . 35
4.13 Sistema de aquisição de dados 1 e ponteiras fabricadas. 36
4.14 Grau de saturação dos blocos de gesso - Curva de calibração. . . . 38
4.15 Grau de saturação dos blocos de gesso - Curva de predição. 38
4.16 Grau de saturação do blocos de gesso 3 - Curva de aquecimento. . 39
4.17 Grau de saturação do bloco de gesso 3 - Curva de resfriamento. . 39
4.18 Grau de saturação do bloco de gesso 1 - Curva de calibração. . . . 40
4.19 Grau de saturação do bloco de gesso 2 - Curva de calibração. . . . 41
4.20 Grau de saturação do bloco de gesso 3 - Curva de calibração. . . . 41
4.21 Grau de saturação do bloco de gesso 4 - Curva de calibração. . . . 41

Lista de Tabelas

2.1 Calor específico e condutividade térmica de materiais a 25 ^oC. . . 8

4.1 Parâmetros da regressão da curva de temperatura dos sensores. . 28

4.2 Parâmetros da regressão PLS - Conteúdo de água na amostra. . . 36

4.3 Parâmetros de qualidade de ajuste das regressões - Grau de saturação em blocos de gesso. 37

Lista de Abreviaturas

AO Amplificador Operacional

AP Agricultura de Precisão

ADC conversor analógico digital

BPHP *Button Probe Heat Pulse*

DAC conversor digital analógico

DAQ aquisição de dados

DPHP *Dual Probe Heat Pulse*

MPHP *Multi Probe Heat Pulse*

PCI placa de circuito impresso

PFM modulação por frequência de pulso

PLS Partial Least Squares

PMP ponto de murcha permanente

$\boldsymbol{R^2}$ coeficiente de determinação

RMSE erro quadrático médio

SI Sistema Internacional

SPHP *Single Probe Heat Pulse*

SPI *Serial Peripheral Interface*

$\boldsymbol{V_{BC}}$ tensão entre base-coletor

$\boldsymbol{V_{BE}}$ tensão entre base-emissor

UART *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
C	Capacidade térmica ($J\ K^{-1}$)
c_p	Calor específico ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
λ	Condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)

1 Introdução

Analisar o teor de umidade de matrizes porosas é fundamental para diversas áreas do conhecimento como a agricultura, ciência dos materiais e construção civil. Tais dados também são relevantes para estudos geológicos, meteorológicos e hidrológicos. Para o setor agrícola, por exemplo, há o interesse em informações precisas sobre o conteúdo de água do solo, uma vez que tal variável é um parâmetro chave na germinação das sementes, na decomposição de matéria orgânica, na transformação de nutrientes nas raízes e no crescimento saudável das hortaliças, como aponta Bittelli (2011).

O teor de água dá um indicativo de quão seco ou molhado o solo está. Quando este se encontra muito seco, há uma redução na capacidade metabólica da planta ao ponto da mesma não ser capaz de absorver água, nestes casos, atinge-se o ponto de murcha permanente (PMP), no qual seu ressecamento se torna irreversível. Vale ressaltar que cada cultura apresenta uma necessidade distinta em valores ótimos de água disponível para seu correto desenvolvimento, sendo esta demanda dependente também das características climáticas da região e do solo.

No contexto agrícola, sensores de umidade do solo devem operar na faixa disponível de água à planta, região compreendida entre o PMP e a capacidade de campo, na qual há uma concentração máxima de água no solo não saturado. Como descrevem Carvalho et al. (2015), esta figura de mérito exibe um importante papel na gestão de irrigação, já que delimita o conteúdo de água não prejudicial ao desenvolvimento da planta.

Do ponto de vista da água como insumo, há o interesse na gestão de custos. Após a crise hídrica enfrentada entre 2014 e 2015, entidades governamentais iniciaram debates para adoção de novos instrumentos econômicos, como impostos, subsídios e taxas, com intuito de promover o uso racional da água, como exposto pelo Conselho Nacional de Recursos Hidricos (CNRH) (2016). Como aponta a Agência Nacional de Águas (2016), dos 2.275,07 m^3/s de água retirada no Brasil em 2015, 55 % foram aplicados na irrigação, logo, tais intervenções incidirão essencialmente no setor agrícola.

A umidade de uma determinada matriz porosa, como o solo, pode ser diretamente determinada pela verificação de massa ou volume de água em dada amostra da matriz. No método gravimétrico, amostras são retiradas para verificação da perda de massa com a secagem em estufa, segundo regulamentação da ISO 17892-1:2014 (2014). Além de invasiva e pontual, tal prática exige um longo período para execução, sendo pouco aplicável em situações de larga escala, como a medição de umidade em campo.

Nesse sentido, visando uma implementação tangível e de fácil manuseio, com foco na gestão inteligente de irrigação, há a elaboração de sensores que estimam a umidade de maneira indireta, através de sua correlação com outros fenômenos físicos. Assim, podem ser citados sensores tensiométricos (COOLONG et al., 2012), capacitivos (MIZUGUCHI et al., 2015), resistivos (SALEH et al., 2016), reflectométricos (MARTI; GASQUE; GONZALEZ, 2013), por pulsos de nêutron (TOMINAGA et al., 2002), bem como os baseados no princípio da transferência de calor. Usualmente, têm-se que as técnicas por pulsos de nêutron ou reflectometria tendem a ser mais complexas e caras, sendo inadequadas ao campo. Em contrapartida, sensores resistivos e capacitivos exibem menor confiabilidade por sofrerem com alterações físico-químicas do solo no qual estão inseridos. Tais dispositivos são profusamente discutidos em Lekshmi, Singh e Baghini (2014), Bittelli (2010) e Tarantino, Romero e Cui (2009).

Como aponta Dias (2012), a utilização de sensores por transferência de calor tende a ser mais barata que o emprego de técnicas reflectométricas e mais confiáveis que os dispositivos capacitivos, sendo opções mais convenientes para aplicações em campo. Basicamente, estes dispositivos podem ser organizados em quatro categorias: múltiplas ponteiras - *Multi Probe Heat Pulse* (MPHP), ponteira dupla - *Dual Probe Heat Pulse* (DPHP), botão - *Button Probe Heat Pulse* (BPHP), e simples - *Single Probe Heat Pulse* (SPHP).

O desenvolvimento teórico desta configuração de sensores é usualmente fundamentado na condução térmica em sólidos proposta por Carslaw e Jaeger (1959). A condutividade térmica λ quantifica a capacidade que dado material exibe para transferir calor. Em uma matriz porosa, como o solo, gesso ou cimento, tal variável é dependente da textura, porosidade, densidade e do conteúdo de água do material (JIN et al., 2017). A verificação da sensibilidade de λ à umidade levou ao desenvolvimento das primeiras sondas por pulsos de calor para determinação do teor de umidade em materiais porosos. Campbell, Calissendorff e Williams (1991) elaboraram sensores DPHP para determinação da capacidade térmica do solo em função da máxima temperatura gerada por um pulso de calor

conhecido. O registro de alterações na capacidade térmica pela umidade levou Bristow, Campbell e Calissendorff (1993) à demonstrar que este tipo de sensor poderia ser usado na determinação do teor de água.

Nos dispositivos DPHP, o sensor de temperatura e o elemento aquecedor são dispostos em hastes distintas, uma vez que a variação de temperatura também é dependente da distância entre o sensor e a fonte de calor. Como a umidade é correlacionada com a resposta térmica registrada pelo equipamento, a ocorrência de desalinhamentos nas hastes interfere na capacidade de predição destes dispositivos. Assim, muitas vezes tal configuração exige calibrações individuais em campo, o que limita sua aplicação em larga escala.

Nesse sentido, propostas mais recentes têm visado reduzir o efeito de deflexão com a elaboração de hastes rígidas (KAMAI; KLUITENBERG; HOPMANS, 2015) e pelo uso de um número maior de termistores na ponteira de medição (WEN et al., 2015), o que atenua até 90 % do erro associado. Além disso, novas estruturas de medição têm sido desenvolvidas, como os BPHP, MPHP e SPHP. Nos BPHP, elemento aquecedor e sensor são fixados à uma distância predeterminada através de um material com boa condutividade térmica (FRANCA et al., 2018; VALENTE et al., 2010; KAMAI; KLUITENBERG; HOPMANS, 2009). Em relação aos DPHP, estes sensores exibem maior sensibilidade e robustez, no entanto, sofrem com a falta de soluções analíticas para condução de calor, tal como exposto por Kamai, Kluitenberg e Hopmans (2009). Já os MPHP exibem um aquecedor central e dois ou mais elementos sensores (SHENG et al., 2016; TRAUTZ et al., 2014; VALENTE et al., 2006), o que minimiza os efeitos relacionados a heterogeneidade do solo. Entretanto, tais dispositivos são mais caros e exigem uma maior complexidade de condicionamento e calibração.

Nos SPHP, sensor e aquecedor são unidos em um mesmo elemento (LI et al., 2016; DIAS et al., 2013; DEVRIES, 1952). Neste método, os pulsos de calor apresentam duração mais longa, em contrapartida, a exigência de potência é inferior, fato que viabiliza sua operação em sistemas de baixo consumo. Esta metodologia é indicada para predizer o teor de umidade em detrimento das propriedades térmicas do material, uma vez os dispositivos SPHP permitem apenas a estimação da condutividade térmica (LI et al., 2016). Em função desta característica, tais ponteiras normalmente são inseridas em um material poroso de referência com comportamento térmico conhecido, como blocos de gesso ou cerâmica. Assim, para determinação da umidade do solo, por exemplo, é necessário que as matrizes porosas estejam em equilíbrio hidrostático para a correta predição da variável.

Independentemente da estrutura proposta, não há uma relação geral preestabelecida que correlacione a condutividade térmica e a umidade de uma matriz porosa. Um modelo determinístico precisaria considerar um extenso número de variáveis, tais como a composição física e química, a granulometria e heterogeneidade da matriz porosa. Assim, a maioria dos modelos são empíricos e enfrentam dificuldades em aplicações de larga escala e em matrizes distintas.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de estruturas SPHP baseadas em um único transistor bipolar NPN como elemento aquecedor e sensor. Ao contrário das pesquisas anteriormente descritas, os modelos de predição aplicados nestes dispositivos não utilizam relações empíricas predefinidas. É proposto o uso da regressão por mínimos quadrados parciais, Partial Least Squares (PLS), como um modelo estatístico generalizado para predição de umidade em matrizes porosas através de sensores por transferência de calor.

Diversas ponteiras foram fabricadas e avaliadas com intuito de se estabelecer a capacidade de predição da técnica. Os sensores foram inseridos em matrizes porosas distintas tais como blocos de gesso e cimento, além de amostras de solo deformado. O desenvolvimento de revestimentos em cimento teve, como objetivo, avaliar soluções alternativas as referências fabricadas em gesso para sondas de ponteira simples, uma vez que tal material exibe baixa resistência mecânica e reduzida durabilidade em campo. O uso de transistores bipolares em dispositivos SPHP já teve sua prova de conceito realizada por Dias et al. (2013). Assim, neste trabalho, optou-se por este tipo de sensor em função da alta sensibilidade, baixo-custo e do tamanho reduzido, os quais facilitam a fabricação de ponteiras. Como este tipo de sensor SPHP ainda é pouco explorado, também são discutidas algumas propostas de condicionamento para o mesmo.

Assim, no Capítulo 2, são discutidos os principais conceitos e equacionamentos da técnica, o transistor como elemento sensor e a regressão PLS. O Capítulo 3 apresenta os sistemas propostos para detecção de umidade em matrizes porosas. No Capítulo 4, são discutidos os resultados obtidos e as metodologias empregadas. Por fim, no Capítulo 5, são expostas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

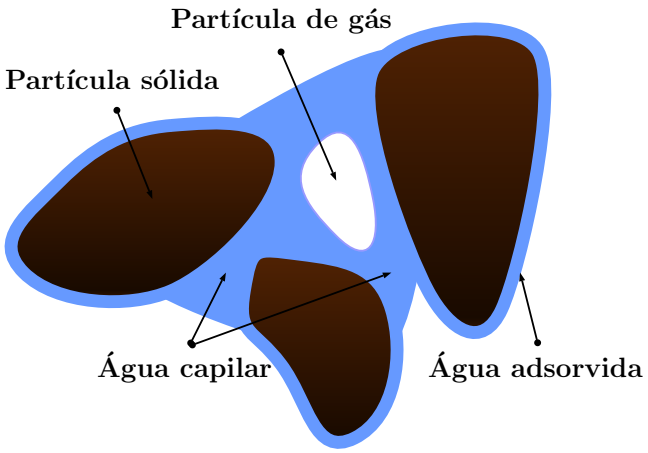
2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são expostos os conceitos fundamentais ao entendimento do trabalho, os equacionamentos clássicos associados aos sensores de umidade por pulsos de calor, o transistor bipolar como SPHP e a regressão PLS aplicada à técnica.

2.1 O solo

O solo é uma matriz porosa heterogênea composta de partículas sólidas diversas, no qual espaços podem ser ocupados por frações de água e ar. Em um solo seco, todos os poros são ocupados por partículas gasosas, condição distinta de um solo saturado, o qual é totalmente preenchido por água. Em um solo não saturado, como aponta Hillel (2003), a água está sujeita a forças de retenção. Em função destas, pode-se classificar a água em sua porção adsorvida, que está ligada as partículas sólidas por atrações moleculares, ou capilar, quando presente nos poros agregados, como ilustrado na Fig. 2.1. Para baixos índices de umidade, há uma maior contribuição da força de adsorção, em contrapartida, para maiores concentrações de água, a ação da capilaridade se torna preeminente. Em função da complexidade da matriz, muitas vezes o teor de umidade do solo é avaliado com o auxílio de um elemento poroso de referência em equilíbrio hidrostático.

Figura 2.1: Composição básica de um solo não saturado.



Fonte: O autor.

2.2 Teor de água - Métodos diretos

Usualmente, o teor de água em uma matriz porosa pode ser descrito em função da quantidade de água ou da energia associada às forças de retenção. Neste trabalho, optou-se pela definição de concentração, tomando como referência o método gravimétrico para calibração dos sensores. Para matrizes porosas, o teor de água pode ainda ser definido em termos do grau de saturação.

2.2.1 Método gravimétrico

O teor de água gravimétrico (θ_g) pode ser definido pela razão entre as massas de água (m_{H_2O}) e da matriz seca (m_s), tal como exposto na Eq. (2.1), expresso em $kg\ kg^{-1}$ ou em termos de porcentagem. É necessário pesar a amostra úmida (m_u) e verificar sua massa após secagem em estufa a 110 ^oC, ao longo de 24 horas.

$$\theta_g \ = \ \frac{m_{H_2O}}{m_s} \ = \ \frac{m_u - m_s}{m_s}. \tag{2.1}$$

2.2.2 Método volumétrico

O conteúdo volumétrico de água (θ_v) é definido como a porção de água (V_{H_2O}) em um volume conhecido de amostra (V_s). É possível realizar a conversão entre os teores gravimétricos e volumétricos através da densidade aparente do material seco (ρ_s), dada pela proporção da massa seca no seu volume original, e a densidade da água (ρ_{H_2O}). Esta relação é descrita pela Eq. (2.2), podendo ser expressa em $m^3\ m^{-3}$ ou como porcentagem.

$$\theta_v \ = \ \frac{V_{H_2O}}{V_s} \ = \ \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \ \frac{\rho_s}{m_s} \ = \ \theta_g \ \frac{\rho_s}{\rho_{H_2O}}. \tag{2.2}$$

2.2.3 Grau de saturação (S_r)

O grau de saturação (S_r) é descrito pela capacidade de uma matriz porosa absorver água em $kg\ kg^{-1}$ ou em termos de porcentagem. É útil quando há o interesse em caracterizar um meio poroso de massa conhecida, o qual pode variar de seco (0 % de água) à saturado (100 % da capacidade de absorção - Água retida após escoamento do excesso), como observado na Eq. (2.3).

$$S_r \ = \ \frac{m_p - m_{dry}}{m_{sat} - m_{dry}}, \tag{2.3}$$

onde m_p é a massa da amostra porosa em análise, m_{dry} sua massa seca e m_{sat} a massa da amostra em sua capacidade máxima de retenção de água.

2.3 Sensores de umidade por pulsos de calor

Do ponto de vista térmico, o calor específico (c_p) e a condutividade térmica (λ) são as principais variáveis de interesse para determinação do teor de água no solo. O calor específico define a quantidade de calor necessária para se elevar a temperatura da massa de um material em 1 K, no Sistema Internacional (SI) sua unidade é $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$. Já a condutividade térmica mede a capacidade de dado material conduzir calor, dada por $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ no SI. Tanto λ quanto c_p são propriedades intensivas, logo, não dependem da massa do material. No entanto, a capacidade térmica (C) é uma propriedade extensiva, logo, dependente da massa do corpo em análise. Tal variável descreve a relação entre a energia dissipada em determinado corpo e sua variação de temperatura ($J\ K^{-1}$).

Em comum, tais variáveis são dependentes da textura, porosidade e densidade do material, no entanto, também variam em função da umidade e temperatura ambiente (JIN et al., 2017). Como pode ser observado na Tab. 2.1, metais e materiais densos tendem a apresentar uma condutividade térmica superior aos elementos porosos preenchidos por bolhas de ar. No caso dos solos, há um incremento de λ proporcional à adição de água.

Há uma grande variedade de técnicas para medição da condutividade térmica, pelas quais se pode determinar λ por métodos estacionários ou transitórios. A primeira metodologia analisa o material em equilíbrio, assim, o processo de análise é simplificado em detrimento de um longo período de medição. Tal característica inviabiliza sua aplicação em campo. Métodos transitórios permitem, de forma rápida, determinar λ ao longo do processo de aquecimento ou resfriamento do material com a aplicação de uma fonte de calor conhecida. Sensores de umidade por pulsos de calor utilizam deste princípio, os quais podem ser classificados quanto as suas características construtivas como *Dual Probe Heat Pulse*, *Button Probe Heat Pulse*, *Multi Probe Heat Pulse* e *Single Probe Heat Pulse*.

2.3.1 Princípio de funcionamento

Neste método, o meio poroso é considerado homogêneo, isotrópico e infinito, no qual apenas o efeito da condução térmica radial é considerada, logo, há uma simplificação da equação diferencial de condução térmica. Assim, assume-se o equacionamento proposto por Carslaw e Jaeger (1959):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right], \tag{2.4}$$

Tabela 2.1: Calor específico e condutividade térmica de materiais a 25 ^oC.

Material	**Calor específico** ($kJ\ kg^{-1}\ K$)	**Condutividade térmica** ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
Água	4,20	0,56
Ar seco	1,00	0,0026
Alumínio	0,883	164
Cimento *portland* seco	0,75	0,30
Gesso seco	1,09	0,51
Silício	0,703	153
Terra argilosa (28 % de umidade)	1,84	1,51
Terra arenosa (8 % de umidade)	0,88	1,05

Fonte: Adaptado de Bejan e Kraus (2003).

onde r é a distância radial do centro em metros, t o tempo em segundos, T a temperatura absoluta e α a difusidade térmica em $m^2\ s^{-1}$, dada pela razão entre λ e a capacidade térmica volumétrica (ρc_p), em $J\ m^{-3}\ K^{-1}$.

Para solucionar a Eq. (2.4), usualmente são assumidas as considerações de Shiozawa e S.Campbell (1990). Supondo uma fonte de calor linear infinita de potência constante e uma temperatura inicial uniforme (T_o), a variação térmica (T - T_0) à uma distância r é:

$$T - T_0 \ = \ -\frac{q}{4\pi\lambda}\ E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right), \tag{2.5}$$

sendo q a potência dissipada por unidade de comprimento, em W m^{-1}, e E_i a função integral exponencial:

$$E_i(x) \ = \ -\int_{-x}^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}du, \tag{2.6}$$

a qual pode ser aproximada pela série de *Taylor*:

$$E_i(x) \ = \ \gamma + ln|x| + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{x^k}{k\ k!} \qquad x \neq 0, \tag{2.7}$$

onde x é $-r^2/(4\alpha t)$ e γ é a constante de *Euler-Mascheroni*, $\approx$ 0,57721. Para $x \ll 1$, os termos após o logaritmo da Eq. (2.7) podem ser negligenciados. Assim, para pulsos de longa duração em dispositivos estreitos e de elevada difusidade, a Eq. (2.5) pode ser aproximada pela Eq. (2.8) (LOW; LOVERIDGE; POWRIE, 2014).

$$T - T_0 \ \approx \ -\frac{q}{4\pi\lambda}\ \left[\gamma + ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)\right]. \tag{2.8}$$

Durante a aplicação do pulso, apenas a variável tempo atua na Eq. (2.8).

Para valores pequenos de t, há a inserção de erros pela negligência de termos da função integral exponencial, além dos desvios associados a não idealidade da fonte. Nesse sentido, Shiozawa e S.Campbell (1990) apontam uma boa aproximação ao se desconsiderar os primeiros instantes da aplicação do pulso de calor. Assim, é possível traçar um gráfico linear da variação de temperatura pelo logaritmo do tempo, no qual λ pode ser obtido. Tomando dois pontos da curva, tem-se:

$$\lambda \approx \left[\frac{q}{4\pi\left(T_2 - T_1\right)}\right] ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right). \tag{2.9}$$

2.3.2 Ponteira simples - SPHP

Nos sensores de ponteira simples, comumente, a predição de umidade é dada de forma empírica, com o emprego da Eq. (2.9) e das correlações obtidas por medições de λ para dado conteúdo de água θ das amostras à serem caracterizadas. O modelo clássico proposto por Johansen (1975) define uma normalização para a variação da condutividade térmica dos solos, aproximada por:

$$K_e = \frac{\lambda - \lambda_{dry}}{\lambda_{sat} - \lambda_{dry}}, \tag{2.10}$$

sendo K_e a função de *Kersten* (condutividade térmica normalizada), λ_{dry} e λ_{sat} indicam a condutividade térmica do solo seco e saturado, respectivamente.

Como apontado por Lu et al. (2007), no solo à temperatura ambiente, λ exibe características distintas ao longo de θ. Para baixas umidades, as moléculas de água estão fortemente adsorvidas, assim, há um aumento proporcional e não substancial de λ dado o incremento de θ. Com a formação de água livre, λ começa a variar de forma acentuada em função da substituição das moléculas de ar por água. Próxima a saturação, o crescimento de λ se torna menos intenso. Os autores descrevem a relação entre λ e θ por:

$$K_e = e^{\alpha\left[1-\left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^{\beta}\right]}, \tag{2.11}$$

onde α e β são dependentes do solo e θ_{sat} é o conteúdo de água da saturação.

Já Benitez-Buelga et al. (2016) assumem uma relação bi-exponencial entre a condutividade térmica e o conteúdo de água no solo, desconsiderando as medições em saturação. A relação entre λ e θ é:

$$\lambda(\theta) = Ae^{B\theta} + Ce^{D\theta}, \tag{2.12}$$

onde as constantes A, B, C e D são obtidas para cada tipo de solo.

Abordagens mais recentes, introduzidas por Sayde et al. (2010), tem optado por modelos de calibração baseados nas medições da integral do aumento de temperatura (T_{cum}), os quais tem resultado em predições com acurácia de até 5 %. Neste tratamento, um maior valor de θ resultará na redução de T_{cum} em relação ao solo seco. Assim, o cálculo intermediário de λ se torna desnecessário. Além disso, a integral carrega as informações de condutividade e difusidade térmica, variáveis da Eq. (2.5) que são dependentes no nível de umidade. Li et al. (2016) avaliam o grau de saturação com base na Eq. (2.13):

$$T_{cum} = \frac{a + b\,\theta}{1 + c\,\theta}, \tag{2.13}$$

onde os parâmetros a, b e c são obtidos de forma empírica.

Os equacionamentos descritos assumem medições em temperaturas próximas a 25^oC. No entanto, ajustes na curva de calibração são necessários para análises fora desta faixa de operação, já que a condutividade térmica é dada em função da temperatura. Tal dependência, nos solos, tem sido abordada em diversas pesquisas (KASUBUCHI, 2000; CAMPBELL; JUNGBAUER; BIDLAKE W. R.AND HUNGERFORD, 1994; HOPMANS J. W.; DANE, 1986). No entanto, esta característica não é determinística, sendo avaliada empiricamente para cada sistema ou solo.

2.3.3 Ponteira dupla - DPHP

Os dispositivos de ponteira dupla exibem aquecedor e sensor de temperatura montados a uma distância fixa conhecida, fato que viabiliza a determinação da capacidade térmica volumétrica por meio da Eq. (2.8). Campbell, Calissendorff e Williams (1991) propõem que o aumento máximo de temperatura (ΔT_{max}) a uma distância r é inversamente proporcional a ρc_p:

$$\rho c_p = \frac{q'}{e\pi r^2 \Delta T_{max}}, \tag{2.14}$$

sendo e o número de *Euler*, $\approx$ 2,7183, e q' a energia dissipada pelo aquecedor em $J\ m^{-1}$. Desconsiderando a contribuição da capacidade térmica dos gases no solo, pode-se descrever ρc_p, segundo Kluitenberg e Heitman (2002), como:

$$\rho c_p = \rho_s c_s + \rho_w c_w\ \theta_v, \tag{2.15}$$

onde θ_v é a umidade volumétrica da amostra, ρ_s e ρ_w são, respectivamente, as densidades do solo e da água em $kg\ m^{-3}$, bem como c_s e c_w indicam o calor específico

correspondente. Substituindo a Eq. (2.15) em (2.14), obtém-se a Eq. (2.16):

$$\theta_v \;=\; \frac{q'}{e\pi r^2 \Delta T_{max} \rho_w c_w} - \frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w}. \tag{2.16}$$

A Eq. (2.16) demonstra que o aumento do teor de água no solo contribui para uma maior dissipação de calor, assim, a variação máxima de temperatura também é inversamente proporcional a θ_v.

2.4 Transistor bipolar como SPHP

Os modelos *Ebers-Moll* e *Gummel-Poon* reúnem os principais equacionamentos dos transistores bipolares de junção. Nestes modelos, a dependência térmica é notável em diversos parâmetros, como na tensão entre base-emissor (V_{BE}). Abordagens mais complexas destes modelos podem ser encontradas em livros de microeletrônica (DIMITRIJEV, 2012; WILAMOWSKI, 2011). Neste trabalho, no entanto, optou-se pela simplificação proposta por Meijer (1986), na qual, dada uma corrente constante independente da temperatura, tem-se $V_{BE}(T)$ como:

$$V_{BE}(T) \;=\; V_{G0}\,\left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \;+\; V_{BE0}\,\left(\frac{T}{T_0}\right) \;+\; \left(\frac{\gamma\ \kappa\ T}{q}\right) ln\left(\frac{T_0}{T}\right), \tag{2.17}$$

onde T é a temperatura absoluta, κ a constante de *Boltzmann*, q a carga do elétron, V_{G0} a tensão de *bandgap* ($\approx$ 1,2 V), e γ um parâmetro de fabricação, adotado como 3,5 (MEIJER, 1986). T_0 e V_{BE0} são valores arbitrários de referência para temperatura e respectivo V_{BE}.

Tal equacionamento descarta influências de segunda ordem como o efeito *Early*, uma vez que a tensão entre base-coletor (V_{BC}) é mantida constante. Com esta abordagem, a calibração da medida térmica pode ser executada pelo registro de V_{BE} em uma temperatura conhecida, estes valores são definidos como V_{BE0} e T_0, respectivamente. A potência dissipada em um transistor bipolar é:

$$P \;=\; I_C\ V_{CE}\ + I_B\ V_{BE}, \tag{2.18}$$

onde I_C é a corrente de coletor, I_B a corrente de base e V_{CE} a tensão entre coletor-emissor. Comumente, apenas o primeiro termo da Eq. (2.18) é considerado, uma vez que $I_C\ V_{CE} \gg I_B\ V_{BE}$. A junção base-coletor pode sofrer auto-aquecimento com a dissipação de dezenas de mW no transistor. Assim, o meio poroso em análise atua como dissipador. A junção base-emissor, por sua vez, é utilizada como sensor de temperatura, caracterizando o transistor bipolar como uma ponteira SPHP.

2.5 Regressão por mínimos quadrados parciais

Apesar do modelo teórico bem definido, na prática, não há uma correlação determinística entre a umidade de uma matriz porosa e seus parâmetros térmicos. A maioria dos modelos existentes são empíricos e influenciados pela complexidade da matriz e por não idealidades do sensor. No entanto, na análise de dados, há um crescente interesse pela aplicação de metodologias estatísticas que encontrem a melhor resposta para dada entrada por meio de uma estrutura coerente que considere, com precisão, o grau de incerteza dos dados.

Neste sentido, a regressão por mínimos quadrados parciais, PLS, se apresenta como uma técnica capaz de predizer um conjunto de variáveis ($\mathbf{Y}$) através de um grupo de preditores ($\mathbf{X}$) (BRAAK; JONG, 1998; KRUGER et al., 2008). Ambos os conjuntos sofrem uma transformação no espaço de estados para que sejam representados em termos de variáveis latentes (componentes ou fatores), as quais são combinações lineares ótimas no sentido de máxima covariância entre as matrizes de dados. Este algoritmo reduz os preditores à um conjunto menor de dados com componentes descorrelacionados e realiza uma regressão de mínimos quadrados. Tal característica permite que o sistema trabalhe com preditores altamente colineares[1], situação comum em respostas temporais ao pulso de calor.

Assim, este trabalho propõe o uso da regressão PLS juntamente com a técnica de detecção de umidade em matrizes porosas pela aplicação de pulsos de calor, uma vez que as curvas de aquecimento e resfriamento registradas exibem correlação direta com o conteúdo de água da amostra em análise. Neste sentido, a curva de variação de temperatura ao longo do pulso atua como um conjunto de preditores para a umidade. Especificamente neste trabalho, medições de tensão proporcionais à variação de temperatura são utilizadas como $\mathbf{X}$ para estimar o conteúdo de água da amostra $\mathbf{Y}$. A regressão PLS define um modelo linear:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\cdot\mathbf{B} + \mathbf{E}, \tag{2.19}$$

onde $\mathbf{B}$ é a matriz dos coeficientes da regressão e $\mathbf{E}$ a matriz de erros. Usualmente, o algoritmo é aplicado de forma a escalonar $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$ para matrizes centradas na média e com norma unitária. A matriz de fatores $\mathbf{T}$ é dada por:

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}\cdot\mathbf{W}, \tag{2.20}$$

sendo $\mathbf{W}$ a matriz de pesos. Esta ponderação maximiza a covariância entre $\mathbf{X}$ e

[1] A colinearidade existe quando preditores são linearmente dependentes entre si. A multicolinearidade pode produzir regressões instáveis com elevados erros de predição.

Y. Assim, o modelo de regressão linear pode ser reescrito como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}\cdot\mathbf{Q} + \mathbf{E}, \tag{2.21}$$

onde **Q** é a matriz de fatores de **T** e:

$$\mathbf{B} = \mathbf{W}\cdot\mathbf{Q}. \tag{2.22}$$

Uma vez que **Q** é computado, a Eq. (2.21) é equivalente a Eq. (2.19), sendo então utilizada como modelo de predição.

Neste trabalho, é utilizado o algoritmo de mínimos quadrados parciais iterativos não-lineares, *nonlinear iterative partial least squares* (NIPALS), para computar os componentes da regressão PLS com auxílio do *software* The Unscrambler® X 10.4. Validações cruzadas *K-Fold* são empregadas para avaliar a qualidade das regressões desenvolvidas antes dos testes com um conjunto de predição. Este método divide o conjunto de calibração em k subconjuntos distintos de mesmo tamanho. Assim, *k-1* subconjuntos são utilizados para calibração e um para validação. O processo é repetido até que todos os subconjuntos sejam testados na validação, assim, os parâmetros de qualidade da regressão são obtidos pela resposta média dos conjuntos.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo, são discutidas as diversas estruturas sensoras SPHP desenvolvidas ao longo do trabalho, o circuito de aquisição de dados e os condicionamentos propostos, bem como a metodologia empregada na regressão por mínimos quadrados parciais (PLS).

3.1 Fabricação das ponteiras

Neste trabalho, são utilizados transistores bipolares NPN 2N2222A com encapsulamento metálico TO-18 como elementos aquecedores-sensores. Estes componentes apresentam dimensões máximas de 5,8 mm de largura por 5,3 mm de comprimento. Os sensores foram soldados em cabos manga blindados com 30 cm de comprimento e posteriormente envernizados. Os contatos elétricos foram revestidos com silicone para assegurar a isolação elétrica e para proteger os pinos contra a umidade.

Inicialmente, houve o interesse de se investigar o encapsulamento poroso mais adequado para revestir as ponteiras, visando futuras aplicações em campo. O encapsulamento dos sensores busca reduzir a interferência da estrutura do solo no processo de medição. O gesso é o elemento poroso de referência comumente utilizado nestes sensores para predição do teor de umidade do solo. Assim, testes foram realizados com este encapsulamento para determinação da umidade de amostras de solo e do grau de saturação desta matriz porosa. No entanto, tal matriz exibe baixa resistência à umidade, sofrendo deterioração de massa ao longo do tempo e, consequentemente, interferindo na resposta dos sensores.

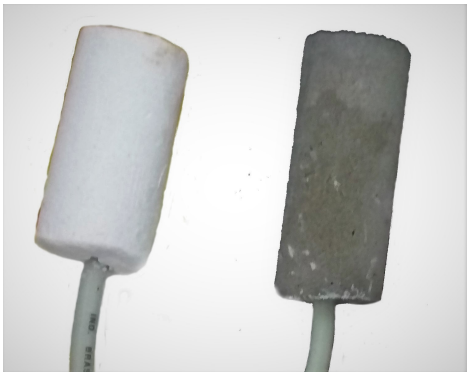
Neste sentido, buscou-se investigar neste trabalho um material poroso alternativo de referência. Assim, inicialmente, ponteiras foram inseridas em blocos cimentícios constituídos por 70 % de areia e 30 % de cimento *Portland*. Experimentalmente, chegou-se a uma largura mínima de 25,4 mm para assegurar a resistência mecânica dos blocos. Para dimensões menores o bloco se torna quebradiço. Assim, ponteiras inseridas em gesso foram fabricadas com as mesmas

dimensões, 25,4 mm de largura por 50 mm de comprimento, para comparação dos resultados. A proporção de gesso e água utilizada nos blocos é de 50 %. As ponteiras fabricadas são expostas na Fig. 3.1a.

Testes preliminares com adição de concentrações conhecidas de água em amostras de solo indicaram que os blocos de cimento exibiam potencial para ser utilizados como material poroso de referência. Ao passo que os blocos de gesso, com as mesmas dimensões, se mostraram pouco resistentes e mais suscetíveis à desvios. Tais resultados levaram à realização de um segundo teste com o uso de ponteiras com encapsulamentos cimentícios para determinação do conteúdo de água em uma amostra de solo num processo de secagem natural ao longo de vários dias de medição. Este ensaio visou verificar se tais ponteiras apresentariam sensibilidade suficiente numa aplicação próxima as condições de campo. Neste experimento, ponteiras sem encapsulamento também foram inseridas na amostra de solo com intuito de verificar a resposta do sistema sem o uso de um bloco poroso de referência.

A falta de sensibilidade à umidade registrada nos blocos de cimento levou a busca pela fabricação de encapsulamentos de gesso mais resistentes. Uma estrutura com boa resistência mecânica foi obtida para ponteiras com 12,7 mm de largura e 30 mm de comprimento, Fig. 3.1b, as quais foram avaliadas quanto ao seu grau de saturação.

Figura 3.1: Exemplos de ponteiras desenvolvidas.



(a) Ponteiras inseridas em blocos de gesso e cimento - 25,4 mm x 50 mm.

(b) Ponteiras sem encapsulamento e inserida em bloco de gesso - 12,7 mm x 30 mm.

Fonte: O autor.

3.2 Sistema de aquisição de dados

Nesta seção, são discutidos os projetos dos sistemas para aquisição de dados (DAQ) das estruturas sensoras. Um dispositivo para DAQ reúne a automação do processo de medição, o condicionamento e a digitalização de sinais, sendo também responsável pelo armazenamento e transmissão de dados ao usuário. Os sistemas propostos devem ser capazes de fornecer potência suficiente para geração de pulsos de calor, visto que utilizam de uma topologia SPHP com um único transistor bipolar atuando como elemento aquecedor e sensor de temperatura.

Ao todo, foram propostas três topologias para o condicionamento dos sinais em ponteira simples com intuito de se investigar a mais adequada para este tipo de sensor. A aplicação do pulso de calor foi limitada a uma potência de 80 mW em 20 s, com base nas recomendações expostas por Dias (2012). Quando não excitados, os sensores dissipam 3 mW, valor empiricamente definido para não auto-aquecer as ponteiras. Os dois primeiros circuitos inserem o transistor bipolar em uma configuração clássica de fonte de corrente. No entanto, são definidos níveis de tensão e corrente distintos. A primeira abordagem utiliza um conversor *boost* para elevar a tensão do pulso de calor. Já a segunda utiliza a tensão fornecida pelo regulador em detrimento de uma maior corrente dissipada ao longo do pulso.

Estas duas abordagens asseguram uma dissipação de energia fixa na aplicação do pulso de calor. No entanto, V_{CE} é distinto em relação ao estado de espera. Assim, foi proposta uma terceira abordagem com V_{CE} fixo para avaliar possíveis influências da tensão de *Early* na capacidade de predição dos sensores. Os três circuitos foram comparados medindo o grau de saturação de quatro sensores inseridos em blocos de gesso. Além disso, o primeiro circuito foi também avaliado em amostras de solo para medição do conteúdo de água. Os resultados obtidos são descritos no capítulo 4.

Um microcontrolador juntamente a um conversor analógico digital (ADC) de precisão são necessários para gerenciar a aplicação dos pulsos de calor e registrar a variação de V_{BE} no transistor. Em temperatura ambiente, 25^oC, V_{BE} varia cerca de -2 mV/^oC. Alguns sensores SPHP exibem variações máximas de temperatura entre condições secas e saturadas de 2^oC. Em uma relação tomada como linear, por exemplo, o sistema deve ser capaz de medir variações de tensão inferiores a 40 μV para garantir uma incerteza de 1 % na predição do grau de saturação.

O sistema de aquisição de dados é comum aos três condicionamentos propostos, exibindo um microcontrolador MSP430I2041 da *Texas Instruments*, o qual

possui quatro ADC *sigma-delta* diferenciais de 24 *bits*. Assim, estes dispositivos permitem a medição direta de V_{BE} sem a necessidade de um circuito de precisão para pré-amplificação, o qual poderia facilmente majorar o custo de aproximadamente U$ 3,00 do microcontrolador.

O controle da potência dissipada em cada transistor é realizado por meio de fontes de corrente controladas por tensão. Tal topologia reduz influências no sinal associadas aos parâmetros de cada transistor, uma vez que a corrente no emissor é estável. Um conversor digital analógico (DAC) é responsável pela definição dos níveis de corrente. O DAC DAC084S085 da *Texas Instruments* é utilizado. Este componente apresenta quatro canais de 8 *bits* e comunicação SPI.

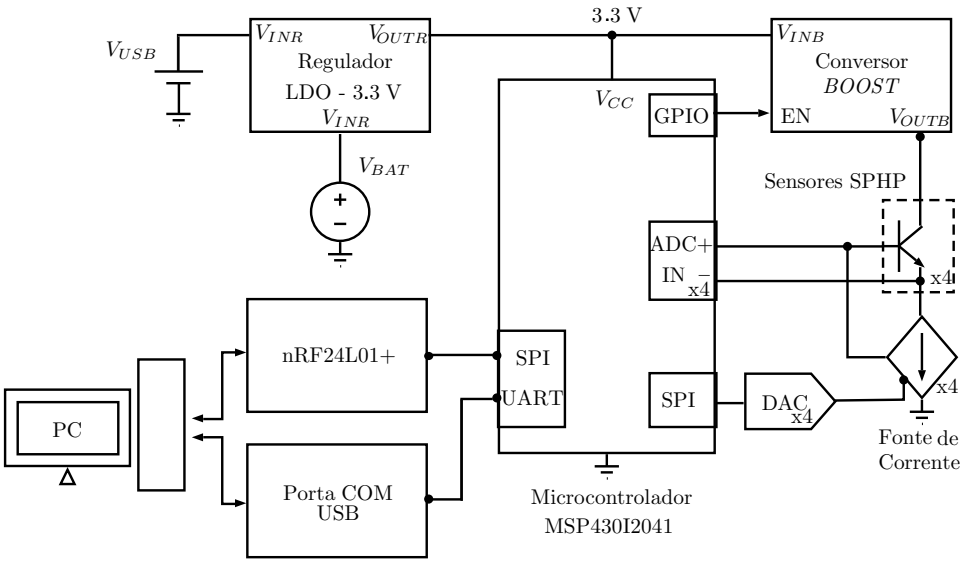
Ao inicializar o sistema, a configuração de periféricos é realizada. Os canais analógicos são configurados como entrada diferencial com ganho unitário e utilizam a referência interna de 1,2 V. Dos 24 *bits* disponíveis, apenas os 16 *bits* mais significativos são registrados a uma taxa de dez amostras por segundo (1 de sinal, 15 de dados), suficiente para realizar medidas com passo inferior a 40 μV. O uso de um padrão com 16 *bits* reduz o volume de dados à ser armazenado.

Os dispositivos registram a curva de aquecimento e resfriamento ao longo do pulso de calor e, posteriormente, transmitem as medidas de V_{BE} ao usuário. Os sistemas propostos enviam as leituras por meio de comunicação USB-Serial a uma taxa de 9600 bps, uma vez que os sistemas foram testados apenas em ambiente laboratorial. O primeiro circuito ainda exibe um módulo de comunicação sem fio 2,4 GHz nRF24L01+ da *Nordic Semiconductors*, no entanto, tal abordagem foi descartada pelo baixo alcance da rede, inferior a 50 m. Para trabalhos futuros que visem à aplicação em campo, redes sem fio de maior alcance deverão ser empregadas. O sistema de aquisição de dados permite a medição de até quatro sensores em um único processo, o que reduz o tempo para caracterização de um conjunto de ponteiras. Para aplicações em campo, no entanto, um estudo mais aprofundado se faz necessário para definir a quantidade necessária de sensores.

3.3 Sistema de aquisição de dados - Circuito 1

A Fig. 3.2 expõe o diagrama de blocos do sistema proposto. Para que os blocos lógicos, analógicos e de potência façam uso de uma única fonte de alimentação, um conversor CC-CC chaveado do tipo *boost* e um regulador de tensão (TPS73233 - 3,3V, 250 mA) são empregados.

Figura 3.2: Diagrama de blocos do circuito 1.



Fonte: O autor.

3.3.1 Fonte de tensão

O circuito possui um conversor *boost* TPS61041 da *Texas Instruments*, que pode gerar até 28 V por meio de entradas de baixa tensão, 1,8 V a 6 V. Tal característica viabiliza seu uso com baterias de lítio (*Li-Ion*). Este dispositivo opera com modulação por frequência de pulso (PFM), ou seja, um comparador com histerese controla o acionamento da chave com base no *feedback* da tensão de saída. Assim, a frequência de chaveamento é dependente da corrente de saída. Quando não utilizado, o conversor pode ser desabilitado, reduzindo o consumo para 1 μA e limitando a saída à tensão de entrada.

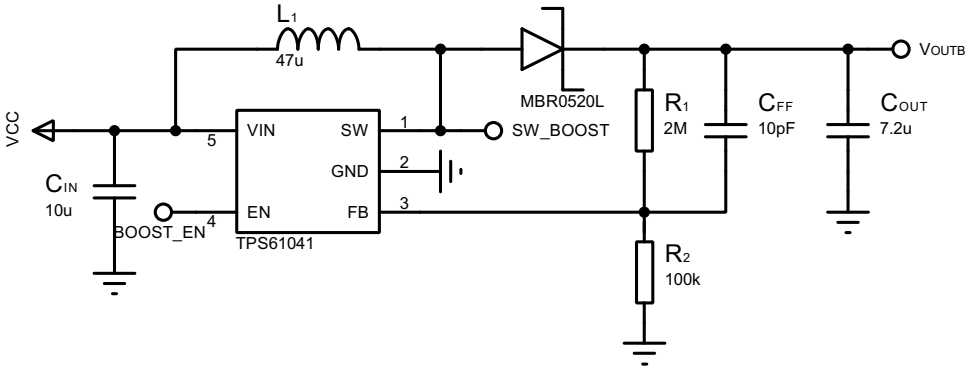
A Fig. 3.3 exibe a configuração empregada. Um valor médio de tensão de 26 V foi empiricamente definido para atender uma dissipação de energia de 1,6 J no pulso de calor. A tensão elevada facilita o controle de corrente no sistema proposto, uma vez que pode-se aproveitar um faixa maior de operação do ADC. A tensão de saída do conversor *boost* (V_{OUTB}) é obtida em função da comparação

do sinal no pino de *feedback* (FB) com uma referência de 1,233 V, assim:

$$V_{OUTB} = 1,233 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \tag{3.1}$$

sendo $R_1 = 2\ M\Omega$, e $R_2 = 100\ k\Omega$.

Figura 3.3: Esquemático do conversor *boost* TPS61041.



Fonte: O autor.

É recomendado o uso de indutores entre 2,2 μH e 47 μH. Uma maior indutância reduz o pico de corrente e, consequentemente, o *ripple* de saída. Assim, optou-se por uma indutância de 47 μH. A regulação do sinal de saída do conversor é dependente do *ripple* sobre o pino de *feedback* (CF). Um capacitor sobre a realimentação (C_{FF}) é necessário para acionar o comparador do controle de tensão. Este capacitor está diretamente associado ao *ripple* de saída, no entanto, capacitâncias elevadas reduzem a regulação de V_{OUTB}. Um capacitor de 10 pF é recomendado na realimentação. Os capacitores de entrada e saída são definidos pelo *datasheet*.

3.3.2 Fonte de corrente

O conversor *boost* com PFM compensa a tensão através da frequência com base na exigência de carga. Assim, a estabilidade de dissipação de energia é assegurada pelo uso de fontes de corrente. Nesta configuração, os ruídos associados aos transientes de fluxo são reduzidos, uma vez que o conversor não controla o fornecimento de corrente à carga. Normalmente, são empregadas configurações de fontes lineares com Amplificador Operacional (AO) e transistor. Assim, sendo o transistor o elemento sensor proposto no trabalho, optou-se por inseri-lo diretamente na fonte de corrente, como exposto na Fig. 3.4. Neste circuito, o resistor R_E define o fluxo de corrente sobre o sensor (I_{sensor}), como:

$$I_{sensor} = \frac{V_{DAC}}{R_E}, \tag{3.2}$$

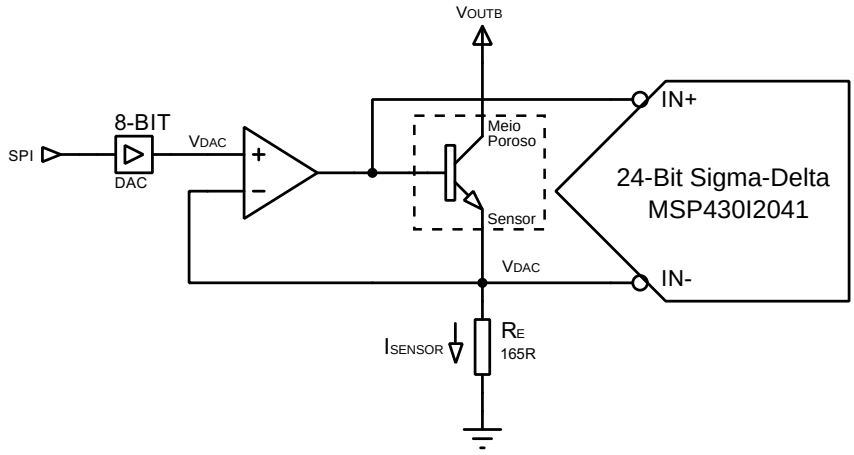
onde V_{DAC} é a tensão analógica fornecida pelo DAC. A máxima tensão de saída do DAC é limitada por uma referência de 1,25 V. Para R_E são utilizadas resistências de 165 Ω ± 0,1 %, ± 25 ppm/^oC.

De forma aproximada, a potência dissipada nos sensores pode ser descrita pela Eq. (3.3).

$$P_{sensor} \approx I_{sensor} (V_{OUTB} - V_{DAC}). \tag{3.3}$$

Assumindo uma potência desejável de 80 mW, tem-se V_{DAC} de 0,529 V e I_{sensor} igual a 3,2 mA. Quando o pulso de calor é desenergizado, tem-se V_{DAC} de 24,5 mV e I_{sensor} de 148,5 μA.

Figura 3.4: Configuração do sensor como fonte de corrente - 1 canal.



Fonte: O autor.

3.4 Sistema de aquisição de dados - Circuito 2

A Fig. 3.5 expõe o diagrama de blocos do segundo circuito. Este sistema opera de forma análoga à primeira configuração. No entanto, a tensão sobre os sensores é fornecida pelo regulador e não mais pelo conversor *boost*. Assim, um maior fluxo de corrente se faz necessário para dissipar uma potência de 80 mW. A corrente sobre o sensor é dada por:

$$I_{sensor} = \frac{V_{DAC}}{R_E}, \tag{3.4}$$

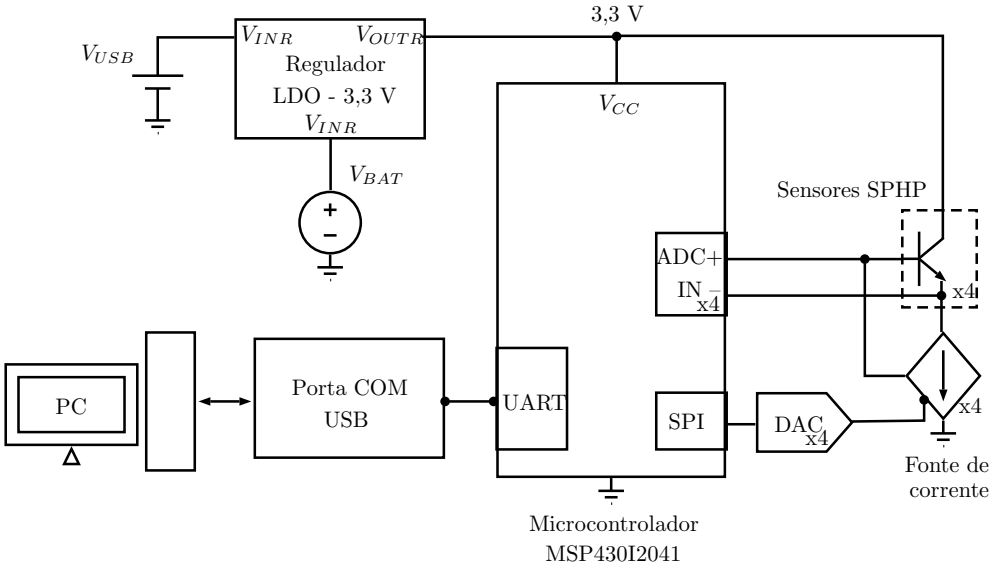
onde V_{DAC} é a tensão analógica fornecida pelo DAC, a qual é limitada por uma referência de 3,3 V. Para R_E são utilizadas resistências de 10 Ω ± 1 %, ± 25 ppm/^oC.

A potência dissipada nos sensores pode ser aproximada pela Eq. (3.5).

$$P_{sensor} \approx I_{sensor} (3,3 - V_{DAC}). \tag{3.5}$$

Assumindo uma potência desejável de 80 mW, tem-se V_{DAC} de 0,264 V e I_{sensor} igual a 26,4 mA. Quando o pulso de calor é desenergizado, tem-se V_{DAC} de 12,94 mV e I_{sensor} de 1,29 mA.

Figura 3.5: Diagrama de blocos do circuito 2.



Fonte: O autor.

3.5 Sistema de aquisição de dados - Circuito 3

O terceiro circuito é esboçado no diagrama da Fig. 3.6. Nesta abordagem, mantém-se V_{CE} estável numa tensão de referência (V_{REF}) de 1,25 V, independentemente da corrente aplicada ao longo do processo. Assim, eliminam-se possíveis influências da tensão de *Early*. O elemento sensor exibe configuração em base comum (base aterrada), o que leva a tensão no emissor (V_E) ser negativa. Assim, diferentemente dos condicionamentos anteriores, é necessária uma alimentação simétrica nos amplificadores. O microcontrolador MSP430I2041 permite a leitura de sinais negativos mesmo com alimentação simples.

Para gerar uma tensão simétrica foi utilizado o conversor de tensão *charge-pump* LM2776, *Texas Instruments*, o qual é capaz de inverter tensões de 2,7 V à 5,5 V para seus valores negativos correspondentes. Este componente necessita de apenas três capacitores adicionais, sem a necessidade de indutores. Assim, a alimentação simétrica aplicada foi de ± 3,3 V. Amplificadores operacionais *rail-to-rail* TLV2375 foram utilizados. Estes dispositivos permitem uma alimentação simples de 2,7 V a 16 V ou simétrica de ± 1,35 V a ± 8 V, assim, foram empregados nos três circuitos.

Uma fonte de corrente clássica com um transistor PNP controla o pulso de

calor. Neste circuito, o resistor R_E define o fluxo de corrente sobre o sensor (I_{sensor}), como:

$$I_{sensor} \;=\; \frac{V_{CC} - V_{DAC}}{R_E}, \tag{3.6}$$

onde V_{DAC} é a tensão analógica fornecida pelo DAC e V_{CC} a tensão de alimentação, 3,3 V. A máxima tensão de saída do DAC é limitada por uma referência de 3,3 V. Para R_E são utilizadas resistências de 10 Ω ± 1 %, ± 25 ppm/^oC.

A tensão sobre o coletor do sensor (V_C) é compensada por meio de um circuito somador não inversor, tal como exposto na Eq. (3.7).

$$V_C \;=\; \left(1 + \frac{R_{A1}}{R_{A2}}\right) \left(\frac{R_{D2}}{R_{D1} + R_{D2}}\, V_E \;+\; \frac{R_{D1} + R_P}{R_{D1} + R_{D2} + R_P}\, V_{REF}\right). \tag{3.7}$$

Assumindo $R_P \ll R_{D1}$, e tomando $R_{D1} = R_{D2} = 100\ k\Omega$ e $R_{A1} = R_{A2} = 10\ k\Omega$. A Eq. (3.7) pode ser aproximada como:

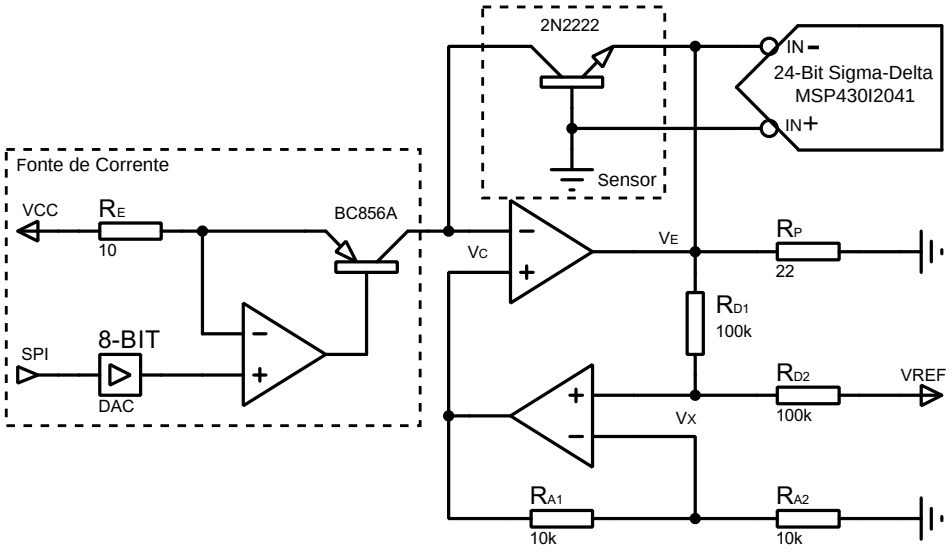
$$V_C \;\approx\; V_E + V_{REF}. \tag{3.8}$$

Logo, a potência dissipada no sensor pode ser aproximada por:

$$P_{sensor} \;\approx\; I_{sensor}\, V_{REF}. \tag{3.9}$$

Assumindo uma potência desejável de 80 mW, tem-se V_{DAC} de 2,66 V e I_{sensor} igual a 64 mA. Quando o pulso de calor é desenergizado, tem-se V_{DAC} de 3,274 V e I_{sensor} de 2,6 mA. O resistor R_P garante o fluxo de corrente e a correta polarização do sensor.

Figura 3.6: Circuito 3.



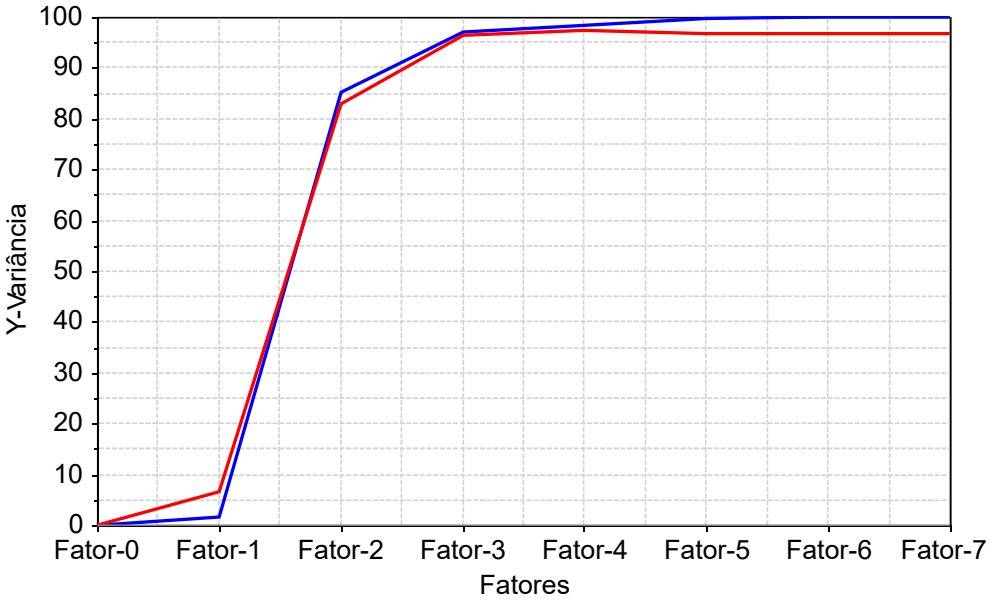
Fonte: O autor.

3.6 Regressão por mínimos quadrados parciais

Os modelos de predição discutidos ao longo deste trabalho são desenvolvidos com o uso de regressões por mínimos quadrados parciais (PLS). Assim, há o interesse de expor gráficos comuns à técnica nesta seção.

O algoritmo PLS busca encontrar o fator ótimo que explica a máxima variância da variável Y. Normalmente, quanto menor o índice do fator mais confiável é o modelo. Fatores de maior ordem tendem à superestimar a regressão. Assim, no processo de calibração, o mesmo deve ser confrontado com os resultados da validação cruzada. A Fig. 3.7 traz a variância explicada de Y em função do índice do fator. A curva azul é a variância do conjunto de calibração, enquanto a vermelha refere-se à validação cruzada. Nota-se que o Fator-3 exibe a menor discrepância entre as curvas e a maior porcentagem de variância explicada, ou seja, é o fator ótimo para o modelo.

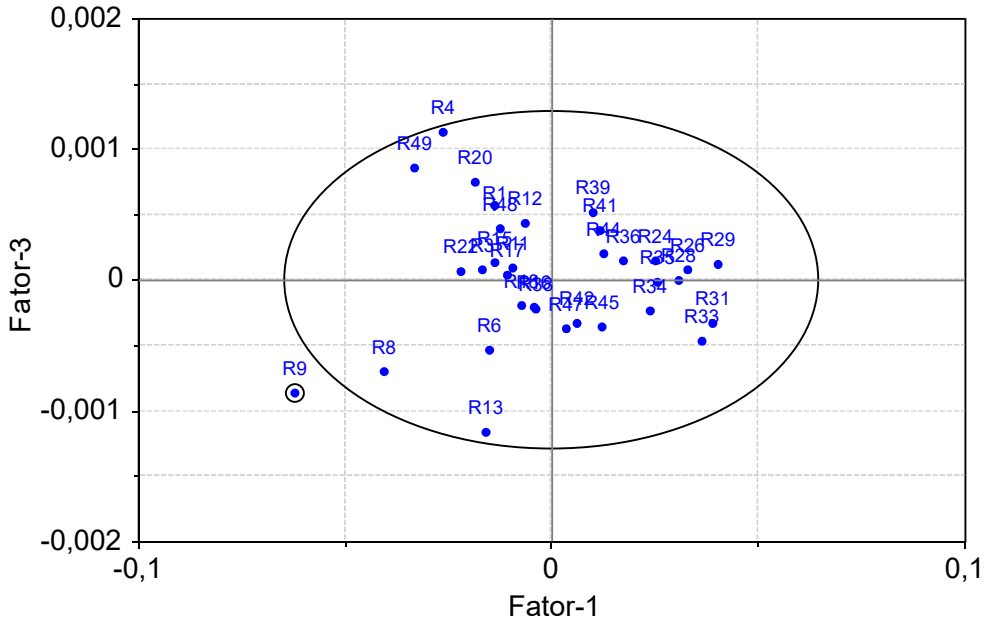
Figura 3.7: Variância explicada de Y em função do fator calculado.



Fonte: O autor.

A Fig. 3.8 mostra a distribuição do conjunto de calibração para o Fator-3 da Fig. 3.7. Os pontos internos à elipse tem sua variância explicada pelo fator com um intervalo de confiança de 95 %. Nota-se que apenas a amostra R9 não é explicada pelo modelo, sendo considerada um *outlier*. Para o desenvolvimento de um modelo de predição robusto, o conjunto de calibração deve estar aleatoriamente distribuído pela elipse.

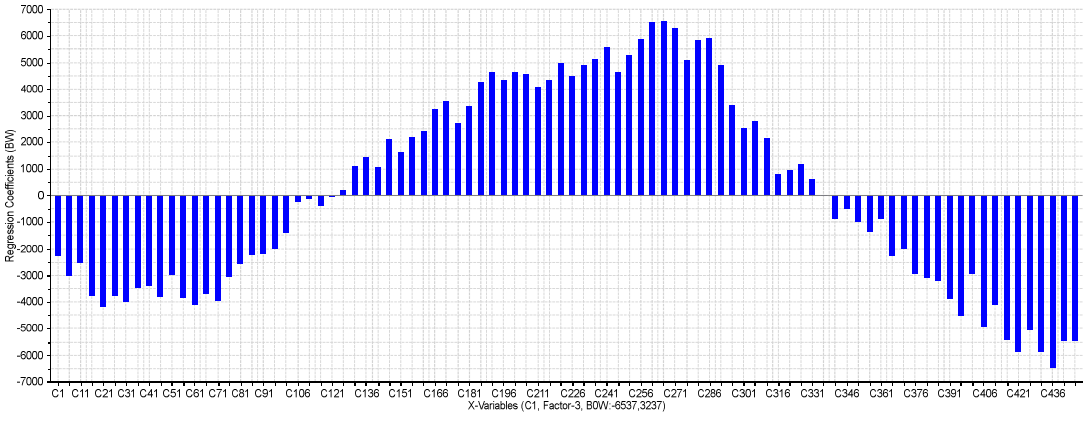
Figura 3.8: Distribuição de *scores* para cada amostra em função do fator.



Fonte: O autor.

A Fig. 3.9 exibe os coeficientes de regressão para o fator da Fig. 3.7. Este conjunto descreve o modelo de predição do grau de saturação de um bloco de gesso. Neste exemplo, são utilizados 90 preditores da curva de variação de V_{BE} ao longo do pulso de calor (2 amostras por segundo - 45 s). Com auxílio da Fig. 3.9, também são identificados possíveis preditores que não contribuem significativamente ao modelo. Logo, é possível realizar um estudo dos principais componentes do modelo e reduzir o número de preditores, caso haja o interesse.

Figura 3.9: Coeficientes da regressão - Fator 3.



Fonte: O autor.

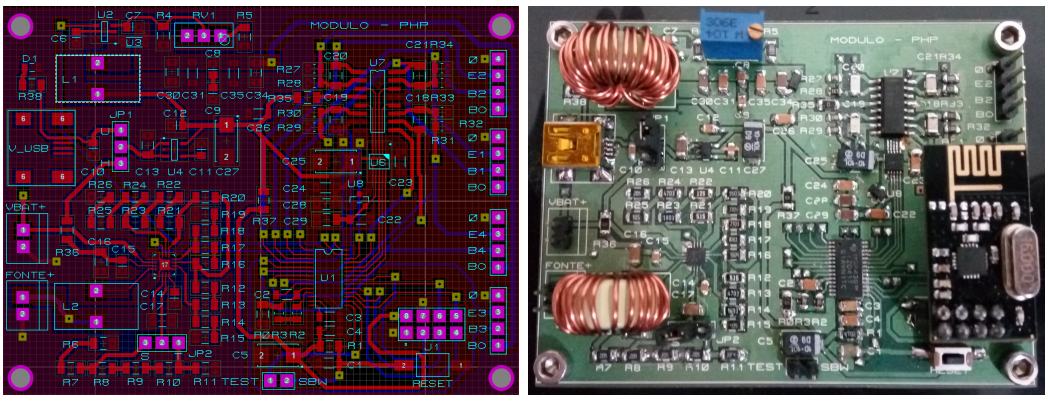
4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os circuitos desenvolvidos, os testes realizados e os resultados obtidos. Estudos preliminares para definição do encapsulamento dos sensores e da metodologia para predição de umidade em matrizes porosas foram realizados exclusivamente com o primeiro circuito. Os três circuitos propostos foram então comparados por meio de uma metodologia padronizada. Em comum, todos os circuitos foram avaliados quanto a capacidade de predição do grau de saturação em quatro blocos de gesso.

4.1 Circuitos desenvolvidos

O primeiro circuito de aquisição é apresentado na Fig. 4.1. O *layout* da placa de circuito impresso (PCI) é apresentado na Fig. 4.1a, sua montagem é destacada na Fig. 4.1b. Os indutores foram enrolados manualmente em um núcleo toroidal de ferrite, sendo a indutância verificada por meio de uma ponte RLC. A placa desenvolvida possui comprimento de 80 mm e largura de 60 mm. Este circuito é capaz de condicionar até quatro sensores ao mesmo tempo.

Figura 4.1: Sistema de aquisição de dados - Circuito 1.

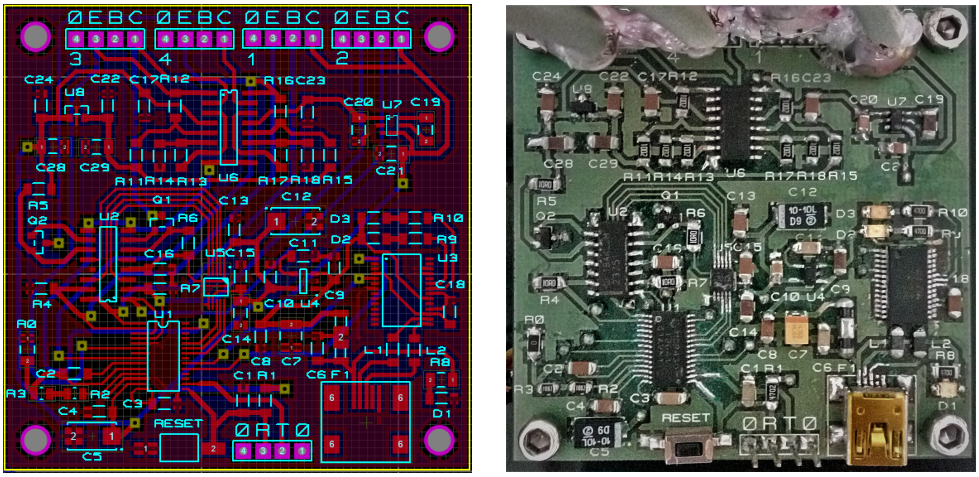


(a) *Layout* da PCI. **(b)** PCI montada.

Fonte: O autor.

A Fig. 4.2 exibe o segundo sistema de aquisição de dados com duas topologias de condicionamento distintas. O *layout* da PCI é apresentado na Fig. 4.2a, sua montagem é destacada na Fig. 4.2b. A placa exibe dimensões quadradas de 60 mm. Cada circuito é capaz de condicionar até dois sensores ao mesmo tempo.

Figura 4.2: Sistema de aquisição de dados - Circuitos 2 e 3.



(a) *Layout* da PCI. **(b)** PCI montada.

Fonte: O autor.

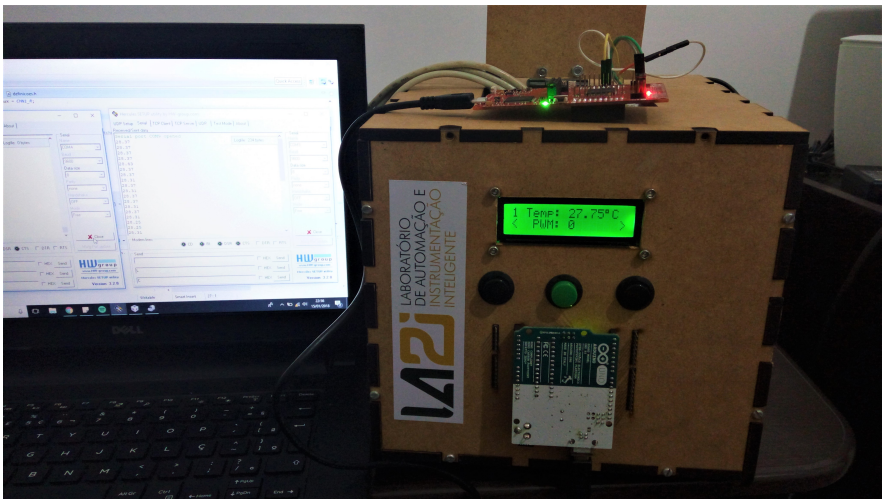
4.2 O transistor como sensor de temperatura

Normalmente, a variação de temperatura é tomada como entrada nas curvas de calibração clássicas para predição do conteúdo de água de uma matriz porosa. Assim, se faz necessário avaliar a exatidão dos sensores na medição de tal variável. Quatro ponteiras sem encapsulamento foram fabricadas e avaliadas em uma câmara térmica, como exposto na Fig. 4.3. Ao todo, seis temperaturas distintas foram configuradas (Temperatura ambiente, 30 ^oC, 35 ^oC, 40 ^oC, 45 ^oC e 50 ^oC). Foram realizadas medições de V_{BE} ao longo de um minuto com o circuito 1 para cada temperatura, sem a aplicação dos pulsos de calor. O processo de avaliação da temperatura na câmara foi repetido três vezes.

Neste trabalho, optou-se por correlacionar V_{BE} com a temperatura através da Eq. (2.17). Respectivamente, T_0 e V_{BE0} foram assumidos como a temperatura ambiente medida para dado V_{BE} de cada sensor. A temperatura registrada pelas ponteiras é obtida através de um algoritmo *simplex* iterativo de resolução numérica e comparada com as medidas do sensor de temperatura LM92[1]. Este dispositivo apresenta uma resolução de 0,0625 ^oC e comunicação I_2C. Como o objetivo do experimento foi avaliar a exatidão da Eq. (2.17) com transistores bipolares, não houve a necessidade de um sensor de referência mais preciso.

[1]Desvios máximos de ± 0,33 ^oC em 30 ^oC e ± 0,5 ^oC em 50 ^oC.

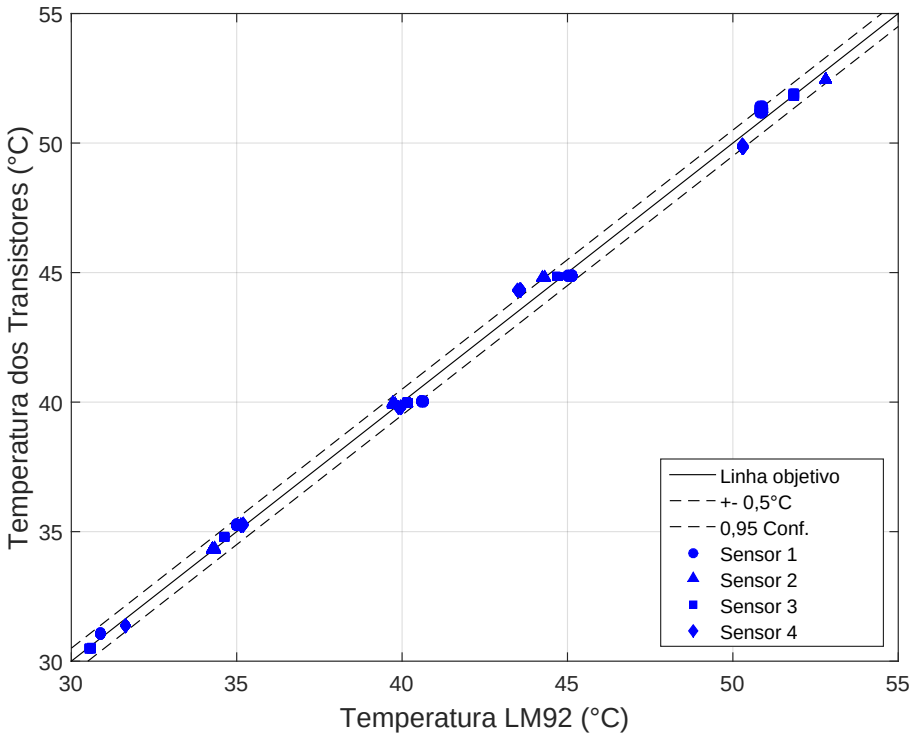
Figura 4.3: Ensaio realizado em câmara térmica para avaliação das ponteiras como sensores de temperatura.



Fonte: O autor.

A Fig. 4.4 exibe a curva da temperatura medida pelos quatro sensores em função da leitura do LM92. Nota-se que a Eq. (2.17) apresenta boa aproximação quanto a temperatura de referência, com desvios inferiores à $\pm$ 0,5 ^oC.

Figura 4.4: Temperatura medida pelos transistores por meio da Eq. (2.17).



Fonte: O autor.

A Tab. 4.1 traz os parâmetros de regressão da curva de temperatura dos sensores, como o coeficiente de determinação (R^2) e o erro quadrático médio (RMSE). Registra-se um R^2 superior a 0,9960 e RMSES próximos à incerteza do sensor de temperatura de referência.

Tabela 4.1: Parâmetros da regressão da curva de temperatura dos sensores.

Sensor	R^2	RMSE (^oC)
1	0,9974	0,36
2	0,9976	0,35
3	0,9982	0,33
4	0,9960	0,41

Fonte: O autor.

Este experimento indicou que a aproximação fornecida pela Eq. (2.17) exibe elevada confiabilidade para determinação da temperatura de um transistor bipolar. Assim, com base nestes resultados, optou-se por calibrar a medição de temperatura de todas as ponteiras verificando V_{BE} em uma temperatura conhecida, ou seja, V_{BE0} em dado T_0, sem aplicação do pulso de calor. No pulso de calor, V_{BE} sofre uma mudança instantânea devido à variação do fluxo de corrente e por influências da tensão de *Early*, assim, um novo V_{BE0} é calculado para o mesmo T_0. De forma aproximada, o primeiro ponto medido na aplicação do pulso de calor, para o qual tomou-se o V_{BE0} de referência, é considerado como o V_{BE0} do pulso de calor, ou seja, considera-se que o transistor ainda não sofreu auto-aquecimento.

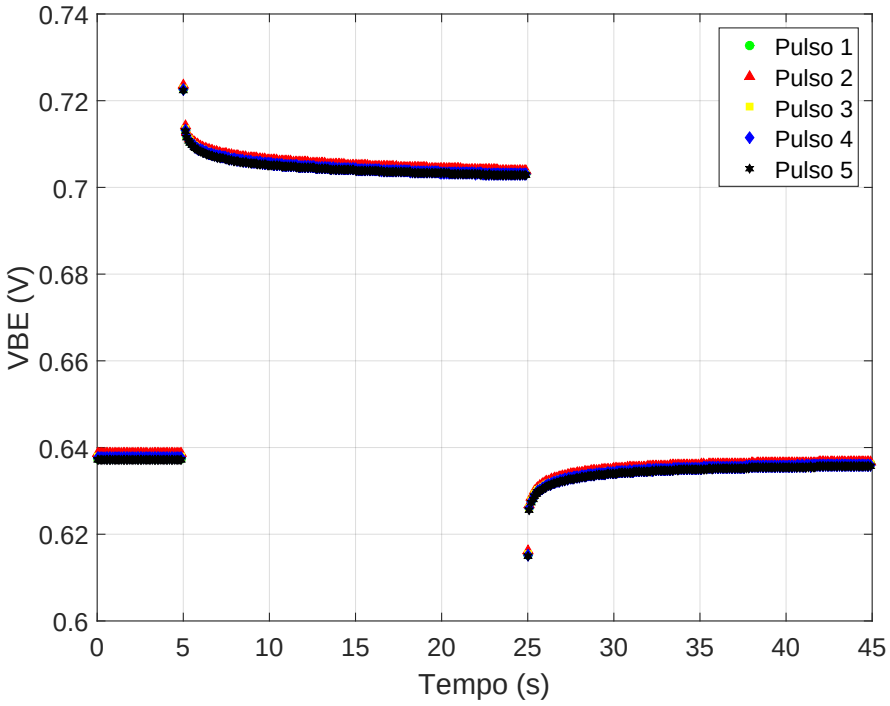
4.3 O transistor como SPHP

A Fig. 4.5a apresenta a mudança de V_{BE} registrada pelo sistema de aquisição de dados com o circuito 1. São exibidas as respostas para cinco pulsos de calor em uma mesma ponteira com encapsulamento de gesso seco. Optou-se neste trabalho, em metodologias mais recentes, registrar 45 s da resposta ao pulso de calor visando utilizar a curva de aquecimento e resfriamento na predição de umidade. Os primeiros 5 s registram o estado inicial sem auto-aquecimento da junção pn. Posteriormente, são registrados os 20 s de aplicação do pulso de calor. A junção sofre um elevado aquecimento quase instantâneo, no entanto, a medida que o meio poroso absorve calor, a variação de temperatura se torna menos intensa. Por fim, 20 s do resfriamento da junção são registrados. Este processo ocorre de maneira análoga ao aquecimento, ou seja, também há um resfriamento quase instantâneo da junção nos instantes iniciais.

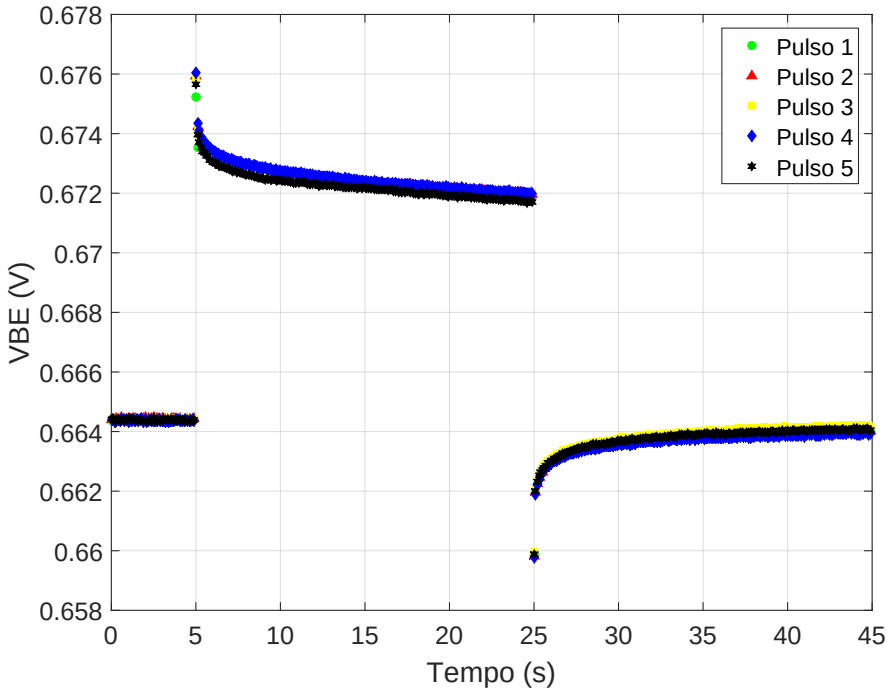
Os sensores seguem a curva característica registrada na Fig. 4.5a para os circuitos 1 e 2, ou seja, o registro da variação de temperatura em uma mesma ponteira pelos dois circuitos é similar. No entanto, as medições de V_{BE} se di-

ferem, uma vez que níveis distintos de tensão e corrente são empregados. O terceiro circuito, com transistores configurados como base comum, exibe uma menor variação de V_{BE} ao longo do pulso de calor, como registrado na Fig. 4.5b. Logo, também apresenta menor sensibilidade à umidade quando comparado aos circuitos anteriores.

Figura 4.5: Variação de V_{BE} ao longo da aplicação de pulsos de calor.



(a) Circuito 1.



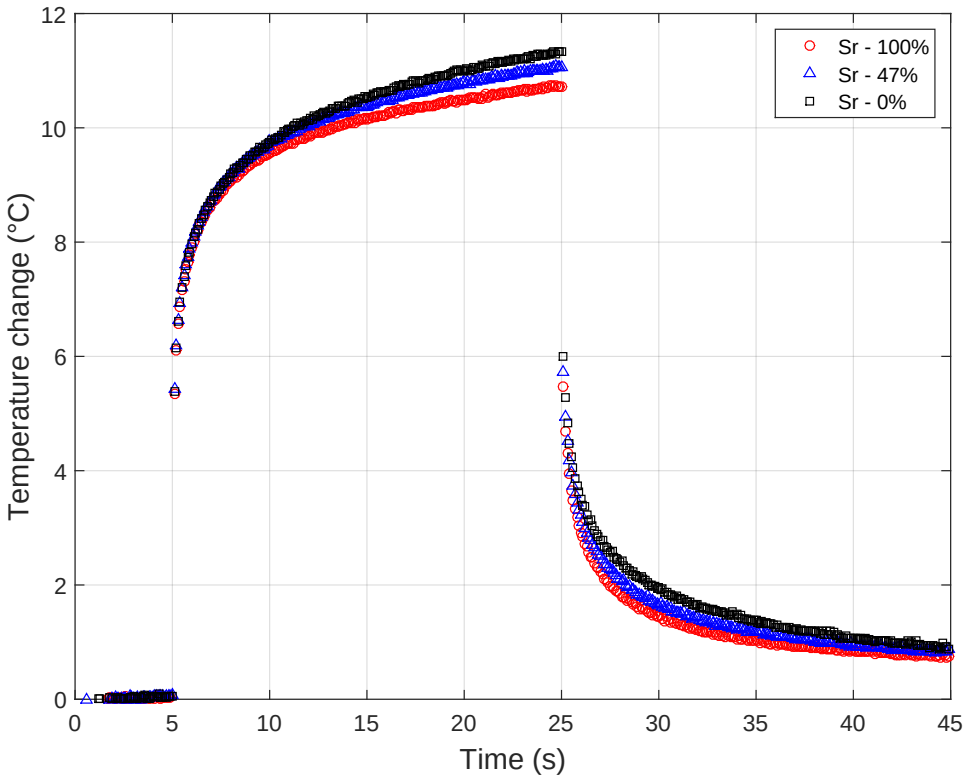
(b) Circuito 3.

Fonte: O autor.

Estes cinco registros foram realizados com intuito de avaliar a estabilidade de resposta do sistema. Na curva de aquecimento do circuito 1, o desvio máximo entre as variações de V_{BE} foi de 0,1 mV, o que reflete em uma incerteza próxima à 0,05 ^oC. Os desvios associados à medição de umidade, no entanto, dependem da máxima variação de temperatura registradas entre as condições secas e saturadas de determinado material.

A Fig. 4.6 exibe a resposta térmica ao pulso de calor para três graus de saturação distintos (0 %, 47 %, e 100 %), registrados em um mesmo bloco de gesso no circuito 1. Os valores de temperatura foram calculados por meio da Eq. (2.17). O maior pico de temperatura é observável em uma condição seca, 11,34 ^{o}C. Na saturação, registra-se um pico de 10,72 ^{o}C. Assim, este bloco de gesso apresenta uma variação máxima de 0,68 ^{o}C entre as condições seca e saturada ao longo do pulso de calor. Também é notório que a curva de resfriamento carrega informação sobre o grau de saturação da matriz porosa em análise. Desta forma, mostra-se promissor o uso das informações contidas ao longo do aquecimento e resfriamento da junção na definição de modelos de predição de umidade em matrizes porosas.

Figura 4.6: Variação de temperatura ao longo da aplicação de pulsos de calor - Circuito 1.



Fonte: O autor.

4.4 Sistema de aquisição de dados - Circuito 1

Esta seção descreve os testes realizados com o circuito 1, a metodologia empregada e os resultados obtidos. Em um primeiro teste, sensores com encapsulamentos de gesso e cimento foram posicionados em uma mesma amostra de solo, a qual foi submetida ao acréscimo de massas conhecidas de água. Em um segundo experimento, amostras de solo foram saturadas, sendo os sensores avaliados ao longo do processo de secagem. Por fim, o terceiro teste avaliou a capacidade do sistema em predizer o grau de saturação em blocos gesso.

4.4.1 Adição de concentrações conhecidas de água

Sensores com encapsulamentos de gesso e cimento (25,4 mm x 50 mm) foram posicionados em uma amostra de latossolo roxo distrófico deformado, Fig. 4.7, de 320 g. Este tipo de solo está presente na região norte do Paraná, logo, optou-se por utilizar esta tipo de amostra para simular uma situação próxima à aplicação de campo. A cada 60 minutos, 5 % da massa em água, 16 g, foi adicionada ao sistema, percorrendo o intervalo entre 0 % e 45 % de umidade. As medições foram realizadas antes de cada modificação no índice de saturação. No total, ocorreram cinco baterias de testes, para as quais os resultados foram comparados ao método gravimétrico.

Figura 4.7: Amostra de solo.

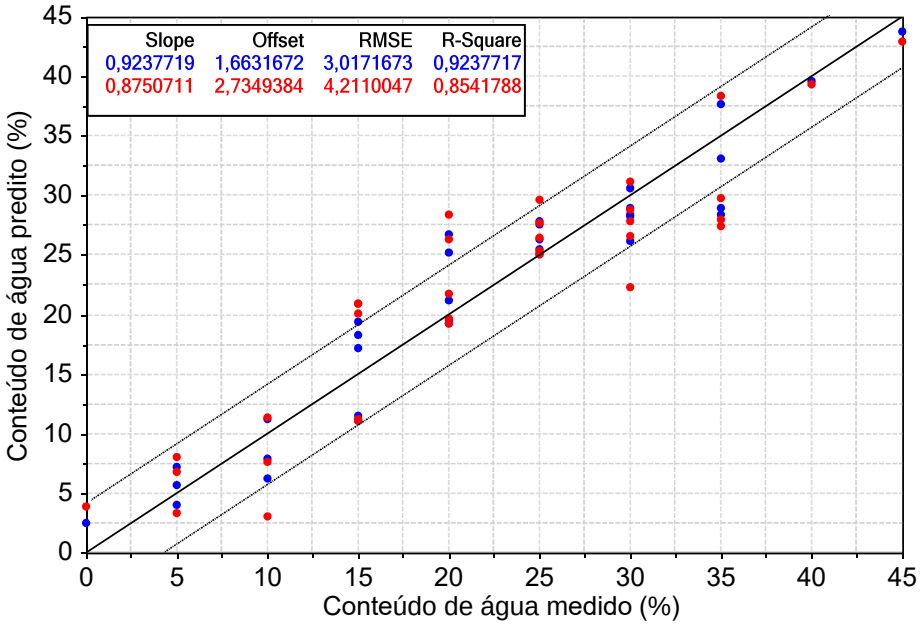
Fonte: O autor.

Com intuito de evitar o uso de curvas de calibração epíricas, optou-se, neste trabalho, pelo uso da regressão por mínimos quadrados parciais com um intervalo

de confiança de 0,95. Neste experimento, os preditores da regressão (**X**) foram adotados como os valores de V_{BE} registrados anteriormente e ao longo do pulso de calor, à uma taxa de duas amostras por segundo (50 pontos). Nesta etapa, ainda não havia o registro da curva de resfriamento da junção.

O resultado obtido para o sensor inserido no bloco de gesso é apresentado na Fig. 4.8, a qual exibe a relação entre a curva de predição e a medida de referência do conteúdo de água na amostra de solo sob análise. Foram utilizadas 39 amostras para calibração do sistema. Ao todo, 11 *outliers* eletrônicos foram removidos em função de elevados ruídos na medição de V_{BE}. Atribui-se tais interferências à conexão dos cabos. A validação cruzada foi realizada com cinco amostras por segmento. Para a curva de calibração obteve-se um R^2 de 0,9238 com um RMSE de 3,02 %. Já na validação cruzada registra-se um R^2 de 0,8542 com um RMSE de 4,21 %. Em termos absolutos, o dispositivo exibiu um erro de predição máximo de 8 % ao longo da faixa de medição.

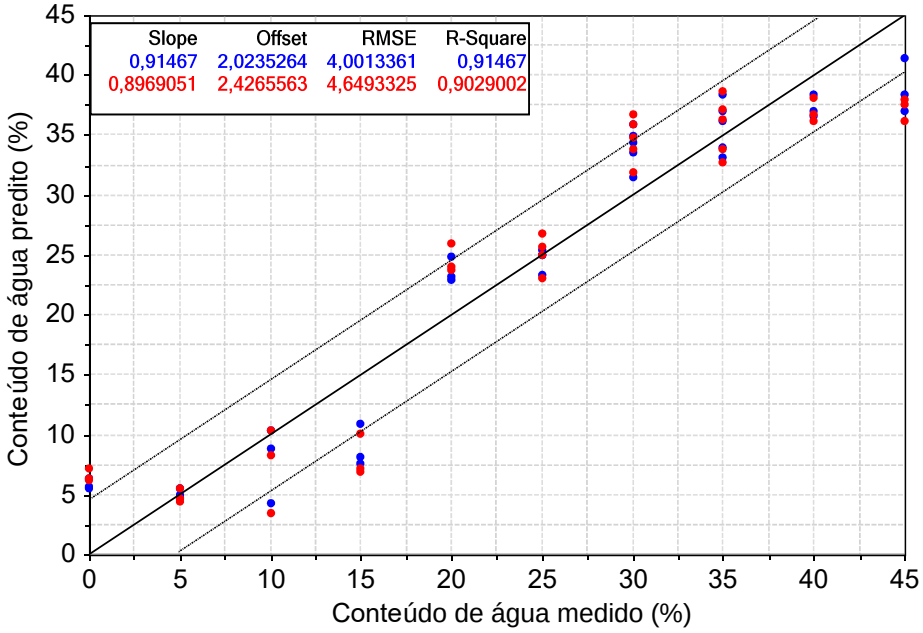
Figura 4.8: Relação entre os valores preditos e os medidos para o conteúdo de água no solo - Conjunto de calibração e validação cruzada do bloco de gesso.



Fonte: O autor.

A Fig. 4.9 exibe a curva de calibração registrada para a ponteira inserida no bloco de cimento. Foram utilizadas 37 amostras para calibração do sistema, logo 13 *outliers* foram removidos. A validação cruzada foi realizada com cinco amostras por segmento. Para a curva de calibração, obteve-se um R^2 de 0,9147 com um RMSE de 4,00 %. Já na validação cruzada, registra-se um R^2 de 0,9029 com um RMSE de 4,65 %. Em termos absolutos, o sensor exibiu um erro de predição máximo de 7 % ao longo da faixa de medição.

Figura 4.9: Relação entre os valores preditos e os medidos para o conteúdo de água no solo - Conjunto de calibração e validação cruzada do bloco de cimento.



Fonte: O autor.

Apesar do erro médio superior registrado no bloco de cimento, tal estrutura se mostrou mais estável e resistente quando comparada ao bloco de gesso. Para a faixa de umidade analisada, o bloco de cimento exibiu uma variação máxima de temperatura de 0,68 ^oC. Já para o gesso, o registro máximo foi de 1,8 ^oC. Os resultados obtidos com o encapsulamento de cimento neste teste levaram à elaboração de uma segunda prática para avaliação da matriz em uma condição mais próxima à aplicação em campo.

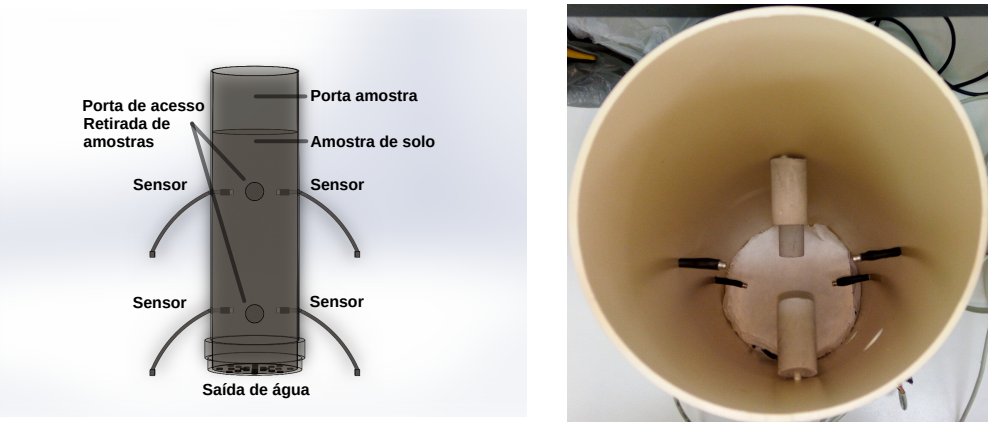
4.4.2 Análise ao longo do processo de secagem

No primeiro ensaio, concentrações conhecidas de água foram adicionadas na amostra de solo, a qual foi analisada a cada hora. Em função do curto período entre as medidas, não foi possível definir se os sensores encontravam-se em equilíbrio hidrostático com o meio ou se estavam forçadamente úmidos. Assim, um segundo teste foi realizado inserindo sensores com encapsulamento de cimento em uma amostra de solo inicialmente saturada. O processo de secagem do sistema foi acompanhado ao longo de 20 dias. Ponteiras sem encapsulamento também foram inseridas na amostra. Objetivava-se analisar possíveis influências da matriz nas respostas dos sensores.

Ao todo, foram confeccionados oito sensores, organizados em um tubo de PVC com 15 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento. Em cada tubo, um conjunto de

quatro sensores foi posicionado em alturas de 10 cm e 30 cm, Fig. 4.10a. Metade do conjunto de transistores foi colocado diretamente em contato com o solo. Nas alturas de medição existem aberturas para retirada de amostras. A amostra foi saturada na estrutura, assim, foi necessário furar a parte inferior do tubo para permitir a passagem do excesso de água. Uma camada composta por estopa e filtros de papel impedem o escoamento da amostra. Houve a padronização do solo em uma granulometria de 0,84 mm. Tal ação homogeniza a estrutura e reduz desvios na medição associados à heterogeneidade da matriz.

Figura 4.10: Estrutura utilizada no ensaio.



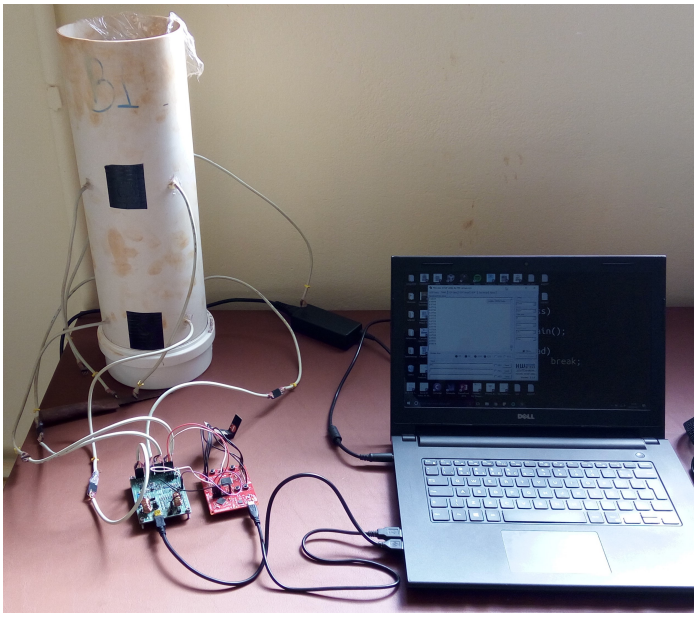
(a) Modelo 3D da estrutura.

(b) Vista superior do tubo.

Fonte: O autor.

A Fig. 4.11 exibe a aquisição de dados no sistema e a transferência ao computador pela UART. Ao longo do processo de medição, a umidade no solo tendeu à estabilização, o que levou à necessidade de secagem da amostra em estufa.

Figura 4.11: Bancada do experimento.



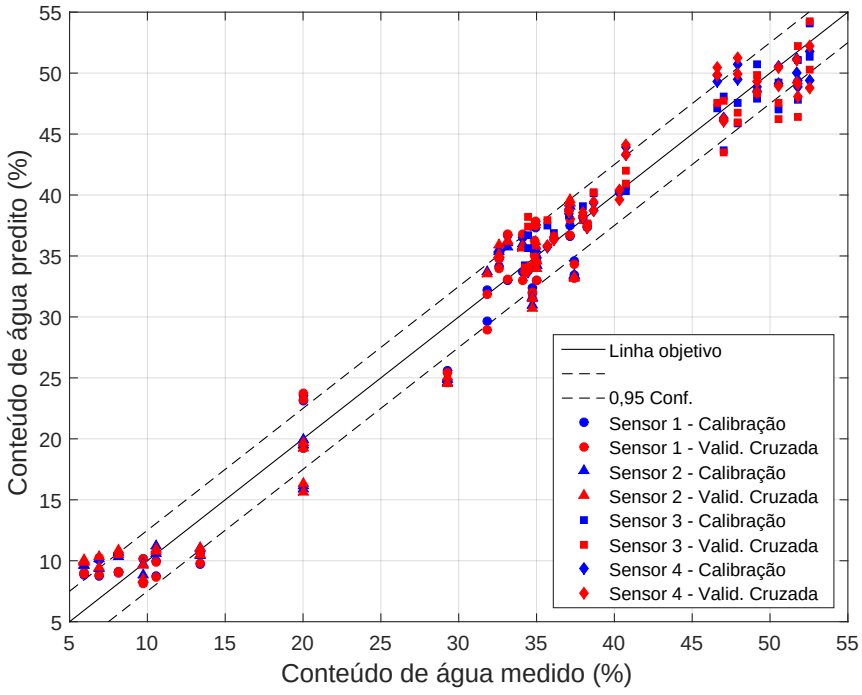
Fonte: O autor.

Através deste teste foi possível verificar que as ponteiras revestidas com cimento não foram capazes de entrar em equilíbrio hidrostático com a amostra em análise. Logo, não foi possível criar um modelo de predição para tal sistema. Assim, descarta-se o uso de tais revestimentos cimentícios em aplicações de campo.

Os sensores em contato direto com a amostra, no entanto, exibiram significativa sensibilidade na resposta ao pulso para dada umidade registrada no solo. Em média, entre as condições seca e saturada, foi observável uma diferença próxima a 1,5 ^oC. Novamente, regressões PLS foram realizadas para cada sensor, tomando 50 preditores da curva de aquecimento. Ao todo, 40 medidas foram realizadas. Em função do número de amostras, apenas a regressão de calibração e a validação cruzada foram feitas, Fig. 4.12. A secagem forçada em estufa levou à formação de lacunas no gráfico. Os sensores da porção superior sofreram uma ação de secagem mais intensa. Entretanto, é possível avaliar que a regressão PLS em dispositivos SPHP se mostra promissora para aplicações diretas no solo.

Em média, com base nas informações da Tab. 4.2, o conjunto de calibração apresenta R^2 de 0,9415 e RMSEC de 2,11 %, enquanto na validação cruzada registra-se um R^2 de 0,9280 e um RMSECV de 2,37 %. O erro máximo absoluto é inferior a 5 %. Tais resultados são superiores aos obtidos no experimento anterior e exibem menores desvios que os registrados por Li et al. (2016), 11 % em areia grossa, Sheng et al. (2016) e Sayde et al. (2010), até 4,6 % em areia fina.

Figura 4.12: Conteúdo de água na amostra de solo (θ) - Curva de calibração.



Fonte: O autor.

Tabela 4.2: Parâmetros da regressão PLS - Conteúdo de água na amostra.

Sensor	Fatores (Componentes)	Calibração		Validação Cruzada	
		R^2	RMSEC	R^2	RMSECV
1	3	0,9603	2,32	0,9590	2,43
2	3	0,9496	2,63	0,9503	2,72
3	4	0,9082	2,00	0,8717	2,59
4	4	0,9478	1,50	0,9311	1,73

Fonte: O autor.

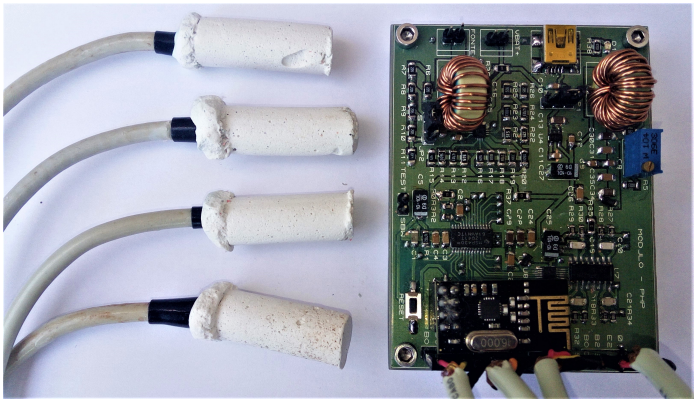
4.4.3 Grau de saturação em blocos de gesso

Coma a falta de sensibilidade registrada para os blocos de cimento, novas ponteiras inseridas em encapsulamentos de gesso foram desenvolvidas. Estruturas com boa resistência mecânica foram obtidas com dimensões de 12,7 mm de largura e 30 mm de comprimento. A partir deste experimento, a curva de resfriamento da junção passou a ser registrada, o que permitiu seu uso nas curvas de calibração.

Quatro ponteiras foram avaliadas quanto à predição do grau de saturação, Fig. 4.13. Assim, os blocos de gesso foram saturados e secos naturalmente ao ar livre, cinco vezes. Ao longo dos processos de secagem, 50 medidas foram registradas para definição do modelo de predição do grau de saturação (S_r) de cada bloco, com base nas referências tomadas pela Eq. (2.3). Os sensores foram pesados com uma balança eletrônica de precisão (0,01 g). O processo de secagem não forçado em temperatura ambiente levou de 24 à 48 h.

A determinação do grau de saturação das ponteiras é um parâmetro importante, uma vez que traz indicativos normalizados sobre a capacidade do sensor em detectar umidade. Tal variável pode ser posteriormente correlacionada com o conteúdo de água de determinado solo, quando as duas matrizes porosas entram em equilíbrio hidrostático. A metodologia aqui descrita também serviu de padrão para analisar os outros dois circuitos propostos.

Figura 4.13: Sistema de aquisição de dados 1 e ponteiras fabricadas.



Fonte: O autor.

A regressão PLS foi avaliada de forma a se encontrar o menor conjunto de preditores suficientes para criação de um modelo sem um aumento considerável do erro de estimação. Durante 45 segundos, 90 pontos se mostraram suficientes para predizer S_r com desvios próximos ao uso de 450 pontos. As medidas de V_{BE} carregam informação sobre a temperatura inicial da matriz porosa e do seu comportamento térmico ao longo do aquecimento e resfriamento.

Randomicamente, 35 amostras foram separadas para calibração e 15 para predição (70 % - 30 %). Alguns *outliers* foram removidos para o desenvolvimento dos modelos de regressão para cada sensor. Os sensores 3 e 4 exibiram um grande número de *outliers* descartados (Até 13) em função de elevados ruídos eletrônicos registrados por conexões não satisfatórias dos cabos. A Fig. 4.14 expõe o conjunto utilizado para calibração e a validação cruzada com cinco segmentos, enquanto os pontos utilizados para avaliação do modelo de predição são apresentados na Fig. 4.15. A Tab. 4.3 registra os parâmetros estatísticos de qualidade de ajuste dos modelos de regressão, como o coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE) e o número de amostras utilizadas no modelo.

Em média, um R^2 de 0,9778 e um RMSEC de 4,00 % foram observados no conjunto de calibração, enquanto os pontos utilizados para avaliar a predição exibiram R^2 de 0,9722 e um RMSEP de 4,78 %. É notório que as quatro ponteiras avaliadas apresentam desvios de predição próximos e inferiores à 5,30 %. Apesar do erro absoluto ser superior aos registrados no ensaio anterior, o erro relativo das ponteiras avaliadas nos blocos de gesso é similar aos observados nos sensores sem encapsulamento inseridos diretamente em amostras de solo.

Tabela 4.3: Parâmetros de qualidade de ajuste das regressões - Grau de saturação em blocos de gesso.

Sen.	Fator	Calibração		Validação cruzada		Predição		Amostras
		R^2	RMSEC	R^2	RMSECV	R^2	RMSEP	Calib.
1	3	0,9707	4,77	0,9645	5,30	0,9759	4,20	33
2	4	0,9856	3,44	0,9790	4,31	0,9665	4,98	31
3	4	0,9845	3,69	0,9794	4,66	0,9730	4,92	26
4	3	0,9706	4,12	0,9547	5,16	0,9732	5,02	29

Fonte: O autor.

Figura 4.14: Grau de saturação dos blocos de gesso - Curva de calibração.

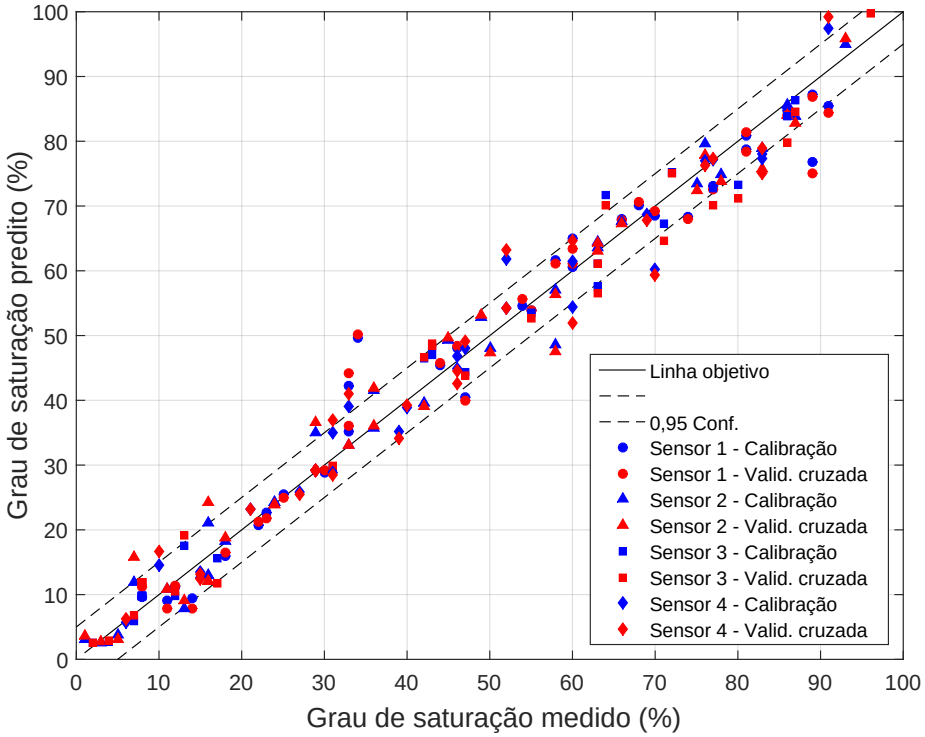
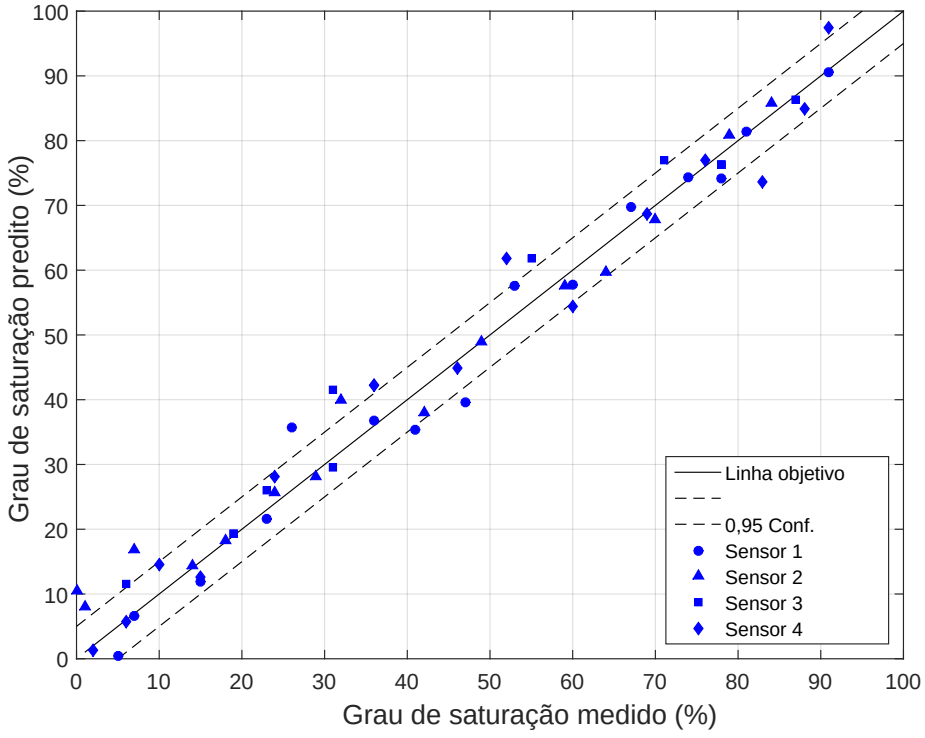


Figura 4.15: Grau de saturação dos blocos de gesso - Curva de predição.



Optou-se pelo uso dos 90 pontos registrados durante toda a curva de variação de V_{BE} por considerar tal modelagem mais robusta e generalizada. Futuras investigações são necessárias para definir se o uso exclusivo da curva de aquecimento ou de resfriamento também permite o desenvolvimento de regressões com baixos desvios associados. Testes preliminares com os blocos de gesso indicam que, nesta matriz porosa, o uso exclusivo dos pontos de aquecimento (50 pontos) tende a elevar, em até 1,5 %, o erro médio absoluto na predição do grau de saturação. Enquanto o uso dos pontos de resfriamento (50 pontos) exibe erros de predição próximos ao uso do conjunto completo. As Fig. 4.16 e Fig. 4.17 expõem as curvas de calibração do bloco de gesso 3 para o aquecimento e resfriamento, respectivamente, com regressões de Fator-3.

Figura 4.16: Grau de saturação do blocos de gesso 3 - Curva de aquecimento.

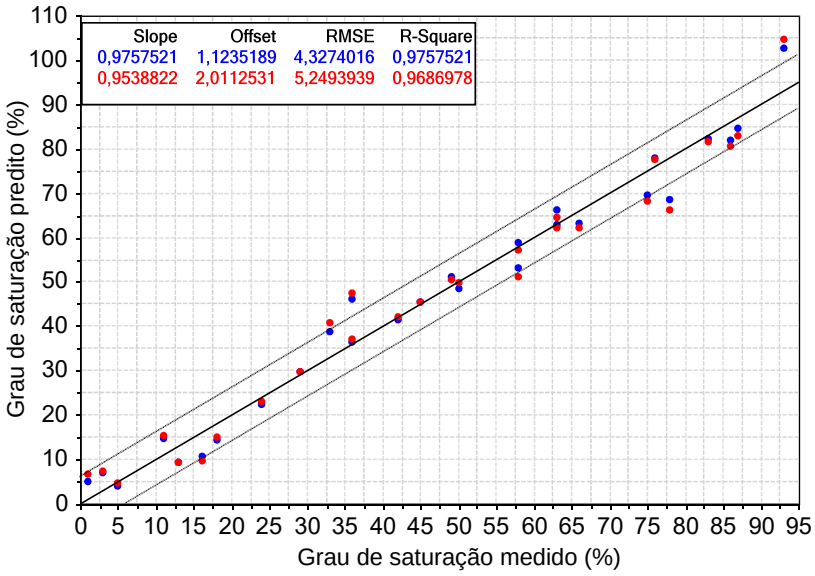
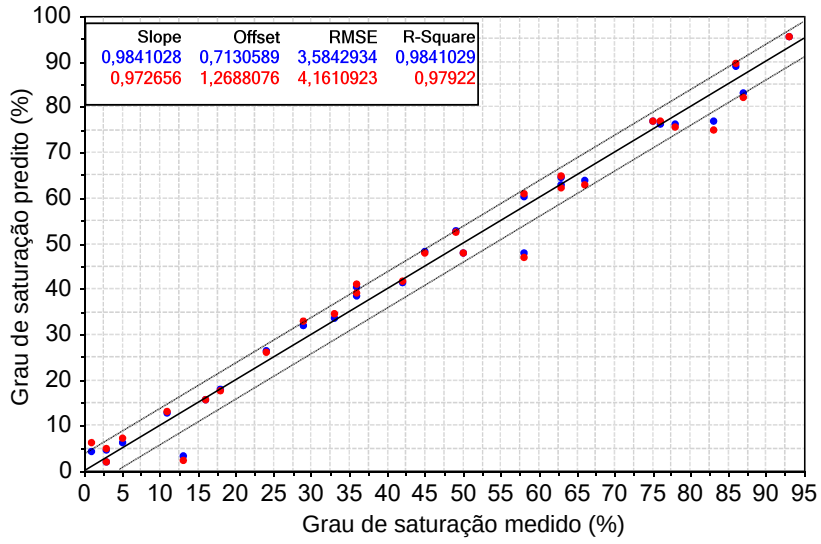


Figura 4.17: Grau de saturação do bloco de gesso 3 - Curva de resfriamento.



4.5 Aquisição de dados - Circuitos 2 e 3

Para comparar os três circuitos propostos, os quatro sensores do experimento anterior foram novamente avaliados quanto à predição do grau de saturação. Assim, a mesma metodologia foi empregada. Os blocos de gesso foram saturados e secos naturalmente ao ar livre. Ao longo dos processos de secagem, 40 medidas foram registradas para definição do modelo de predição do grau de saturação (S_r). Os sensores foram pesados com uma balança de precisão (0,01 g).

Foram utilizados 90 preditores ao longo das curvas de aquecimento e resfriamento da junção. Apenas as regressões de calibração (azul) e as respectivas validações cruzadas (vermelho) foram realizadas neste experimento. Não foi possível gerar modelos de calibração adequados com o circuito 3, as curvas de V_{BE} registradas por este condicionamento mostraram-se descorrelacionadas das informações de umidade das matrizes porosas. Com o circuito 2, foi possível desenvolver modelos de regressão com fator 4, como expostos nas Fig. 4.18 a 4.21. Entretanto, apesar dos coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,8977, os erros médios quadráticos para as quatro ponteiras foram superiores aos obtidos com o circuito 1. Os sinais registrados no circuito 1 exibiram menor ruído eletrônico, mesmo com o uso de um conversor CC-CC chaveado. Logo, para a configuração eletrônica utilizada, aplicações de pulsos de calor com tensões mais elevadas e menor corrente se mostraram mais adequadas para este tipo de sensor.

Figura 4.18: Grau de saturação do bloco de gesso 1 - Curva de calibração.

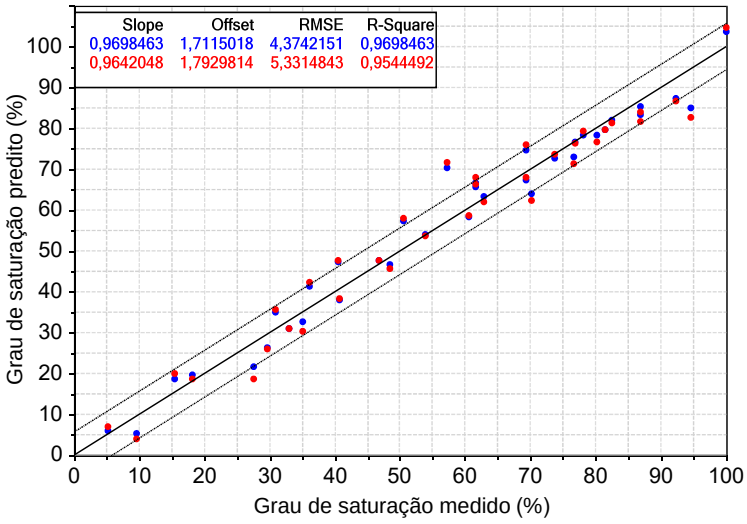


Figura 4.19: Grau de saturação do bloco de gesso 2 - Curva de calibração.

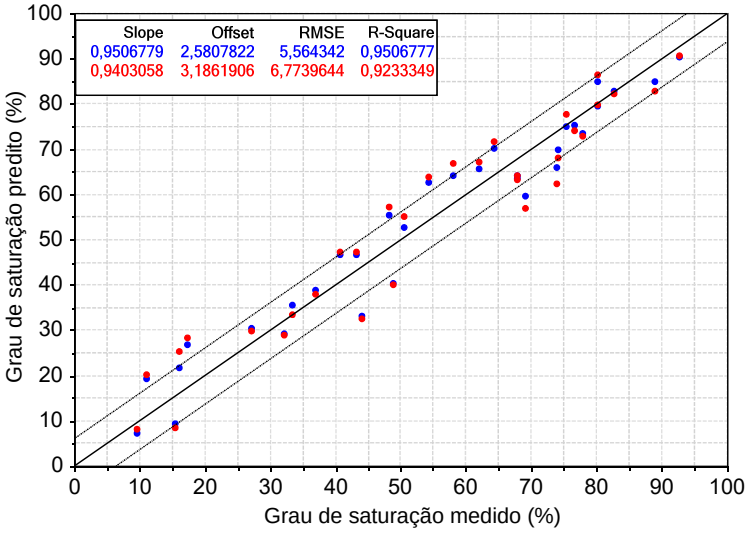


Figura 4.20: Grau de saturação do bloco de gesso 3 - Curva de calibração.

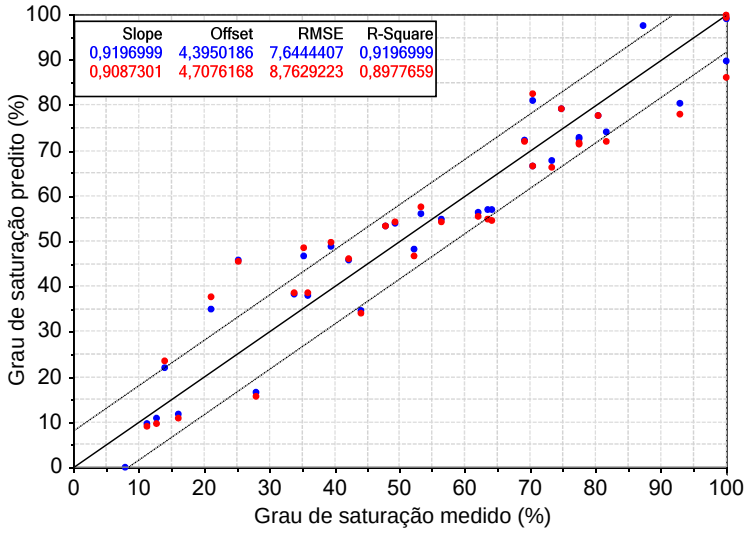
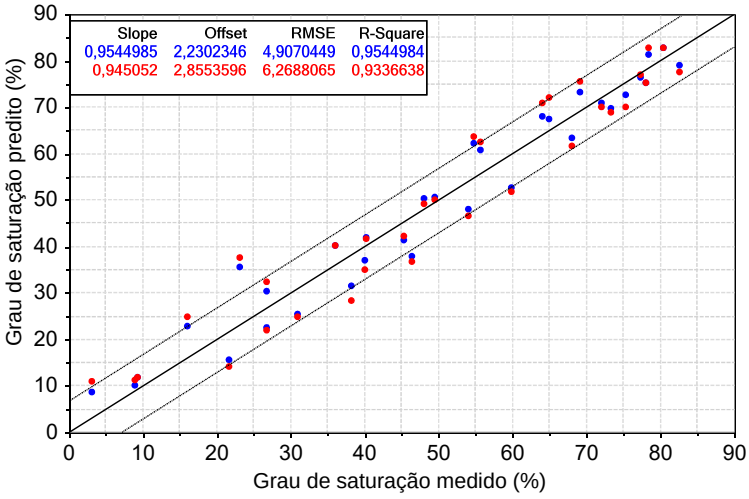


Figura 4.21: Grau de saturação do bloco de gesso 4 - Curva de calibração.



5 Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de sondas de calor em ponteira simples com transistores bipolares para predição do teor de umidade em matrizes porosas. São empregadas regressões por mínimos quadrados parciais com intuito de evitar o uso de modelos empíricos que correlacionem a resposta do sistema ao conteúdo de água. Tal metodologia permite definir um processo generalizado para recuperar a informação contida ao longo da resposta ao pulso de sensores de umidade por transferência de calor.

Três propostas de circuitos de condicionamento para os sensores desenvolvidos foram discutidas e avaliadas. A topologia que excita o transistor com um pulso de tensão elevada e baixa corrente exibiu os menores erros de predição em relação ao uso de uma tensão reduzida e maior corrente. O terceiro circuito, com transistores em base comum, não exibiu sensibilidade à umidade, impedindo o desenvolvimento de modelos de calibração.

O uso de encapsulamentos de cimento em dispositivos SPHP também não se mostrou oportuno. No entanto, os testes realizados em blocos de gesso com o circuito 1 permitiram, em média, o desenvolvimento de modelos de predição do grau de saturação com R^2 de 0,9722 e RMSE de 4,78 %. Em amostras de solo, em média, os modelos de predição do conteúdo de água atingiram R^2 de 0,9280 e RMSE de 2,37 % na validação cruzada. É notório que o sistema proposto exibe um erro relativo inferior aos dispositivos propostos por Sayde et al. (2010), Li et al. (2016), Sheng et al. (2016), mesmo quando comparado à técnicas MPHP, consideradas mais robustas.

As regressões PLS se apresentaram como modelos generalizados e robustos de predição. Foi possível verificar que tanto as curvas de aquecimento ou resfriamento da junção exibem elevada correlação com o teor de umidade. O uso de apenas uma das curvas ou de ambas como conjunto de preditores deve ser avaliado em função da aplicação. Sugere-se, em investigações futuras, que outros parâmetros físicos do material poroso em análise, como a granulometria e den-

sidade, também sirvam de parâmetros de entrada para a regressão. Tal estudo seria útil para elaboração de um modelo de predição mais robusto e generalista, o qual poderia facilitar aplicações em larga escala.

Para aplicações em campo, um estudo futuro se faz necessário para determinar se a abordagem mais apropriada para a técnica SPHP é a inserção direta das ponteiras em contato com o solo ou através de blocos porosos de referência. Como o gesso, ao longo do tempo, perde massa e deteriora em contato com água, é indicada a investigação de estruturas porosas alternativas de referência. Para campo, será necessário desenvolver uma rede de sensores sem fio de longo alcance e baixo consumo.

Referências

Agência Nacional de Águas. *Conjuntura dos recursos hidricos: Informe 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. 95 p.

BEJAN, A.; KRAUS, A. D. *Heat Transfer Handbook*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2003. ISBN 9780471390152,0471390151.

BENITEZ-BUELGA, J.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; CALVO, R. S.; GIL-RODRIGUEZ, M.; SAYDE, C.; SELKER, J. S. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 52, 04 2016.

BITTELLI, M. Measuring soil water potential for water management in agriculture: A review. *Sustainability*, v. 2, n. 5, p. 1226–1251, 2010. ISSN 2071-1050. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2071-1050/2/5/1226>.

BITTELLI, M. Measuring soil water content: A review. *HortTechnology*, v. 21, p. 293–300, 06 2011.

BRAAK, C. J. F. ter; JONG, S. de. The objective function of partial least squares regression. *Journal of Chemometrics*, John Wiley and Sons, v. 12, 1998.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORFF, K. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, The American Society of Agronomy, v. 57, 1993.

CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORFF, C.; WILLIAMS, J. H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal*, The American Society of Agronomy, v. 55, 1991.

CAMPBELL, G. S.; JUNGBAUER, J. D.; BIDLAKE W. R.AND HUNGERFORD, R. D. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Science*, Lippincott Williams and Wilkins, v. 158, 11 1994.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. *Conduction of Heat in Solids*. 2. ed. [S.l.]: Oxford University Press, USA, 1959. ISBN 9780198533689,0198533683.

CARVALHO, G. N.; BRANDAO, D.; HADDAD, D.; FORTE, V. do; CEDDIA, M. 2015 international joint conference on neural networks (ijcnn) - a rbf neural network applied to predict soil field capacity and permanent wilting point at brazilian coast. In: . [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 978-1-4799-1960-4.

Conselho Nacional de Recursos Hidricos (CNRH). ResoluÇÃo 181 - prioridades, ações e metas do plano nacional de recursos hidricos para 2016-2020. p. 15, 2016.

COOLONG, T.; SNYDER, J.; WARNER, R.; STRANG, J.; SURENDRAN, S. The relationship between soil water potential, environmental factors, and plant moisture status for poblano pepper grown using tensiometer-scheduled irrigation. *International Journal of Vegetable Science*, Haworth Press Inc, v. 18, 04 2012.

DEVRIES, D. A. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. *Soil Science*, Lippincott Williams and Wilkins, v. 73, 02 1952.

DIAS, P. C. *Um Novo Sensor de Umidade de Solo de Pulso de Calor de Alta Sensibilidade, Baseado em um Único Transistor Bipolar de Junção npn*. Dissertação (Mestrado), 2012.

DIAS, P. C.; ROQUE, W.; FERREIRA, E. C.; DIAS, J. A. S. *A high sensitivity single-probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor*. [S.l.]: Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier, 2013. 139-147 p.

DIMITRIJEV, S. *Principles of Semiconductor Devices (2nd Edition)*. [S.l.]: Oxford University Press, 2012. ISBN 978-0-19-538803-9,978-1-62870-172-2.

FRANCA, M. B. de M.; MORAIS, F. J. O.; CARVALHAES-DIAS, P.; DUARTE, L. C.; DIAS, J. A. S. A multiprobe heat pulse sensor for soil moisture measurement based on pcb technology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, 2018.

HILLEL, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. 1. ed. [S.l.]: Academic Press, 2003. ISBN 0123486556.

HOPMANS J. W.; DANE, J. H. Thermal conductivity of two porous media as a function of water content, temperature, and density. *Soil Science*, Lippincott Williams and Wilkins, v. 142, 10 1986.

ISO 17892-1:2014. *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content*. [S.l.], 2014.

JIN, H.; WANG, Y.; ZHENG, Q.; LIU, H.; CHADWICK, E. Experimental study and modelling of the thermal conductivity of sandy soils of different porosities and water contents. *Applied Sciences*, v. 7, n. 2, 2017. ISSN 2076-3417. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/2/119>.

JOHANSEN, O. *Thermal conductivity of soils*. 231 p. Dissertação (Mestrado), 1975.

KAMAI, T.; KLUITENBERG, G. J.; HOPMANS, J. W. Design and numerical analysis of a button heat pulse probe for soil water content measurement. *Vadose Zone Journal*, GeoScienceWorld, v. 8, n. 1, p. 167–173, 2009. Disponível em: <http://vzj.geoscienceworld.org/content/8/1/167>.

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

KASUBUCHI, Y. H. T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°c). *European Journal of Soil Science*, John Wiley and Sons, v. 51, 2000.

KLUITENBERG, G. J.; HEITMAN, J. Effect of forced convection on soil water content measurement with the dual-probe heat-pulse method. p. 275–283, 01 2002.

KRUGER, U.; ZHOU, Y.; WANG, X.; ROONEY, D.; THOMPSON, J. Robust partial least squares regression: Part i, algorithmic developments. *Journal of Chemometrics*, John Wiley and Sons, v. 22, 2008.

LEKSHMI, S.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, Elsevier Science, v. 54, p. 92–105, 08 2014.

LI, M.; SI, B.; HU, W.; DYCK, M. Single-probe heat pulse method for soil water content determination: Comparison of methods. v. 15, 07 2016.

LOW, J.; LOVERIDGE, F.; POWRIE, W. Thermal conductivity of soils by the needle probe method, for energy foundation applications. *32nd International Thermal Conductivity Conference*, p. 14, 01 2014.

LU, S.; REN, T.; GONG, Y.; HORTON, R. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, The American Society of Agronomy, v. 71, 2007.

MARTI, P.; GASQUE, M.; GONZALEZ, P. An artificial neural network approach to the estimation of stem water potential from frequency domain reflectometry soil moisture measurements and meteorological data. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier Science, v. 91, 2 2013.

MEIJER, G. C. Thermal sensors based on transistors. *Sensors and Actuators*, Elsevier Science, v. 10, 1986.

MIZUGUCHI, J.; PIAI, J. C.; FRANCA, J. A. de; FRANCA, M. B. de M.; YAMASHITA, K.; MATHIAS, L. C. Fringing field capacitive sensor for measuring soil water content: Design, manufacture, and testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 64, 1 2015.

SALEH, M.; ELHAJJ, I. H.; ASMAR, D.; BASHOUR, I.; KIDESS, S. [ieee 2016 ieee international multidisciplinary conference on engineering technology (imcet) - beirut, lebanon (2016.11.2-2016.11.4)] 2016 ieee international multidisciplinary conference on engineering technology (imcet) - experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors. In: . [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 978-1-5090-5281-3.

SAYDE, C.; GREGORY, C.; GIL-RODRIGUEZ, M.; TUFILLARO, N.; TYLER, S.; GIESEN, N. van de; ENGLISH MARSHALLAND CUENCA, R.; SELKER, J. S. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 46, 06 2010.

SHENG, W.; RUMANA, K.; SAKAI, M.; SILFA, F.; JONES, S. A multi-functional penta-needle thermo-dielectric sensor for porous media sensing. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 2016.

SHIOZAWA, S.; S.CAMPBELL, G. Soil thermal conductivity. *Remote Sensing Reviews*, Taylor & Francis, v. 5, n. 1, p. 301–310, 1990.

TARANTINO, A.; ROMERO, E.; CUI, Y.-J. *Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils*. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-8818-6.

TOMINAGA, T.; CASSARO, F.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.; OLIVEIRA, J.; TIMM, L. On the use of surface neutron-gamma gauges to estimate soil water content. *Applied Radiation and Isotopes*, Elsevier Science, v. 57, 2002.

TRAUTZ, A. C.; SMITS, K. M.; SCHULTE, P.; ILLANGASEKARE, T. H. Sensible heat balance and heat-pulse method applicability to in situ soil-water evaporation. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society of America, v. 13, 2014.

VALENTE, A.; MORAIS, R.; TULI, A.; HOPMANS, J.; KLUITENBERG, G. Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties, water content, and electrical conductivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier Science, v. 132, 2006.

VALENTE, A.; SOARES, S.; MORAIS, R.; BAPTISTA, J. M.; CABRAL, M. First international conference on sensor device technologies and applications - button heat-pulse sensor for soil water content measurements. In: . [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 978-1-4244-7474-5.

WEN, M.; LIU, G.; LI, B.; SI, B. C.; HORTON, R. Evaluation of a self-correcting dual probe heat pulse sensor. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier Science, v. 200, 01 2015.

WILAMOWSKI, J. D. I. B. M. *Fundamentals of Industrial Electronics (The Industrial Electronics Handbook)*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2011. ISBN 1439802793,9781439802793.