



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA**

Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

**Jaime Mizuguchi**

**Sensores Capacitivos por Efeito  
do Campo de Borda Aplicados à  
Quantificação do Molhamento Foliar e  
da Água Presente no Solo**

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

Londrina, PR  
2014



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

Jaime Mizuguchi

**Sensores Capacitivos por Efeito  
do Campo de Borda Aplicados à  
Quantificação do Molhamento Foliar e  
da Água Presente no Solo**

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

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos de Medida e Controle

Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientador:

Prof. Dr. José Alexandre de França

Londrina, PR  
2014

## Ficha Catalográfica

Mizuguchi, Jaime

Sensores Capacitivos por Efeito do Campo de Borda Aplicados à Quantificação do Molhamento Foliar e da Água Presente no Solo. Londrina, PR, 2014. 119 p.

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

1. Eletrodos Interdigitados. 2. Medição de Capacitância. 3. Medição Não-Destrutiva. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. II. Título

**Jaime Mizuguchi**

**Sensores Capacitivos por Efeito do Campo  
de Borda Aplicados à Quantificação  
do Molhamento Foliar e da Água Presente no Solo**

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

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos de Medida e Controle

Especialidade: Instrumentação Eletrônica

**Comissão Examinadora**

---

Prof. Dr. José Alexandre de França  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina  
Orientador

---

Prof. Dr. Newton da Silva  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Willingthon Pavan  
Instituto de Ciências Exatas e Geociências  
Universidade de Passo Fundo

19 de Agosto de 2014

Este trabalho é dedicado a todos aqueles  
que acreditam numa Nação alicerçada  
no saber e no temor à Deus.

# Agradecimentos

Agradeço...

A Deus, por me conceder inteligência para realizar este trabalho;

À minha esposa Carolina e meu filho Samuel, pelo amor e compreensão;

Aos meus familiares, pelo apoio, incentivo e orações;

Ao professor Dr. José Alexandre de França, pela oportunidade concedida e pela orientação, à professora Ma. Juliani Chico Piai, pelo apoio e amizade, e ao Dr. Joelmir José Lopes, pelas críticas construtivas;

Aos demais estudantes do LA2I, em particular aos mestres Maurício Moreira e Alex Lemes Guedes e ao mestrando Lucas Ribeiro, pela amizade e disposição para ajudar;

À CAPES e à PROPPG-UEL pelo financiamento das pesquisas;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram neste trabalho.

*“Porque o Senhor dá a sabedoria,  
e da sua boca vem a inteligência e o entendimento.”*

Provérbios 2.6 (ARA)

# Resumo

Capacitores são utilizados como sensores nas mais diversas aplicações. Normalmente, a grandeza a ser medida altera as propriedades geométricas de uma estrutura capacitiva utilizada como sensor ou as propriedades físicas do dielétrico entre os eletrodos desta mesma estrutura. Por outro lado, caso a geometria do sensor maximize a capacitância devido ao efeito de campo de borda, as possibilidades são totalmente diferentes. Neste caso, o campo elétrico pode ser projetado para dentro da amostra em análise. O presente trabalho trata do uso de sensores capacitivos de campo de borda para quantificar a água presente no solo e sobre uma folha vegetal durante o período de molhamento. Examina-se como a geometria de uma estrutura de eletrodos interdigitados, feita em PCI, influencia as características deste tipo de sensor, levando em consideração que sensores de campo de borda são difíceis de serem modelados analiticamente devido a sua característica não-linear intrínseca. Por isso, as conclusões foram baseadas, principalmente, em resultados de simulações, mas também tentou-se reproduzir alguns destes resultados experimentalmente. Também, discute-se circuitos que transformam a variação na capacitância do sensor em variação na largura de um sinal pulsado. Por fim, um sistema de aquisição de dados baseado em uma rede de sensores com fio, mas com transmissão de dados via Internet foi proposto para fornecer uma alternativa para uso dos sensores em campo. Os resultados foram animadores, pois as medições dos sensores propostos ajustou-se aos dados experimentais com coeficiente de determinação bem próximo da unidade.

# Abstract

Capacitors are used as sensors in various applications. Typically, the quantity to be measured alters the geometric properties of the structure used as a capacitive sensor or the physical properties of the dielectric between the electrodes of the same structure. On the other hand, if the sensor geometry maximizes the capacitance due to the fringing field effect, the possibilities are totally different. In this case, the electric field can be projected onto the material sample. The present work deals with the use of capacitive fringing field sensors to quantify the water present in the soil and leaf wetness period. It is examined how the geometry of a structure of interdigital electrodes, made in PCB, influences the characteristics of this type of sensor, assuming that fringing field sensors are difficult to model analytically due to its intrinsic nonlinear characteristic. Therefore, the findings were mainly based on results of simulations, but we tried to play some of these results experimentally. Also, we discuss circuits that transform the variation in the sensor capacitance to pulse-width signal variation. Finally, an data acquisition system based on a wired network of sensors, but data transmission via Internet was proposed to provide an alternative to the outdoor use of sensors. The results were encouraging because the measurements of the proposed sensors, adjusted to the experimental data with a determination coefficient, is very close to unity.

# Lista de Figuras

1.1	Ciclo de infecção. . . . .	19
2.1	Ciclo da Agricultura de Precisão. . . . .	23
2.2	Exemplo de uma EMA. . . . .	24
2.3	Parâmetros para a DMF. . . . .	27
2.4	Modelo de placa resistiva. . . . .	28
2.5	Esquema de placa resistiva. . . . .	29
2.6	Sensores capacitivos comerciais. . . . .	29
2.7	Transição de um capacitor de placas paralelas para coplanares. . . . .	30
2.8	Exemplo do efeito das linhas de campo elétrico, através de uma visão seccional do sensor interdigitado. . . . .	31
3.1	Desenho do sensor simulado. . . . .	36
3.2	Posicionamento da água na superfície do sensor. . . . .	37
3.3	Variação da capacitância do sensor em função do posicionamento das faixas de água. . . . .	38
3.4	Variação da capacitância do sensor em função da temperatura. . . . .	39
3.5	Erro obtido quando se calibra o sensor a 20°C. . . . .	40
3.6	Capacitância do sensor em função do espaço entre as trilhas condutoras. . . . .	41
3.7	Capacitância do sensor em função da largura das trilhas condutoras. . . . .	42
3.8	Simulação da intensidade do campo elétrico na superfície do sensor. . . . .	43
3.9	Circuito condicionador de sinal. . . . .	45
3.10	Formas de onda do circuito condicionador de sinal. . . . .	46
3.11	Esboço da placa fabricada para validação das simulações. . . . .	47

3.12	Esboço da placa projetada para testes no solo. . . . .	48
3.13	Representação de uma rede de sensores aplicada à AP. . . . .	49
3.14	Esquema da rede de sensores proposta. . . . .	50
3.15	Arquitetura geral de um módulo de aquisição. . . . .	50
3.16	Diagrama de blocos do módulo mestre. . . . .	51
3.17	Diagrama de blocos do módulo escravo. . . . .	52
3.18	Diagrama de blocos do módulo escravo. . . . .	53
3.19	Exemplo de suporte e abrigo para o sistema. . . . .	54
3.20	Diagrama de sequência do sistema de coleta de dados. . . . .	57
3.21	Sensor de umidade e temperatura da Silicon Labs <sup>®</sup> . . . . .	59
3.22	Abrigo para o sensor de umidade. . . . .	60
4.1	Sensor capacitivo fabricado para testes de validação. . . . .	62
4.2	Variação da capacitância em função da posição de uma única gota de água sobre o sensor. . . . .	63
4.3	Variação da capacitância do sensor em função da quantidade de água em sua superfície. . . . .	63
4.4	Variação da capacitância em função da temperatura do sensor. . . . .	64
4.5	Gráfico da temperatura <i>versus</i> tempo nos testes em campo. . . . .	65
4.6	Gráfico da umidade <i>versus</i> tempo nos testes em campo. . . . .	66
4.7	Gráfico do molhamento foliar <i>versus</i> tempo nos testes em campo. . . . .	66
4.8	Solo e sensor posicionados no porta amostras para realização dos testes. . .	68
4.9	Concentração de água no solo <i>versus</i> $T_{th}$ . . . . .	69
4.10	Concentração de água no solo obtida pelo método gravimétrico <i>versus</i> a obtida pelo sensor proposto já calibrado. . . . .	70
4.11	Visualização parcial dos dados transmitidos para o servidor. . . . .	71
4.12	SMFc construído. . . . .	71
4.13	Módulos Mestre e GPRS construídos. . . . .	72

4.14	Módulos fixados no suporte e o abrigo montado. . . . .	73
4.15	Módulo Escravo construído e seu abrigo. . . . .	74
4.16	Controle de alimentação implementado. . . . .	74
4.17	Estruturas para os Módulos Escravos construídas. . . . .	75
4.18	Sensor de umidade integrado a uma PCI. . . . .	76
4.19	Sensor de temperatura e umidade relativa implementado. . . . .	76
B.1	Esquema elétrico do módulo Mestre, parte A. . . . .	109
B.2	Esquema elétrico do módulo Mestre, parte B. . . . .	110
B.3	Esquema elétrico do módulo Modem, parte A. . . . .	111
B.4	Esquema elétrico do módulo Modem, parte B. . . . .	112
B.5	Esquema elétrico do módulo Escravo. . . . .	113
C.1	Quadro Modbus em linha serial. . . . .	115
C.2	Exemplo de transmissão de um byte no modo RTU. . . . .	116
C.3	Fluxograma de cálculo do CRC. . . . .	118
C.4	Exemplos de topologias de redes. . . . .	119

# Lista de Tabelas

3.1	Propriedades do sensor usado na simulação. . . . .	37
3.2	Dimensões do sensor construído para medição da concentração de água no solo. . . . .	47
3.3	Códigos de funções implementados no sistema . . . . .	55
3.4	Tabela comparativa de sensores de temperatura e umidade . . . . .	58
4.1	Concentração de água no solo desejada ( $C_t$ ) e real ( $C_p$ ), medida pelo método gravimétrico. . . . .	67
C.1	Camadas no modelo OSI utilizadas pelo Modbus . . . . .	114
C.2	Quadro de comunicação Modbus em modo RTU . . . . .	115
C.3	Tipos de códigos de funções definidos pelo Modbus . . . . .	117

# Lista de Abreviaturas

- AP** Agricultura de Precisão
- ASCII** American Standard Code for Information Interchange
- CI** Circuito Integrado
- CRC** Cyclic Redundancy Checking
- DMF** Duração do Molhamento Foliar
- DQMF** Determinação da Quantidade de Molhamento Foliar
- EMA** Estação Meteorológica Automática
- FEM** Finite Element Method
- FFDC** Fringing Field Dielectric Capacitance
- FFDS** Fringing Field Dielectric Sensor
- FR-4** Flame Retardant 4
- GPRS** General Packet Radio Service
- I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit
- ISO** International Organization for Standardization
- LWD** Leaf Wetness Duration
- OSI** Open Systems Interconnection
- PCB** Printed Circuit Board
- PCI** Placa de Circuito Impresso
- PDU** Protocol Data Unit
- QMF** Quantidade de Molhamento Foliar

**SIMEPAR** Sistema Meteorológico do Paraná

**SoC** System-on-a-Chip

**SMFc** Sensor de Molhamento Foliar Capacitivo

**SQMFc** Sensor de Quantidade de Molhamento Foliar Capacitivo

**SMFr** Sensor de Molhamento Foliar Resistivo

**R<sup>2</sup>** Coeficiente de Determinação

**RAM** Random Access Memory

**ROM** Read-Only Memory

**RTC** Real-Time Clock

**RTU** Remote Terminal Unit

**SPI** Serial Peripheral Interface

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>22</b>
2.1	Agricultura de Precisão aplicada na previsão de doenças nas plantas . . . .	22
2.2	Sensores de Molhamento Foliar . . . . .	25
2.2.1	Determinação da DMF . . . . .	25
2.2.2	Sensor Resistivo . . . . .	27
2.2.3	Sensor Capacitivo . . . . .	28
2.2.3.1	Capacitância por Efeito do Campo de Borda . . . . .	30
2.3	Concentração de água no solo . . . . .	31
2.4	Redes de sensores . . . . .	32
2.5	Conclusão do capítulo . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>35</b>
3.1	Estudo construtivo do sensor capacitivo . . . . .	35
3.1.1	Simulações do sensor capacitivo . . . . .	36
3.1.2	Influência da área molhada no sensor . . . . .	37
3.1.3	Influência da temperatura no sensor . . . . .	39
3.1.4	Influência da geometria do sensor . . . . .	40
3.1.5	Condicionador de sinal para o sensor . . . . .	42
3.1.5.1	Circuito de condicionamento adotado . . . . .	44
3.2	Construção do sensor para testes . . . . .	46
3.3	Detecção do teor de água no solo . . . . .	46

3.4	Sistema de aquisição proposto . . . . .	48
3.4.1	Construção da rede e módulos de aquisição . . . . .	48
3.4.2	Módulos da rede . . . . .	49
3.4.2.1	Módulo mestre . . . . .	50
3.4.2.2	Módulo escravo . . . . .	51
3.4.2.3	Módulo de transmissão GPRS . . . . .	52
3.4.2.4	Suporte e abrigo para a circuitaria . . . . .	53
3.4.3	Desenvolvimento do <i>software</i> do sistema . . . . .	53
3.4.4	Sensor de umidade e temperatura . . . . .	57
3.5	Conclusão do Capítulo . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>61</b>
4.1	Validação das Simulações . . . . .	61
4.2	Testes em campo . . . . .	64
4.3	Medição da água no solo . . . . .	67
4.4	Implementação da Rede . . . . .	70
4.5	Dispositivos construídos . . . . .	71
4.5.1	Sensor de Molhamento Foliar Capacitivo . . . . .	71
4.5.2	Módulo Mestre e Módulo GPRS . . . . .	72
4.5.3	Módulo Escravo . . . . .	73
4.5.4	Estrutura de fixação do Módulo Escravo . . . . .	73
4.5.5	Controle de alimentação dos Módulos Escravos . . . . .	74
4.5.6	Sensor de umidade e temperatura . . . . .	75
4.6	Conclusão do Capítulo . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>78</b>
5.1	Perspectivas para continuidade do trabalho . . . . .	79

<b>Referências</b>	<b>81</b>
<b>Apêndice A – Artigos Aceitos para Publicação</b>	<b>87</b>
<b>Apêndice B – Esquemas Elétricos dos Circuitos Eletrônicos</b>	<b>108</b>
<b>Apêndice C – Protocolo Modbus</b>	<b>114</b>
C.1 Quadros de Comunicação . . . . .	115
C.2 Modos de transmissão . . . . .	115
C.3 Códigos de funções . . . . .	116
C.4 Código de verificação . . . . .	117
C.5 Topologia de Rede . . . . .	117

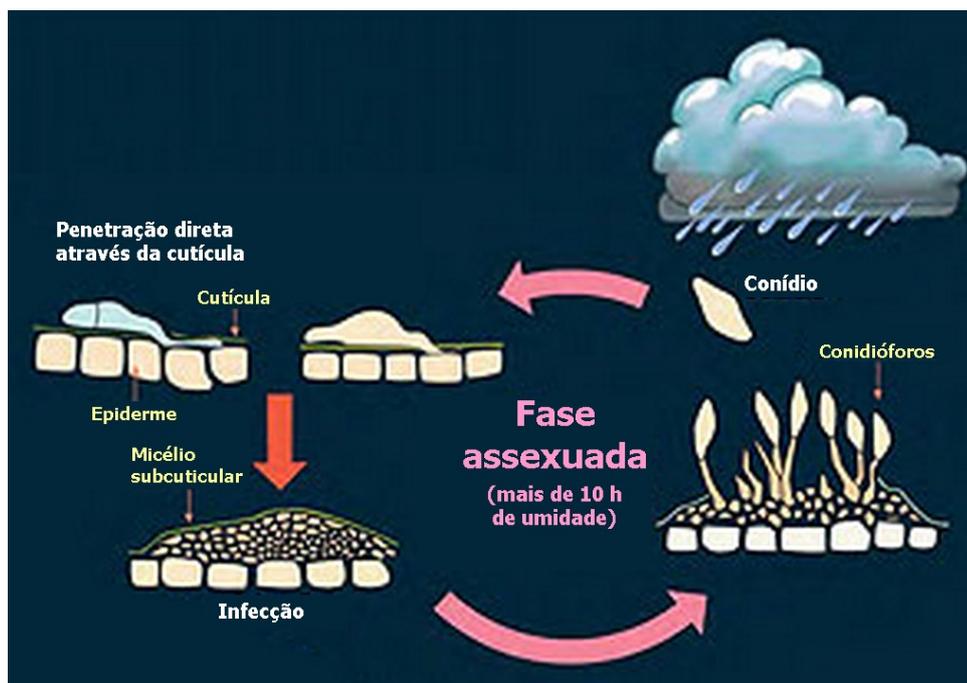
# 1 Introdução

Para que uma área de cultivo esteja susceptível a doenças e uma patologia vegetal se instale, é necessária a existência de fitopatógenos e de condições climáticas favoráveis. Portanto, sem uma destas variáveis, o uso de agrotóxicos pode ser minimizado (GUYOT; OMANDA; PINARD, 2005; GIESLER; HORST; YUEN, 1996), sendo que qualquer aplicação de defensivos agrícolas realizada na ausência de um desses dois fatores contribui apenas para o aumento dos custos e para a produção de alimentos menos saudáveis. Ainda que haja a presença de fitopatógenos de alta severidade, o agricultor deve observar as condições agrometeorológicas antes de optar pelo controle químico. Isto porque estes micro-organismos são pouco resistentes e são eliminados naturalmente em condições agrometeorológicas desfavoráveis ao seu desenvolvimento. Assim, em alguns casos, o monitoramento de fitopatógenos e das condições agrometeorológicas favoráveis ao surgimento de doenças, pode, com segurança, reduzir significativamente a necessidade de aplicações de fungicidas para controle, por exemplo, do *phakopsora pachyrhizi* (SCHMITZ; GRANT, 2009), causador da ferrugem asiática da soja, e do *puccinia kuehni* (BRAITHWAITE et al., 2009), causador da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.

Dentre os fatores agrometeorológicos que influenciam no aparecimento e na severidade de diversas doenças fúngicas, um dos mais importantes é o período de permanência da água sobre as folhas das plantas, que é medido pela Duração do Molhamento Foliar (DMF) (BREGAGLIO et al., 2011; LECA et al., 2011). A presença de condensação na superfície das folhas, promovida pelo orvalho, chuva, irrigação ou neblina, oferece condições favoráveis para a germinação e infecção do tecido foliar pelo patógeno (GUYOT; OMANDA; PINARD, 2005).

Na Figura 1.1 é mostrado o ciclo de infecção do pedrado (*venturia sp.*) em pomóideas. Nesta ilustração verifica-se que com a incidência das chuvas, os fungos presentes em folhas mortas germinam e são levados pela precipitação da água e vento para a superfície de uma folha sadia. Ali, havendo um período de molhamento foliar favorável, este fungo penetra sob a cutícula da planta e atinge sua epiderme, estabelecendo a infecção.

Figura 1.1: Ciclo de infecção.



Fonte: Adaptado de Syngenta (2014).

Desta maneira, a DMF é o parâmetro mais utilizado em modelos de simulação e sistemas de alerta para muitas doenças (HUBER; GILLESPIE, 1992; KIM et al., 2002; MARTA et al., 2004; PAPASTAMATI; MCCARTNEY; BOSCH, 2004), que auxiliam os produtores na utilização de fungicidas de maneira racional (GILLESPIE; SRIVASTAVA; PITBLADO, 1993). No entanto, apesar da sua importância, a DMF é uma variável difícil de ser medida, pois não depende exclusivamente das condições atmosféricas, mas também da sua interação com a estrutura, composição e fisiologia do dossel da cultura (MAGAREY, 1999; MADEIRA et al., 2002; SENTELHAS et al., 2005; MARTA et al., 2007).

Na busca de um dispositivo que traduza este fenômeno o mais próximo possível da situação real de uma folha do vegetal, foram desenvolvidos sensores eletrônicos para quantificá-lo, ainda que a estimativa por modelos empíricos ou físicos seja extremamente complexa, de difícil aplicação e validação nas condições de campo, devido às complexas interações da atmosfera com a cultura e por exigirem muitas variáveis meteorológicas (SENTELHAS et al., 2005; MARTA et al., 2007). A redução do custo de sistemas eletrônicos de aquisição de dados, a precisão e a facilidade de obtenção de dados contínuos e, conseqüentemente, o aumento do uso de estações meteorológicas automáticas em todo o mundo, têm contribuído para o aumento do uso de sensores eletrônicos para estimativa da DMF (KIM et al., 2010). Tais sensores podem simular uma folha ou serem instalados diretamente no tecido vegetal.

Trabalhos anteriores já demonstraram a importância e necessidade de soluções para este tema (PEREIRA, 2008; FRANÇA et al., 2009; SILVA et al., 2013; GUEDES, 2014). Assim, este trabalho apresenta um sensor eletrônico que quantifica o molhamento sobre a superfície das folhas. Suas principais características são: baixo custo, facilidade de confecção e de instrumentação. Tais características foram alcançadas graças ao princípio físico deste sensor que, basicamente, é um capacitor, onde o contato com a água interage com o campo elétrico, de tal maneira que a interação com o campo elétrico e o meio líquido altera a capacitância medida. Estas características são de extrema importância, pois, na prática, estima-se que é preciso usar um grande número de sensores de molhamento para obter-se uma caracterização confiável do molhamento foliar em uma região de cultivo. Desta forma, estudos com esse sensor indicarão com maior exatidão as condições favoráveis para o desenvolvimento epidemiológico de doenças fúngicas. Com a realização de experimentos em campo, almeja-se que os fitopatologistas sejam capazes de determinar com maior exatidão o momento da primeira aplicação de fungicida, melhorando ainda mais a eficiência e racionalização do controle químico, reduzindo custos ao produtor, danos ao meio ambiente e melhorando a qualidade do que é produzido.

Tendo em vista que o sensor proposto aplica-se como quantificador de água, avaliou-se, também, se o mesmo pode ser utilizado para quantificar a água presente no solo. A presença de água no solo, e sua quantificação, é um fator importante para a análise do ciclo solo-planta-atmosfera (SOYLU; KUCHARIK; LOHEIDE, 2014), de forma a racionalizar o uso da irrigação. O mau uso da água, por falta ou excesso, traz impactos negativos para a produção agrícola, sendo que a determinação do volume de água disponível às plantas é fundamental para o correto manejo da irrigação (KLEIN et al., 2010). Também reforça o fato que, de um total de recursos hídricos consumidos no Brasil, 69% desta demanda de consumo é destinada à irrigação (ANA, 2011), motivando a busca de melhores gestões para uso deste recurso natural, que é limitado.

Para realizar o monitoramento do teor de água no solo, comumente é empregado o uso de tensiômetro ou reflectometria. Porém, estes equipamentos são de difícil utilização para o agricultor (PACHECO et al., 2012), o que estimula a pesquisa por novas soluções, como verificado em Dean et al. (2012). Entretanto, o teor de água no solo é uma grandeza de difícil caracterização, seja pela complexidade do solo, seja pelo seu custo, em vista da necessidade de se utilizar muitos sensores para se analisar uma região de cultivo (MAJONE et al., 2013). Contudo, os testes realizados em laboratório com o sensor em amostras de solo padronizadas apresentaram resultados animadores.

Como o molhamento foliar e a quantidade de água no solo devem ser medidas em mais

de um ponto, foi desenvolvida uma rede de sensores com fio para a aquisição de dados. Este sistema proposto gerencia a coleta de dados em diversos pontos, concentrando os dados apenas em um único local e, em períodos predefinidos de horas ou dias, um módulo dedicado transmite todos os dados coletados para um servidor central através da Internet.

Estudos recentes em agrometeorologia empregam soluções com redes de comunicação sem fio para integrar sensores (SOBRINHO et al., 2011; CHASE et al., 2012). Contudo, na rede proposta neste trabalho, buscou-se simplificação na implementação e circuitaria, de tal forma que apenas o concentrador de dados, que também gerencia as aquisições, permanece continuamente ligado e os demais pontos de coleta permanecem totalmente desligados nos períodos em que não fazem aquisições de dados, inclusive o transmissor de dados para o servidor. Entretanto, avalia-se que esta rede mostra-se útil para aplicação em pequenas áreas, tais como casas de vegetação.

Este trabalho será apresentado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentados e discutidos os tipos de sensores para Determinação do Molhamento Foliar, para medição do teor de água no solo e uma proposta de rede de sensores, além de alguns outros conceitos que convergem para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 3 apresenta o sensor proposto em detalhes, suas características e funcionamento desejado, bem como discute-se a construção da rede proposta.

Os testes em campo são apresentados no Capítulo 4, onde também é feita uma análise destes resultados. Também, um protótipo da rede de sensores é apresentado.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e prospectos de desenvolvimento.

## 2 Fundamentação Teórica

Como forma de embasar teoricamente o sensor proposto neste trabalho, este capítulo discute assuntos pertinentes ao tema. Inicia-se com a discussão dos parâmetros meteorológicos que influenciam na permanência de água na folha do vegetal e seu favorecimento no desenvolvimento de fitopatógenos, contextualizado com o uso da Agricultura de Precisão na previsão de doenças. Como estes parâmetros meteorológicos indicam de forma indireta o favorecimento ou não da doença, também são apresentados e discutidos os tipos de sensores comerciais para Determinação do Molhamento Foliar, parâmetro que indica de forma direta a presença de água na folha sem, contudo, quantificá-la. Assim, o assunto serve de pretexto para o sensor proposto, que também quantifica este molhamento. Por fim, discute-se o uso deste sensor para medição do teor de água no solo e encerra tratando do surgimento e aplicações das redes de sensores e sua utilidade para este trabalho.

### 2.1 Agricultura de Precisão aplicada na previsão de doenças nas plantas

De acordo com um trabalho realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (INAMASU et al., 2011), a definição de Agricultura de Precisão (AP) abrange tecnologias destinadas ao manejo de solos, culturas e insumos, e está focada na gestão do sistema produtivo agrícola. Assim, empregar AP não significa estritamente a utilização de instrumentos e equipamentos sofisticados, mas também de técnicas e procedimentos que aumentam a produtividade (retorno econômico) e minimizam impactos ambientais.

O emprego da AP envolve um ciclo de atividades para que um bom resultado produtivo seja alcançado. A Figura 2.1 ilustra este ciclo em três etapas: inicialmente, a etapa de mapeamento da variabilidade espacial dos parâmetros da cultura implica na coleta de dados relacionados ao aspecto produtivo a ser tratado. Do processamento destes dados segue para a etapa de análise, onde são realizadas análises por profissionais especialistas

(fitopatologistas, agrônomos, entre outros) que determinam ações a serem tomadas, corretivas ou não. Assim, a etapa de trato cultural e aplicação de insumos resultará num novo mapeamento da variabilidade espacial, que apresentará o resultado da ação tomada, reiniciando o ciclo.

**Figura 2.1:** Ciclo da Agricultura de Precisão.



Fonte: Adaptado de Inamasu et al. (2011).

No Brasil, a utilização da AP pelos produtores ainda é pouca. Inamasu et al. (2011) verificam que existe um número grande de equipamentos, sensores e sistemas para uso na agricultura de precisão, mas muitos deles são importados e muitas vezes inadequados para algumas condições específicas das lavouras, solos e climas brasileiros. Silva, Moraes e Molin (2010) identificaram que o custo elevado para a adoção de AP é um obstáculo para sua implementação por produtores de cana-de-açúcar, sendo que, mesmo entre as empresas que adotam AP, verificou-se que nenhuma empregava sensores. Portanto, a redução de custos e adequação dos equipamentos são alvos a serem alcançados. Concernente a isto, observa-se que o avanço mais significativo para a prática de AP, no Brasil, é o seu uso para identificação da variabilidade do solo, servindo de apoio na formulação de zonas de manejo.

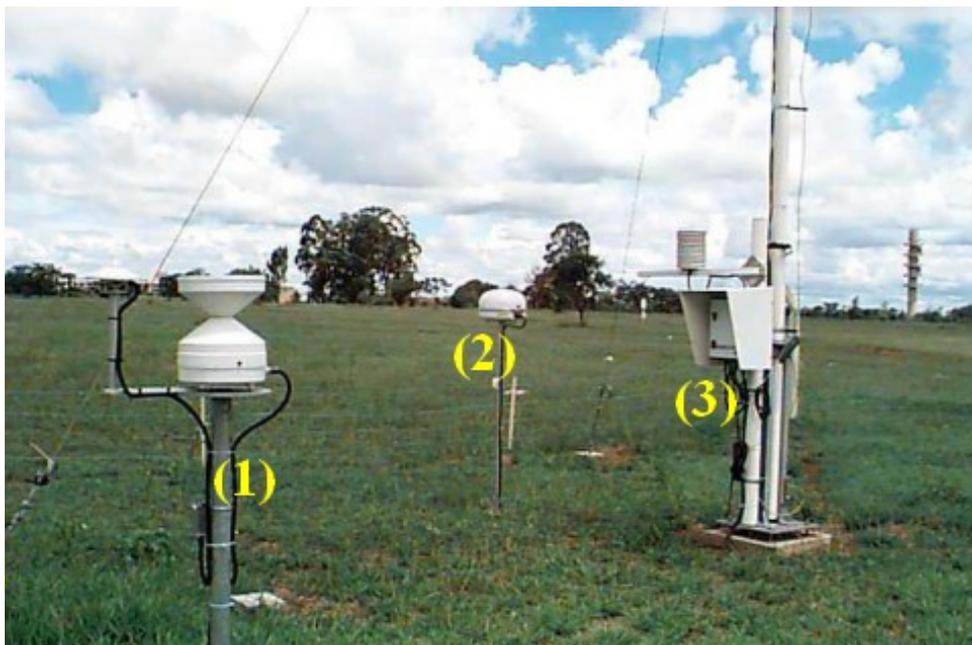
No controle de doenças, um subgrupo da AP, a aquisição de dados de grandezas agrometeorológicas como temperatura e umidade relativa do ar, índice pluviométrico, velocidade do vento e DMF geram informações empregadas em estudos fitopatológicos para predição de infestações de doenças na lavoura, visto que a presença de água sobre a folha do vegetal, sob certas condições meteorológicas, favorece o desenvolvimento de doenças (SENTELHAS et al., 2004; BREGAGLIO et al., 2011). Desta forma, o monitoramento

destas condições meteorológicas auxilia em tomadas de ações preventivas contra doenças (MAGAREY et al., 2001).

Dentre os fatores agrometeorológicos que influenciam no aparecimento e na severidade de diversas doenças fúngicas, tais como umidade relativa do ar, vento e índice pluviométrico, um dos mais importantes para a fitopatologia é o período de permanência de água sobre as folhas das plantas, que é quantificado através de sensores de DMF.

Ainda hoje, grande parte dos dados agrometeorológicos advém de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA), que disponibilizam estes dados através de institutos de monitoramento climáticos, como o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A Figura 2.2 ilustra um exemplo deste tipo de equipamento, sendo este composto de três peças separadas, porém, interligadas: pluviômetro, antena de comunicação e coletor de dados. Contudo, em vista do custo destas estações, cada equipamento é responsável por representar uma grande área, diminuindo sua confiabilidade em áreas mais distantes do ponto de coleta. Assim, para se obter informações meteorológicas de uma região específica, é necessária a interpolação dos dados destas estações (MAGAREY et al., 2001; HIJMANS et al., 2005). Por meio destes dados, somados aos fatores de favorecimento de doenças, são desenvolvidos modelos matemáticos de previsão de epidemias na plantação (PONTE; FERNANDES; PAVAN, 2005).

**Figura 2.2:** Exemplo de uma EMA.



(1) pluviômetro, (2) antena de comunicação via satélite e (3) coletor de dados com o sensor de temperatura.

Fonte: INMET (2011).

Tecnicamente, estas estações podem ser compreendidas como equipamentos coletores de dados, utilizadas de forma individual ou através de redes com fio ou sem fio, sendo que emprego destes equipamentos pode favorecer estes modelamentos matemáticos à medida que um maior número destas estações são distribuídos ao longo da plantação, ou seja, obtém-se melhores resultados à medida que mais pontos para coleta de dados são posicionados ao longo da plantação. Este procedimento torna-se viável a medida que sensores e equipamentos fiquem mais baratos.

## 2.2 Sensores de Molhamento Foliar

Para determinação da DMF de forma indireta são necessários alguns sensores para leitura das grandezas relacionadas a este fenômeno, sendo que tais dispositivos estão disponíveis comercialmente a um custo acessível. Já o sensor para determinação direta da DMF ainda não possui esta facilidade, sendo que estes sensores são muito caros e apenas detectam a presença de água, não quantificando o molhamento. Desta forma, as Subseções a seguir discutem estes aspectos que envolvem a DMF.

### 2.2.1 Determinação da DMF

A presença de água na folha do vegetal por um determinado período de tempo, juntamente com a presença de fitopatógenos, torna propício o desenvolvimento de doenças por estes, que encontram ali um meio para infectar a planta. Sua parametrização requer a aquisição de grandezas agrometeorológicas como velocidade do vento, temperatura e umidade do ar e índice pluviométrico para caracterizar a DMF de forma indireta e, assim, possibilitar a estimativa de desenvolvimento de doenças na lavoura (SENTELHAS et al., 2004; SANTOS, 2006). Para que a determinação desta DMF seja eficaz como técnica preventiva numa extensa área de plantio, diversos pontos de amostragem são necessários para se caracterizar o microclima, já que o emprego de apenas uma estação na propriedade não é capaz de representar situações específicas na plantação (MAGAREY et al., 2001).

Sendo a umidade relativa e temperatura do ar as opções de sensores mais acessíveis e utilizadas em diversas aplicações, tanto agrícolas quanto industriais, verifica-se no mercado uma grande variedade e disponibilidade destes sensores, não raro com ambas as grandezas num mesmo encapsulamento com um microprocessador integrado<sup>1</sup>. Estes dispositivos são oferecidos dispensando calibrações e circuitos de interfaceamento e fornecendo as

<sup>1</sup>tecnologia conhecida por *System-on-a-Chip* (SoC)

medições em formato digital. O baixo custo destes sensores permite sua instalação em diversos pontos da plantação através de estações de aquisição de dados. Já os sensores de molhamento foliar encontram-se num cenário diferente, onde a escassez de fabricantes e o alto custo, cerca de US\$ 400 no mercado nacional, dificultam a obtenção destes sensores em grande quantidade, tornando o seu uso distribuído na plantação quase proibitivo.

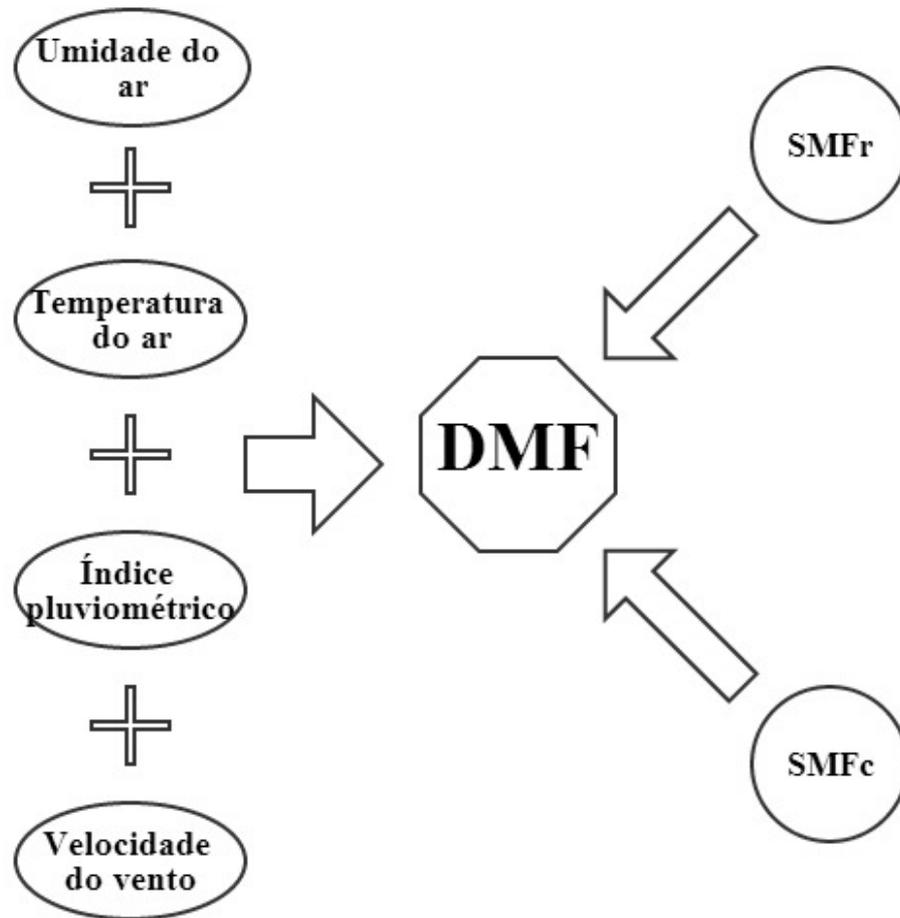
Também, alguns esforços tem sido feitos com o objetivo de se obter um sensor que traduza com exatidão a duração do período de molhamento em uma folha. Contudo, não há solução fácil em vista da dificuldade em se medir esta grandeza devido ao seu comportamento irregular, pois não depende exclusivamente das condições atmosféricas, mas também da sua interação com a estrutura, composição e fisiologia do dossel da cultura (MAGAREY, 1999; MADEIRA et al., 2002; SENTELHAS et al., 2005; MARTA et al., 2007). O trabalho de Sentelhas et al. (2004) descreve os instrumentos de determinação do molhamento foliar eletrônicos, que tem sido os mais estudados por inúmeros motivos, dentre eles, sua construtividade permite simular diversos formatos de folhas sem comprometer seu princípio físico e sua característica eletrônica facilita nas etapas de integração com um coletor de dados. Entretanto, verifica-se que estes sensores de molhamento foliar disponíveis limitam-se, em sua maioria, a detectar a presença de água e a duração do molhamento sem, contudo, quantificá-la. Isto porque, até bem pouco tempo, não se associava à severidade das doenças fúngicas a quantidade de molhamento sobre a superfície das folhas.

O desenvolvimento de um sensor que detecte e também quantifique a água presente na folha pode auxiliar fitopatologistas em estudos para determinar não só o período de molhamento necessário para infecção, mas também o quanto de água é necessário para favorecê-la, apontando com maior exatidão o momento da primeira aplicação de fungicida. Assim, esta informação, somada aos dados de velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, contribuem para classificar de forma mais eficaz a probabilidade de manifestação da doença, bem como sua predição através do uso de algoritmos inteligentes.

A Figura 2.3 resume os conceitos para determinação da DMF discutidos aqui, de tal forma que somando-se parâmetros de umidade relativa e temperatura do ar, índice pluviométrico e velocidade do vento, é possível obter a DMF de forma indireta. Por sua vez, os sensores do tipo Sensor de Molhamento Foliar Resistivo (SMFr) e Sensor de Molhamento Foliar Capacitivo (SMFc) permitem a obtenção da DMF de forma direta, entretanto, sem quantificar a água presente na superfície da folha.

Dessa forma, este trabalho apresenta um sensor de molhamento que não apenas de-

Figura 2.3: Parâmetros para a DMF.

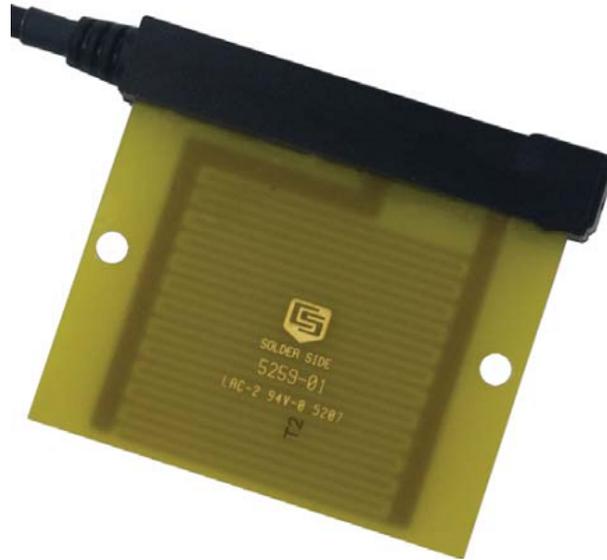


Fonte: Autor.

tecta a presença de água, mas também quantifica esta água na superfície da folha. Suas principais características são: baixo custo, facilidade de confecção e de instrumentação. Tais características foram alcançadas graças ao princípio físico deste sensor que, basicamente, é um capacitor, onde o contato com a água interage com o campo elétrico, de tal maneira que a interação com o campo elétrico e o meio (água) altera a capacitância medida, sendo feita uma análise deste tipo de sensor na Seção 2.2.

### 2.2.2 Sensor Resistivo

A grande maioria dos sensores de DMF comerciais baseia-se no princípio físico resistivo, no qual o contato de apenas uma pequena gota de água entre duas trilhas consecutivas (dois eletrodos) estabelece uma mudança resistiva do sensor, deflagrando o molhamento. Neste trabalho, identifica-se como Sensor de Molhamento Foliar Resistivo (SMFr). A Figura 2.4 apresenta um SMFr da Campbell Scientific, modelo 237.

**Figura 2.4:** Modelo de placa resistiva.

Fonte: Campbell Scientific (2008).

Tratam-se de sensores construídos em Placa de Circuito Impresso (PCI) e uma lâmina de cobre numa face. Geralmente, estas placas são constituídas de material com grau FR-4<sup>2</sup> com trilhas interdigitadas onde, conforme a aplicação, recebem uma pintura de látex para melhorar a exatidão nas medições, facilitando o espalhamento da água sobre o sensor de forma a corresponder ao molhamento real de uma folha do vegetal em análise (SENTELHAS; MONTEIRO; GILLESPIE, 2004). Porém, a funcionalidade deste tipo de sensor limita-se em indicar a ocorrência e a duração do molhamento sem, contudo, quantificá-la. Seu princípio de funcionamento é esquematizado na Figura 2.5. Ainda, devido à necessidade de exposição direta dos eletrodos em contato com a água para se explorar o efeito resistivo, geralmente estes eletrodos são banhados a ouro para prevenir corrosões, fato que encarece este tipo de sensor.

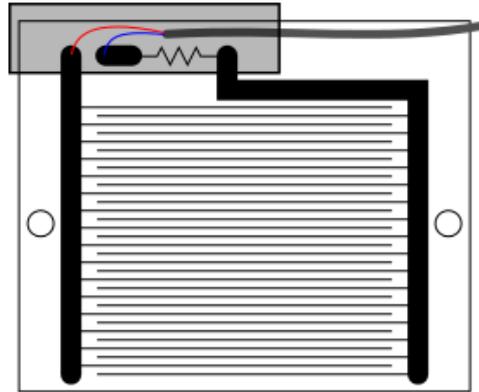
### 2.2.3 Sensor Capacitivo

Neste tipo de sensor de molhamento, Figura 2.6, é explorado o efeito capacitivo, que será discutido a seguir, onde gotículas de água em contato com qualquer área da superfície do sensor são detectadas. Assim, este Sensor de Molhamento Foliar Capacitivo (SMFc) permite a detecção de porções mínimas de água, superando o sensor de molhamento resistivo na medição da DMF.

Na construção destes sensores também é empregada a tecnologia de PCI, Figura

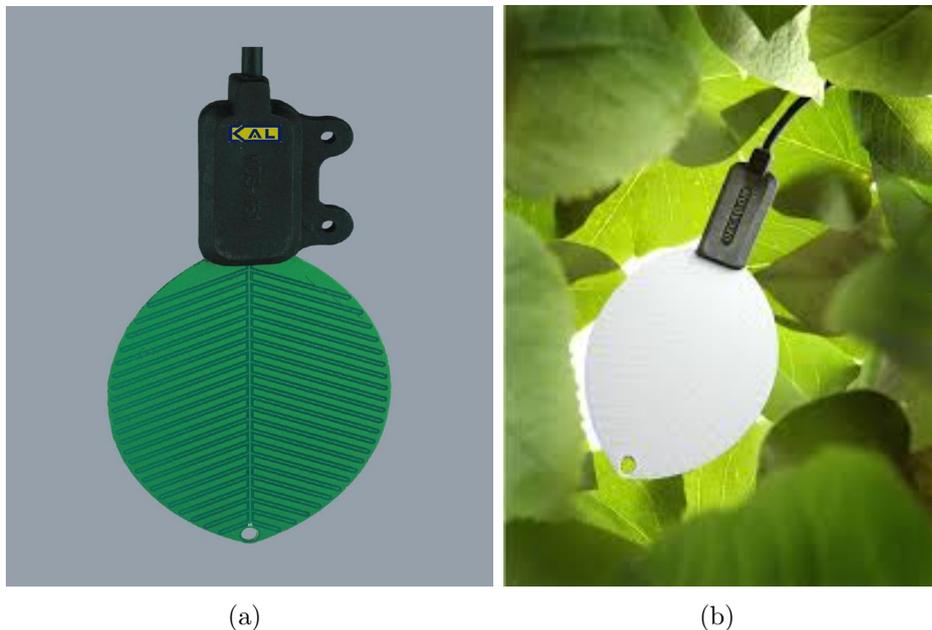
---

<sup>2</sup>Conforme padronização da National Electrical Manufacturers Association (NEMA), são laminados (placas) construídos em de fibra de vidro e resina epóxi resistente a chamas.

**Figura 2.5:** Esquema de placa resistiva.

Fonte: Adaptado de Sentelhas, Monteiro e Gillespie (2004).

2.6(a), porém, diferente dos sensores resistivos, os sensores capacitivos devem receber algum tipo de pintura para isolar seu contato com a água, Figura 2.6(b), como esmalte acrílico, por exemplo. Dispensando, assim, a utilização de ouro na sua confecção e tornando sua fabricação muito barata, possibilitando seu uso em larga escala na plantação.

**Figura 2.6:** Sensores capacitivos comerciais.

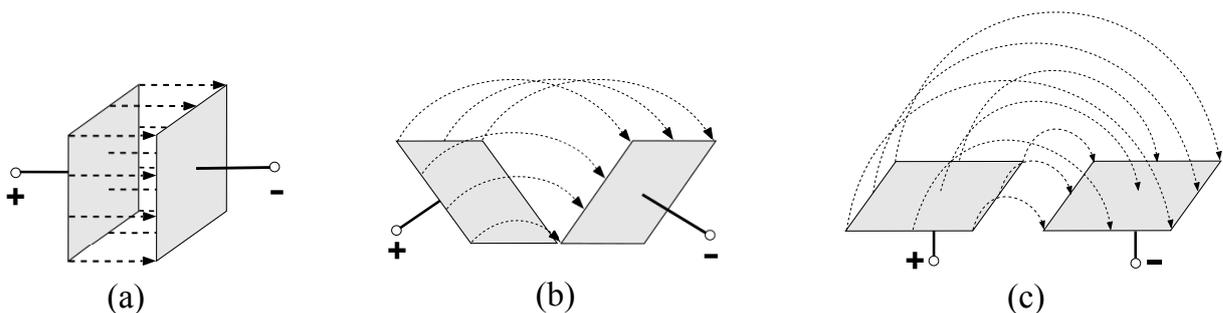
Fonte: (a) Komoline Aerospace Limited (2012); (b) Decagon Devices (2010).

Visualmente, os sensores capacitivos são semelhantes aos sensores resistivos, porém, além de receberem uma pintura diferente, estas placas também possuem em sua face inferior outra lâmina de cobre ligada ao plano de terra, com a finalidade de eliminar influências na capacitância nesta superfície.

### 2.2.3.1 Capacitância por Efeito do Campo de Borda

Como visto, os sensores capacitivos empregados para DMF consistem, também, de eletrodos coplanares interdigitados que exploram o efeito capacitivo através da interação do campo elétrico com o meio sob teste (ar, água ou algum material) mais intensa em suas bordas, daí o nome “sensor por efeito do dielétrico do campo de borda”, ou *Fringing Field Dielectric Sensor (FFDS)* na literatura internacional (MAMISHEV et al., 2004)). A Figura 2.7 ilustra a transição de um capacitor de placas paralelas para um capacitor por campo de borda. Na Figura 2.7(a) tem-se um capacitor tradicional de placas paralelas com região de influência mais intenso entre as placas. À medida que deslocam-se estas placas para um mesmo plano (Figura 2.7(b)), sua região de influência passa a afetar uma área externa maior e, na situação em que as placas participam do mesmo plano (Figura 2.7(c)), a região de influência (campo elétrico) passa a ser o meio externo. Nesta configuração, o campo elétrico se projeta para além do plano dos eletrodos, permitindo que as linhas de campo elétrico interajam com o meio ou material que esteja próximo o suficiente, alterando o valor da capacitância. Esta influência da capacitância ocorre de acordo com a permissividade elétrica do material sob teste. Por isso, a maior parte das aplicações envolvendo este tipo de sensor está relacionada à determinação de umidade, visto que a permissividade da água é 80 vezes maior que do ar à temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , alterando significativamente o campo elétrico e, conseqüentemente, a capacitância do sensor.

**Figura 2.7:** Transição de um capacitor de placas paralelas para coplanares.

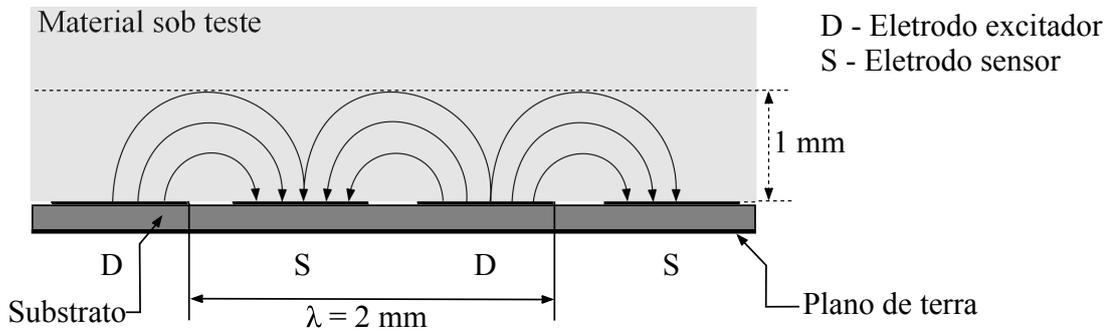


Fonte: Adaptado de Mamishev et al. (2004).

Através da Figura 2.8 pode-se observar que, nesta configuração das placas, a profundidade de penetração do campo elétrico corresponde à proporção  $\lambda/2$ , com seu ápice exatamente entre os centros de um par de eletrodos consecutivos. Pela Figura 2.8, verifica-se que a penetração das linhas de campo elétrico são proporcionais ao período espacial  $\lambda$  dos eletrodos (MAMISHEV et al., 2004). Assim, Como neste trabalho explora-se o contato direto da água com o sensor, construiu-se um sensor com trilhas mais próximas possível,

intensificando seu efeito próximo à superfície. Estas influências em razão da geometria do sensor são discutidas em detalhes na Seção 3.1.

**Figura 2.8:** Exemplo do efeito das linhas de campo elétrico, através de uma visão seccional do sensor interdigitado.



Fonte: Adaptado de Mamishev et al. (2004).

## 2.3 Concentração de água no solo

O solo é uma mistura bastante heterogênea, sendo normalmente dividida em três partes: sólida, gasosa e líquida. A parte sólida constitui-se de matéria mineral e orgânica. Por sua vez, a gasosa é formada de ar, cuja composição depende das atividades biológicas. Já a fase líquida é constituída de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos, cuja concentração varia com o tipo de solo e seu teor de água (KIRKHAM, 2004).

A água presente no solo também pode se apresentar de diferentes formas: adsorvida, absorvida e capilar. A água adsorvida está ligada as superfícies das partículas do solo por meio de forças eletrostáticas, não se movendo no interior da massa porosa. Por sua vez, a água livre (absorvida) é aquela que pode se mover, sem outro obstáculo senão aqueles impostos por sua viscosidade e pela estrutura do solo. Finalmente, o fluxo de água capilar representa a porção de água advinda dos lençóis freáticos (KIRKHAM, 2004), que pode ser desprezada em estudos com plantações, em vista da sua profundidade.

Esta dinâmica entre o solo e a água traz impactos de forma direta no desenvolvimento das plantas (SOYLU; KUCHARIK; LOHEIDE, 2014). Assim, a quantidade de água no solo é um parâmetro importante na agricultura, podendo ser utilizada em AP para monitoramento e controle na irrigação (GOUMOPOULOS; O'FLYNN; KAMEAS, 2014) e previsão do desenvolvimento de doenças (NEPAL; MENDOZA, 2012), por exemplo. Nestas aplicações, comumente é empregado o uso de tensiômetro ou reflectometria, contudo, estes equipamentos são de difícil utilização para o agricultor, como aponta Pacheco et al. (2012).

## 2.4 Redes de sensores

Compreendida como uma subárea da instrumentação, as redes de sensores contribuem com a simplificação eletrônica dos módulos (nós) sensores, possibilitando a distribuição de um maior número destes dispositivos para coletar informações sobre grandezas de interesse. Assim, o uso deste tipo de rede traz vantagens como custo-benefício, exatidão, flexibilidade, confiabilidade e facilidade de implantação. Estas redes caracterizam-se por dispositivos sensoriais construídos com certo nível de complexidade eletrônica, distribuídos em determinada topologia de rede conforme o padrão ou protocolo adotado, sendo que a aquisição e transmissão de dados destes dispositivos são gerenciados por um equipamento específico, um módulo controlador (ou sorvedouro<sup>3</sup>) destes nós sensores.

A primeira geração de redes de sensores e atuadores surgiu na indústria, com a crescente necessidade de automação de processos para atender a demanda produtiva. Caracteriza-se por sensores conectados através de cabos a um controlador central (Controlador Lógico Programável) numa topologia serial ponto-a-ponto, ou seja, cada dispositivo comunica-se com o controlador através de um canal exclusivo. Esta topologia é pouco interessante, pois o volume de cabos torna sua implementação e manutenção cara. Assim, logo surgiram padrões que interligavam estes dispositivos numa topologia multi-ponto, através de um barramento de dados que permitia a ligação de diversos sensores ou atuadores num mesmo cabeamento. Neste contexto, a evolução do padrão RS-485 foi de grande importância.

Tornando-se um desafio a mais, com o surgimento e expansão da comunicação sem fios, Sauter (2010) observa que, embora as aplicações sem fio sejam, na lógica, o próximo nível de evolução, atualmente não se espera que esta tecnologia substitua completamente os cabos. Diferente disso, a tendência é que haja combinações híbridas de rede cabeada e sem fio, como pode ser verificado no trabalho de Alippi et al. (2010) e em Mirabella e Brischetto (2011).

Embora haja uma diversidade de aplicações para a rede de sensores, todas estas aplicações possuem em comum os mesmos princípios construtivos e desafios de implementação, sendo que o desenvolvimento de redes de sensores envolve tecnologias de três áreas de pesquisa: sensoriamento, comunicação e computação (*hardware* e *software*). Sua implantação requer o levantamento de alguns aspectos como o tipo de sensor a ser utilizado, ambiente de operação, meio de comunicação, arquitetura de processamento e fornecimento de energia.

---

<sup>3</sup>Termo usualmente empregado para redes de sensores sem fio.

Para que uma rede de sensores seja estabelecida, é necessário que o sensor esteja conectado a um dispositivo que realize o controle de leitura, traduza a grandeza lida e faça a interface (comunicação) com a rede na qual esteja conectado. Para isto, é preciso que o dispositivo seja capaz também de armazenar os dados obtidos do sensor e realizar processamentos computacionais que controlem tanto o sensor quanto a interface. Nesta rede é necessário também um módulo controlador (mestre) capaz de gerenciar todos os demais módulos sensores (escravos) e concentrar os dados de aquisições, facilitando a operação do sistema.

De maneira a facilitar a coleta destes dados para análise, pode ser incorporado ao sistema um equipamento de telefonia móvel capaz de transmitir dados através do serviço de GPRS para um computador remoto (servidor) conectado à Internet, permitindo o acesso aos dados de qualquer lugar do planeta.

## 2.5 Conclusão do capítulo

Para a determinação da DMF têm-se disponíveis sensores do tipo resistivo e capacitivo, sendo este último mais vantajoso em relação ao primeiro por não necessitar de tratamentos especiais como cobertura com ouro em sua fabricação. Além disso, o sensor de DMF capacitivo também destaca-se com a vantagem de ser capaz de detectar água em quantidades menores que o sensor resistivo.

Como a água afeta significativamente o dielétrico de um sensor capacitivo, é possível mensurar, além da presença de água na superfície do sensor, também a sua quantidade. Contudo, o estudo sobre os sensores comerciais de DMF apresentado neste Capítulo mostra que o aspecto quantitativo não é explorado. Recentemente, esta Quantidade do Molhamento Foliar (QMF) está sendo avaliada como um parâmetro importante no auxílio aos fitopatologistas para analisar a severidade das doenças fúngicas com relação à quantidade de água sobre a superfície das folhas do vegetal. Em vista desta observação, motiva este trabalho o fato da quantidade de água sobre a folha da planta ser um parâmetro que pode auxiliar melhor o estudo do processo de infecção no vegetal.

Numa plantação, o ideal é utilizar muitos sensores para se analisar a variabilidade espacial deste parâmetro agrometeorológico, a DMF. Porém, em vista do custo elevado destes tipos de sensores comerciais, torna-se inviável sua utilização em larga escala. Desta forma, para viabilizar este tipo de aplicação, é necessário dispor de um sensor mais barato. Como motivação para este trabalho, é apresentado um SMFc que tem como características

a facilidade de fabricação e baixo custo, pois é utilizado PCI em sua construção. Este sensor também é capaz de quantificar a água presente em sua superfície, sendo nomeado neste trabalho como Sensor de Quantidade de Molhamento Foliar Capacitivo (SQMFc).

A presença, ou ausência, de água no solo também é um fator que traz impactos diretos no desenvolvimento das plantas. Como observa-se no trabalho de Majone et al. (2013), para análises de variabilidade espacial deste parâmetro são necessários muitos sensores, que implicam em altos investimentos. Tendo em vista que o sensor de molhamento foliar proposto aplica-se como quantificador de água, avaliou-se, também, se o mesmo pode ser utilizado para quantificar a água presente no solo, oferecendo vantagens como facilidade de fabricação e baixo custo.

Atualmente, modelos matemáticos computacionais para previsão de infestações de doenças utilizam dados provenientes de estações meteorológicas de entidades de pesquisa climática, como já discutido no início deste capítulo. Contudo, o emprego de um número maior de sensores de molhamento por meio de redes de estações coletoras na própria região de cultivo podem auxiliar nesta modelagem matemática preditiva de doenças de maneira mais precisa, visto que os dados meteorológicos de interesse são, desta forma, adquiridos localmente na região de plantio estudada, possibilitando análises que englobam tanto micro, quanto macrorregiões.

Neste trabalho montou-se uma pequena rede de sensores através de cabos para testes em pequenas áreas, como estufas, por exemplo. A utilização de uma rede cabeada para este trabalho deve-se a simplificação da implementação, já que a pouca distância entre as estações utilizadas para testes não justifica o emprego de uma rede sem fio, como a utilizada no trabalho de Guedes (2014).

Como discutido, é necessário um novo sensor de baixo custo para que, em uma região de cultivo, possam ser utilizados em um número grande de pontos de medição. Também, a quantidade de água na superfície da folha é um parâmetro relevante para estudos fitopatológicos, mas que não é medido pelos sensores disponíveis.

No capítulo seguinte é apresentado um estudo da construção deste sensor e um modelo confeccionado para testes. Também são apresentados aspectos estruturais de *hardware* e *software* para a rede de sensores.

## 3 Materiais e Métodos

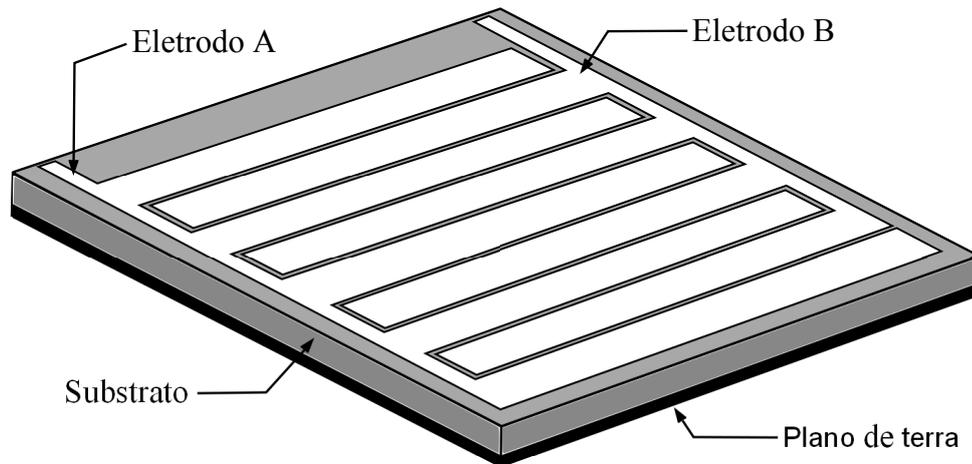
Neste Capítulo apresenta-se o sensor proposto, capaz de medir a DMF como nos modelos comerciais e também quantificar a água presente em sua superfície. Tal sensor oferece vantagens como facilidade de confecção e baixo custo, obtido mesmo em pouca quantidade fabricada, graças ao emprego de PCI na sua construção.

Nas seções que seguem, serão discutidos aspectos físicos e eletrostáticos para a construção do sensor capacitivo de molhamento foliar proposto, baseando-se em simulações assistidas por computador para verificar a influência da área molhada, temperatura e geometria do sensor. Também, é feita uma breve análise sobre condicionadores de sinal que exploram a FFDC, sendo apresentado um condicionador eleito para implementação. Com base nas simulações, discute-se o desenho de um sensor para validação dos testes, de forma a se obter repetibilidade nos experimentos. Ainda, para validar o sensor proposto como medidor do teor de água no solo, um novo desenho é analisado para este experimento. Por fim, são discutidos aspectos de *hardware* e *software* para concepção do sistema de aquisição proposto.

### 3.1 Estudo construtivo do sensor capacitivo

O sensor proposto neste trabalho explora a capacitância pelo efeito do campo de borda do dielétrico, que possui comportamento semelhante a um capacitor de placas paralelas. Sensores deste tipo, exemplificado na Figura 3.1, possuem uma estrutura com  $n$  trilhas de cobre depositadas num substrato isolante, dispostas paralelamente e interligadas por dois eletrodos, um excitador e outro sensor, de tal forma que estas trilhas se intercalam entre trilha excitadora e trilha sensora por uma distância  $d$ , constituindo um sensor interdigitado. Ainda, uma malha de terra preenche toda a superfície oposta aos eletrodos. Isto evita que qualquer material em contato com esta superfície afete na capacitância do sensor.

Devido a dificuldade em modelar analiticamente sensores capacitivos por campo de

**Figura 3.1:** Desenho do sensor simulado.

Fonte: Autor.

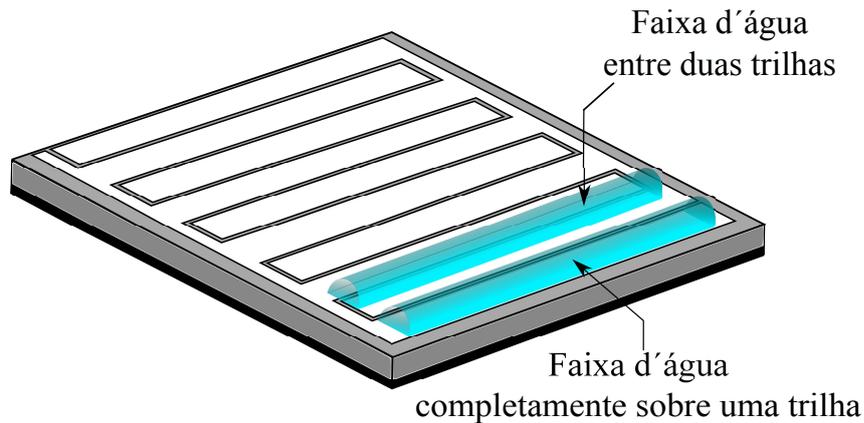
borda do dielétrico, foi modelado um sensor utilizando o aplicativo FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). FEMM é uma suíte de programas para resolver problemas eletromagnéticos de baixa frequência em estruturas planares bi-dimensionais, utilizando técnicas de Métodos de Elementos Finitos (FEM). É um *software* livre desenvolvido para o ambiente Windows<sup>®</sup> por David Meeker (2010).

O objetivo das simulações foi determinar como alguns fatores influenciam em aspectos como a capacitância do sensor e a sua sensibilidade. Para isto, foram simuladas diversas situações com lâminas de água envolvendo, total ou parcialmente, a superfície sensível.

Considerando a simetria plana deste tipo de sensor, a técnica numérica de simulação pelo Método de Elementos Finitos (FEM) para duas dimensões foi adotada como estratégia de análise. Com base nestas predefinições, esta Seção apresenta algumas situações que foram simuladas para auxiliarem na definição do *layout* de um sensor real para testes experimentais.

### 3.1.1 Simulações do sensor capacitivo

O sensor foi modelado com base no esquema, fora de escala, da Figura 3.2. São simuladas situações com ar envolvendo todo o sensor e porções de água, de maneira que esta é disposta gradativamente em forma de faixas sobre a superfície sensível. As propriedades do sensor durante as simulações são sempre as apresentadas na Tabela 3.1. Desta forma, são avaliadas as influências de diversos parâmetros em sua capacitância.

**Figura 3.2:** Posicionamento da água na superfície do sensor.

Fonte: Autor.

**Tabela 3.1:** Propriedades do sensor usado na simulação.

Propriedade	Valor
Largura das trilhas de cobre	1,12 mm
Altura das trilhas de cobre	36 $\mu\text{m}$
Distância entre as trilhas de cobre	0.1 mm
Altura do substrato	1,575 mm
Altura da máscara de solda	16,9 $\mu\text{m}$
Altura da lâmina de água	1,372 mm
Comprimento total do sensor	61 mm
Largura total do sensor	57 mm
Número total de trilhas de cobre	50
Temperatura	20°C
Constante dielétrica do ar	1,00059
Constante dielétrica da água	80,34

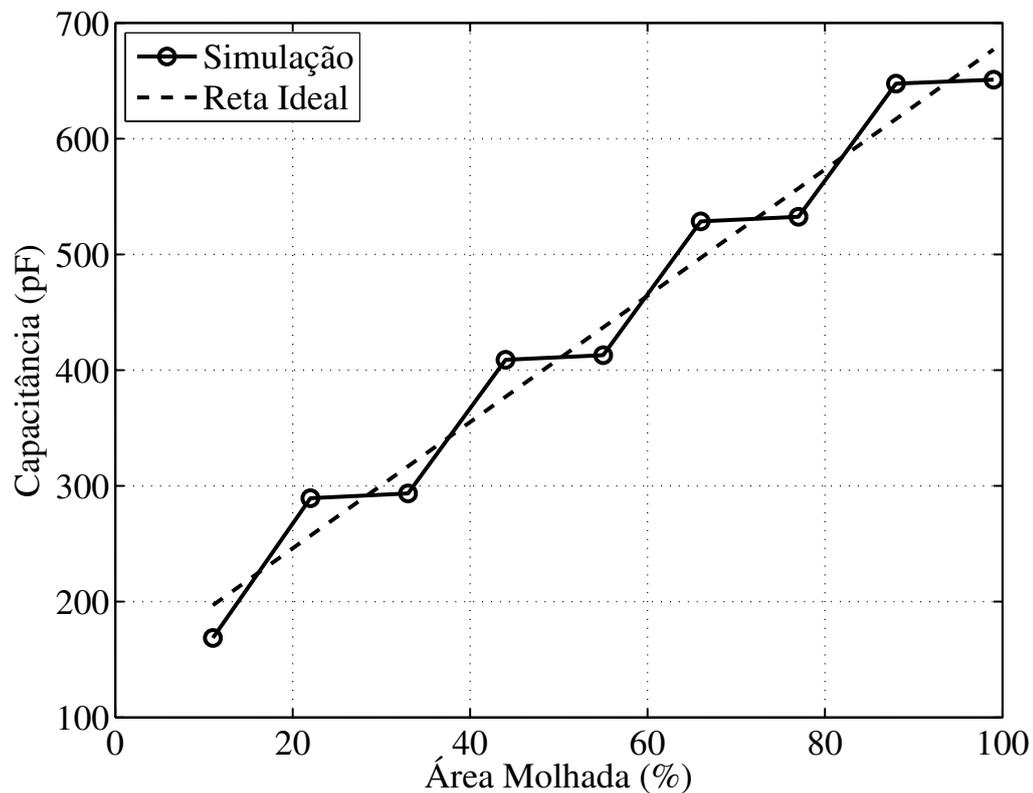
### 3.1.2 Influência da área molhada no sensor

Nesta etapa, buscou-se avaliar a dependência da capacitância do sensor com a quantidade de água em sua superfície. Para tanto, faixas de água foram acrescentadas gradativamente sobre a superfície sensível do sensor, variando a área molhada de 0 até 100%. Cada faixa d'água foi alocada em duas posições distintas: completamente sobre uma das trilhas ou cobrindo parcialmente duas trilhas vizinhas. Também, cada faixa d'água tem largura idêntica as das trilhas condutoras. O resultado desta simulação é apresentado no gráfico da Figura 3.3.

Observa-se que o gráfico possui algumas regiões nas quais, mesmo aumentando a quantidade de água, a capacitância permanece praticamente constante. Isto acontece sempre que a faixa d'água adicionada está posicionada completamente sobre uma das trilhas de cobre. Na prática, isto poderá ocorrer sempre que o diâmetro da porção de

água for menor ou igual à largura das trilhas condutoras do sensor. Por outro lado, se uma gota estiver posicionada entre duas trilhas, na região onde as linhas de campo interagem com maior intensidade, existe alteração linear no valor da capacitância.

**Figura 3.3:** Variação da capacitância do sensor em função do posicionamento das faixas de água.



Portanto, para que o sensor funcione como desejado, é necessário que o contato do material sob teste, que neste caso é a água, com as linhas de campo provoque a alteração destas. Isto só ocorre onde existe uma diferença de potencial, ou seja, na região onde as trilhas de cobre são separadas por uma pequena distância. Assim, na prática, para aumentar a sensibilidade e a linearidade do sensor, o mesmo deve ser confeccionado com trilhas condutoras tão estreitas quanto possível, garantindo que as linhas de campo se formem em espaços muito pequenos.

Como pode ser visto na Figura 3.3, apesar da característica do sensor de apresentar patamares, referentes às faixas d'água quando posicionadas totalmente sobre uma das trilhas, o gráfico pode ser modelado por uma reta com coeficiente de determinação igual a  $R^2 = 0,97$ .

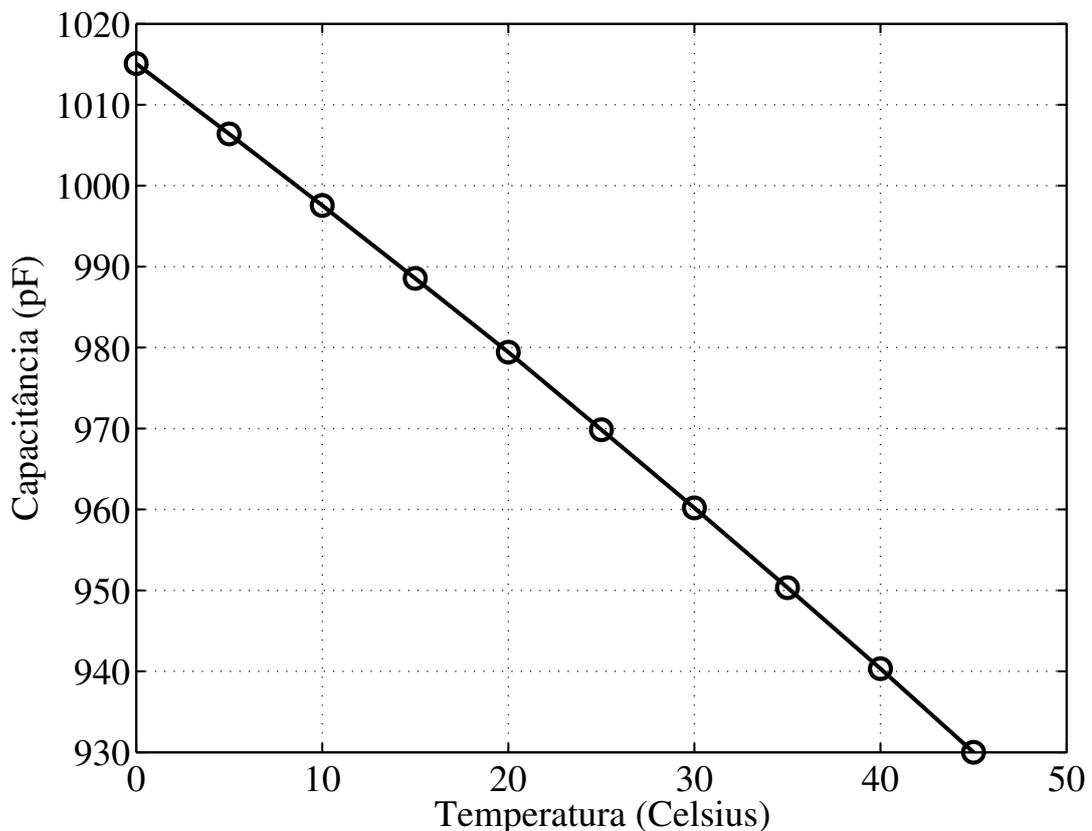
### 3.1.3 Influência da temperatura no sensor

A constante dielétrica da água ( $\epsilon_{\text{water}}$ ) varia consideravelmente com as alterações de temperatura, de acordo com Lide (2009)

$$\epsilon_{\text{water}}(t) = 78,54[1 - 4,579 \times 10^{-3}(t - 25) + 1,19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2,8 \times 10^{-8}(t - 25)^3], \quad (3.1)$$

onde  $t$  é a temperatura da água em graus Celsius. Por outro lado, no caso do ar e de partículas sólidas, a constante dielétrica é menos dependente da temperatura (ROTH et al., 1990) e, dessa forma, dependendo da aplicação, pode ser considerada constante. Assim, a influência da temperatura na capacitância do sensor será maior quando 100% da sua superfície estiver coberta por água. Para examinar tal influência, o sensor foi modelado nesta condição, com a temperatura variando de 0 a 45°C e com sua permissividade dada pela Equação (3.1). O resultado é apresentado na Figura 3.4.

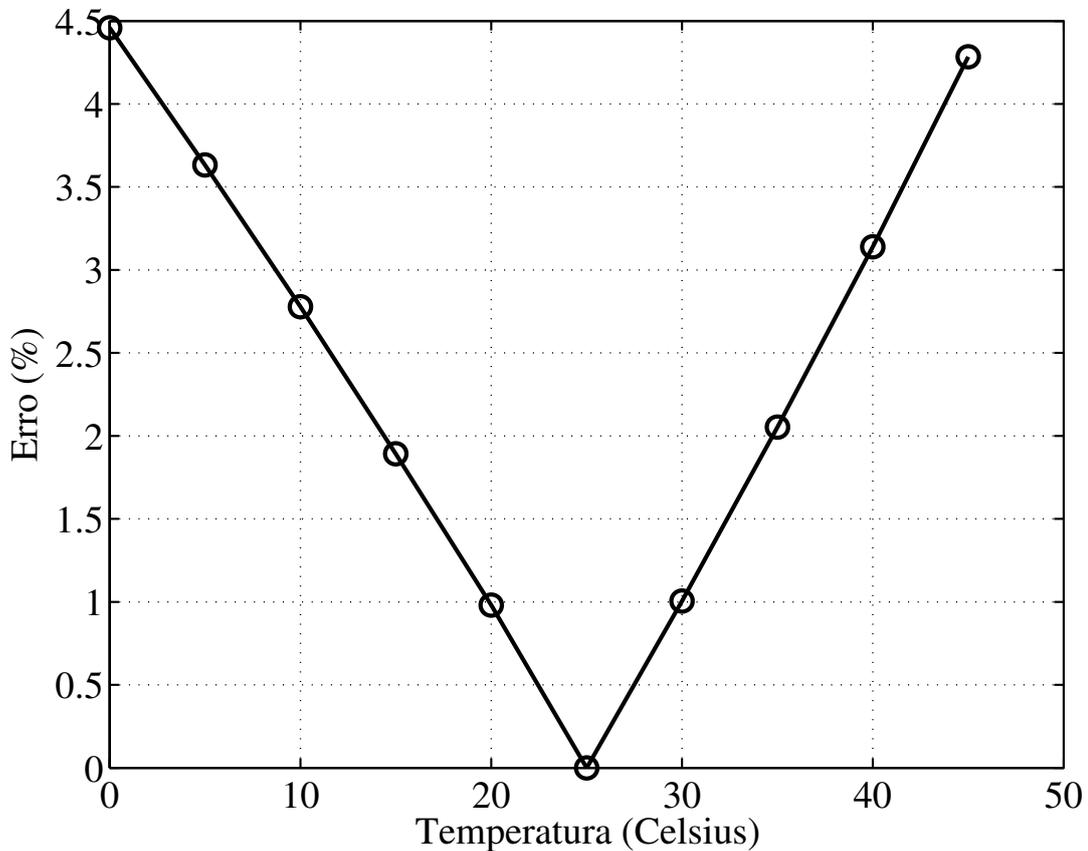
**Figura 3.4:** Variação da capacitância do sensor em função da temperatura.



Como se pode observar, a capacitância variou significativamente com a temperatura. Contudo, se a calibração do sensor ocorrer, por exemplo, a 20°C, como apresentado na Figura 3.5, o erro máximo cometido ao ignorar-se a influência da temperatura, conside-

rando a mesma variação anterior, é de 5 %. Para reduzir este erro, pode-se utilizar a Equação (3.1) para calibrar o sensor de acordo com a temperatura.

**Figura 3.5:** Erro obtido quando se calibra o sensor a 20°C.



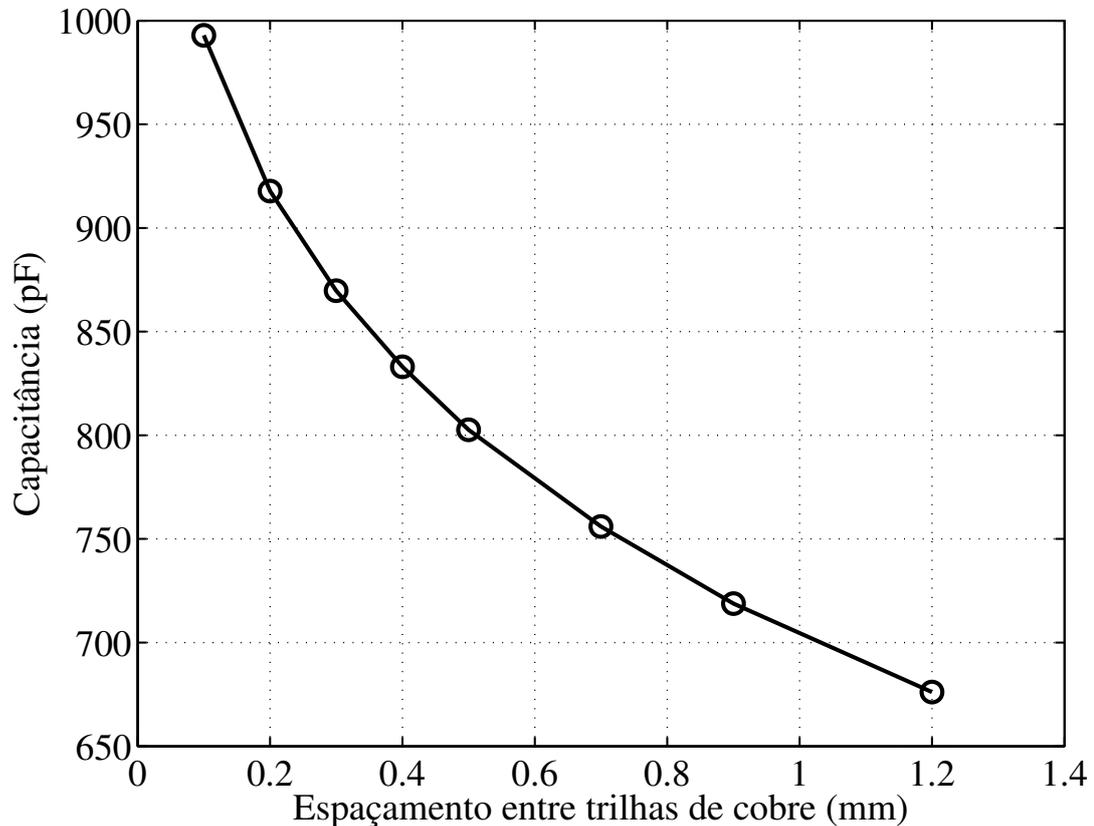
### 3.1.4 Influência da geometria do sensor

Na confecção do sensor, é importante que a sua geometria seja escolhida de forma a maximizar sua sensibilidade, ou seja, aumentar a variação da sua capacitância em função da grandeza a ser medida. Com certeza, quanto maiores as dimensões do sensor, maior será a superfície de contato com o meio e, conseqüentemente, maior será sua sensibilidade. Assim, considerando as limitações e necessidades de uma aplicação, o tamanho do sensor deve ser o maior possível. No entanto, a escolha da largura das trilhas condutoras  $w$  e do espaçamento entre as mesmas  $d$ , não é tão evidente. Por isso, no presente trabalho, a influência destes parâmetros também foi examinada através de simulação.

Para determinar a influência da distância entre as trilhas de cobre, o sensor foi simulado enquanto  $d$  variou de 0,1 a 1,2 mm. O resultado dessa simulação é apresentado na Figura 3.6. Observa-se que a capacitância do sensor diminui rapidamente à medida que  $d$  aumenta.

A influência da largura das trilhas condutoras foi avaliada simulando o sensor enquanto  $w$  variou de 0,2 até 2,0 mm. O resultado dessa simulação é apresentado na Figura 3.7. Novamente, observa-se que a capacitância diminui rapidamente à medida que  $w$  aumenta.

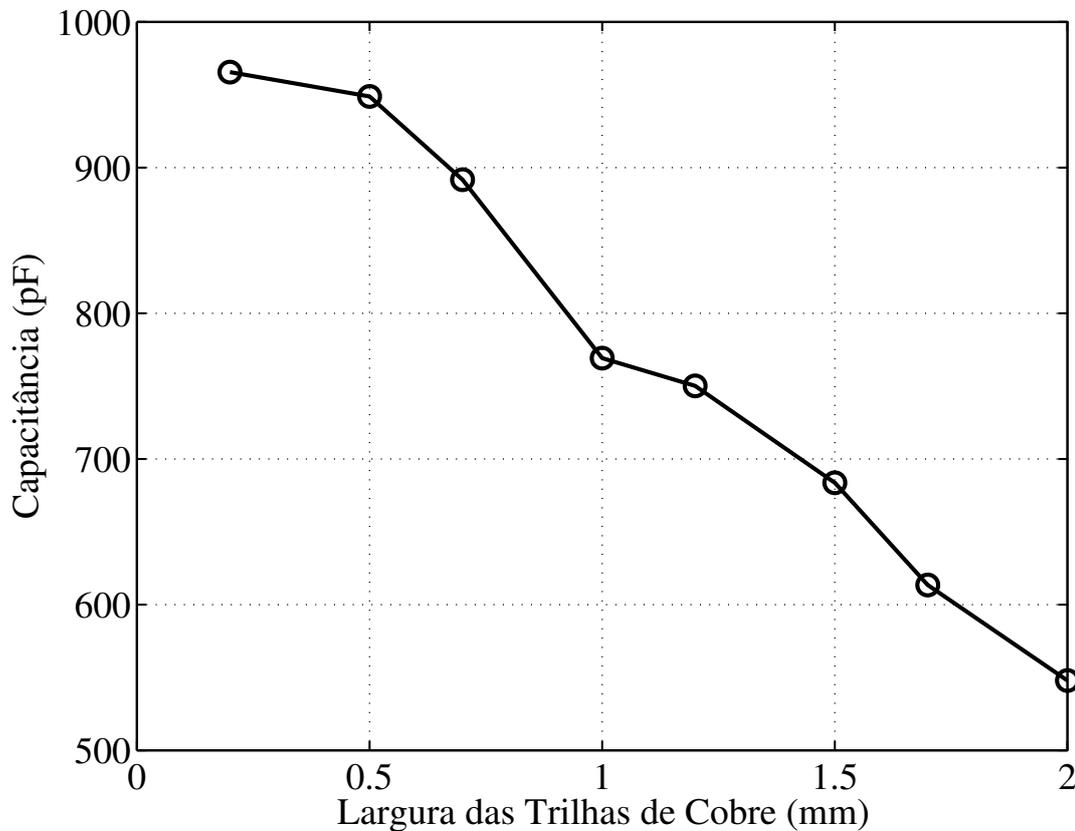
**Figura 3.6:** Capacitância do sensor em função do espaço entre as trilhas condutoras.



Pelo resultado das simulações,  $d$  e  $w$  devem ser tão pequenos quanto possível. Com base neste resultado, conclui-se que para sensores dielétricos de campo de borda, a capacitância é dada principalmente pela interação eletromagnética entre as bordas das trilhas condutoras dos dois eletrodos. Assim, considerando um sensor com placa de tamanho fixo, quanto maior for  $d$ , ou  $w$ , menor será o número de bordas nas trilhas de cada eletrodo, reduzindo o valor da capacitância e, conseqüentemente, a sensibilidade do mesmo. Este fato converge com o resultado já obtido a partir da análise das simulações discutidas na Seção 3.1.2. No entanto, com a tecnologia nacional para fabricação de circuito impresso disponível atualmente, há um limite para obtenção dos menores valores para  $d$  e  $w$ .<sup>1</sup>

A Figura 3.8 apresenta a distribuição do campo na vizinhança de dois sensores, onde os pontilhados (grade) equidistam 0,10 mm. O primeiro tem  $d = 0,2$  mm e  $w = 0,2$  mm, enquanto o segundo tem  $d = 0,2$  mm e  $w = 1,2$  mm. Observa-se que, na Figura 3.8(a),

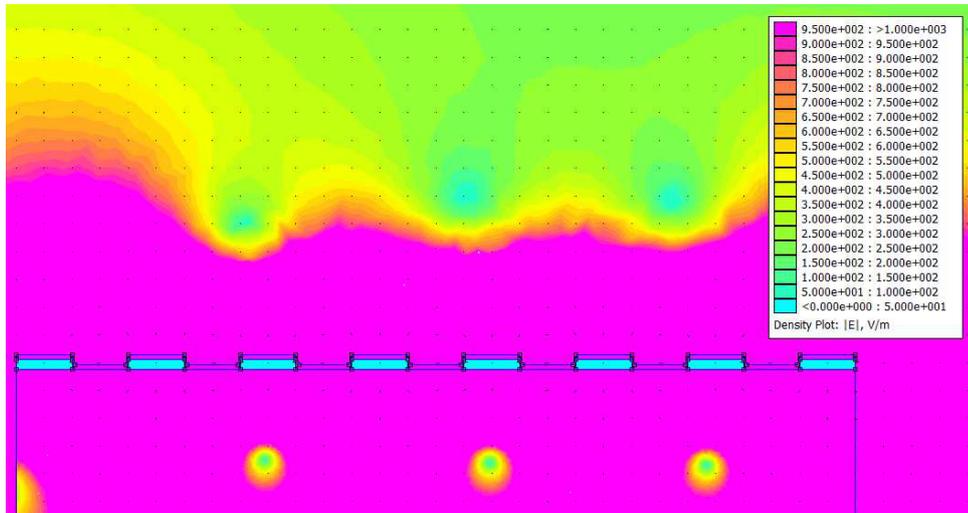
<sup>1</sup>Para construção das trilhas de cobre em dimensões reduzidas existem limites físicos para evitar curto-circuitos ou falhas/rupturas nas trilhas condutoras.

**Figura 3.7:** Capacitância do sensor em função da largura das trilhas condutoras.

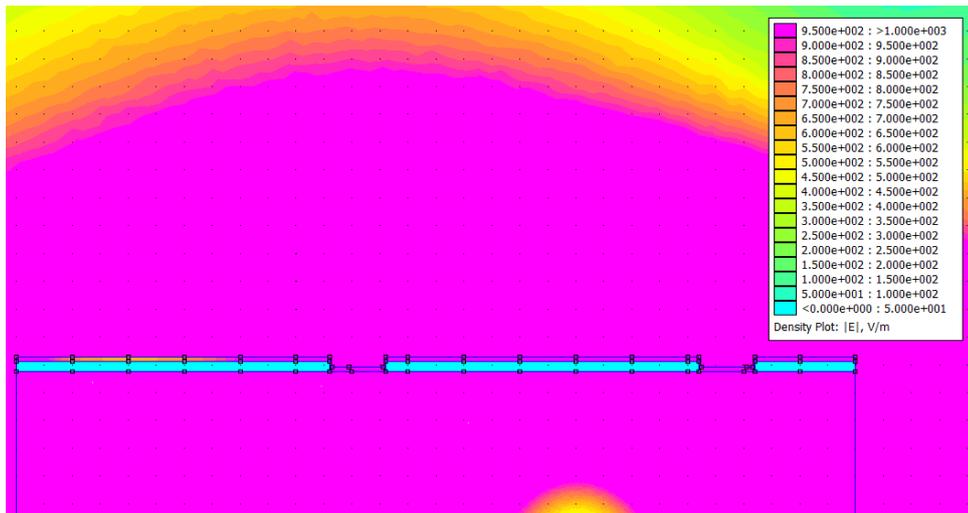
a intensidade máxima de campo ocorre até uma distância de 0,42 mm da superfície do sensor, tendendo rapidamente a 0 V/m. No entanto, na Figura 3.8(b), o campo elétrico máximo se estende até 0,82 mm, mantendo ainda bons níveis de intensidade a maiores distâncias. Este fato deve ser avaliado de acordo com a aplicação desejada. Caso a medição em que o sensor seja submetido implique numa interação próxima à superfície do material, um valor de  $w$  menor atenderá as necessidades. No entanto, se houver a necessidade de uma maior penetração do campo no material sob teste, deve-se optar por um  $w$  maior.

### 3.1.5 Condicionador de sinal para o sensor

Como já discutido, sensores capacitivos por campo de borda variam sua capacitância em função da grandeza que está sendo medida. Verifica-se que a maioria dos trabalhos envolvendo esse tipo de sensor utiliza instrumentos de medição comerciais, normalmente pontes LRC digitais com precisão típica de 0,1%, para determinar a capacitância (DEAN et al., 2012; MCINTOSH; CASADA, 2008). Isto porque, dependendo da geometria do sensor, dentro de toda a sua faixa dinâmica, a variação pode ser menor que 1 nF.

**Figura 3.8:** Simulação da intensidade do campo elétrico na superfície do sensor.

(a)



(b)

(a) com  $d = 0,2$  mm e  $w = 0,2$  mm e (b)  $d = 0,2$  mm e  $w = 1,2$  mm. (Azul claro representa 0 V/m, enquanto o rosa refere-se a 950 V/m ou mais.)

Entretanto, buscou-se dispor de técnicas que possibilitem a implementação em PCI e que se integrem ao sensor proposto sem a necessidade deste equipamento de bancada. Partindo deste pré-requisito, pesquisou-se diversos autores que apresentam diferentes técnicas para a determinação da capacitância. Saxena e Tayal (1981) utilizaram uma ponte capacitiva que necessita de um capacitor variável para ajuste. Já a solução proposta por Hazarika et al. (2006) utiliza um oscilador baseado no circuito integrado LM555, da National Semiconductor<sup>®</sup>, onde a frequência de oscilação varia com a capacitância do sensor. Porém, Wu et al. (2011) observa que a constante dielétrica do material sob teste tem uma relação de dependência com a frequência na qual a medida é realizada, sendo ideal que o sensor esteja excitado sempre na mesma frequência. Assim, uma alternativa que

satisfaz esta condição foi utilizada por Majid et al. (2009), que propôs um circuito cuja diferença de fase na saída é diretamente proporcional à capacitância do sensor. Contudo, tal solução é bastante complexa e exige um oscilador senoidal, sendo mais indicada para implementação em circuitos integrados.

De fato, na literatura é possível encontrar vários outros circuitos para medição de capacitância, mas a maioria deles emprega técnicas mais adequadas para uso em projetos de circuitos integrados, como a utilização de capacitores chaveados (GEORGE; KUMAR, 2010; HEIDARY; MEIJER, 2008; LI; MEIJER, 2000, 2002; SHI; MATSUMOTO; MURAO, 2001). Algumas exceções são os trabalhos de Baglio et al. (2004) e Karlsson (1999), que propuseram circuitos com saída em tensão proporcional à capacitância a ser medida. Porém, tais soluções aplicam-se apenas a sensores de pequenas capacitâncias, com uma faixa muito estreita de variação. Apesar da dificuldade de se obter um circuito adequado para o sensor proposto, encontrou-se uma solução bastante simples, que é apresentada na próxima Seção.

### 3.1.5.1 Circuito de condicionamento adotado

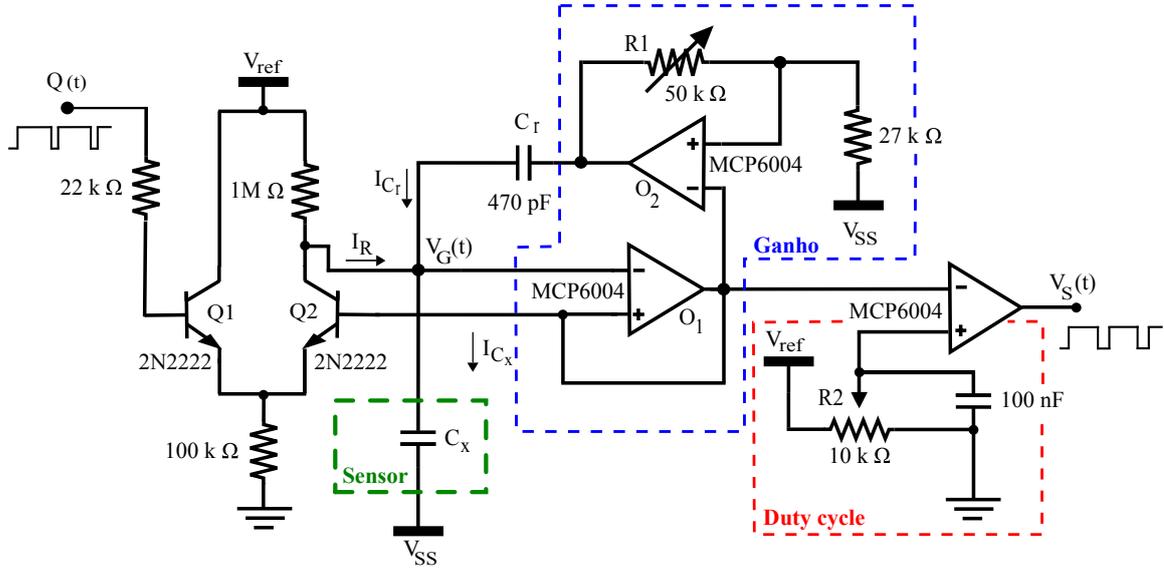
No presente trabalho adotou-se uma solução bastante simples para condicionamento de sinal do sensor proposto. A Figura 3.9 apresenta o esquema eletrônico do circuito. Nesta solução, o sensor é excitado com um sinal de frequência constante e transforma a variação de capacitância em uma variação de largura de pulso. O circuito exige como excitação apenas um sinal digital, que pode ser gerado facilmente por um microcontrolador. Além disto, a variação na largura de pulso apresenta uma grande faixa dinâmica.

Um sinal quadrado  $Q(t)$  e de período  $T$  é usado para acionar o transistor  $Q_1$  do par diferencial formado pelos transistores  $Q_1$  e  $Q_2$ . Quando o sinal  $Q(t)$  está em nível alto ( $T_{ON}$ ), o transistor  $Q_1$  conduz e o transistor  $Q_2$  está em corte. Desta forma, o capacitor  $C_x$  se carrega por meio da corrente que circula pelo resistor de  $1\text{ M}\Omega$ . Quando o sinal  $Q(t)$  está em nível lógico baixo ( $T_{OFF}$ ), o transistor  $Q_1$  fica em corte e o transistor  $Q_2$  conduz. A condução de  $Q_2$  provoca a descarga de  $C_x$ , sendo este um FFDS. Assim, a tensão  $V_G$  oscila com período constante também igual a  $T$ . Além disto, a corrente no capacitor  $C_x$  é dada por:

$$I_{C_x} = I_R + I_{C_r}, \quad (3.2)$$

onde  $I_{C_r}$  é a corrente no capacitor de referência  $C_r$ . O potenciômetro  $R_1$  é usado para ajustar a largura de pulso ( $T_{th}$ ) do sinal de saída,  $V_S(t)$ . Isto porque a corrente  $I_{C_x}$  faz

Figura 3.9: Circuito condicionador de sinal.



Fonte: Adaptado de Ignjatovic e Bocko (2005).

com que a tensão sobre  $C_x$  atinja um limiar  $V_{th}$  em um tempo igual a

$$T_{th} = R_3 C_x \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}. \quad (3.3)$$

Assim, da Equação (3.3), pode-se reescrever a Equação (3.2) como sendo

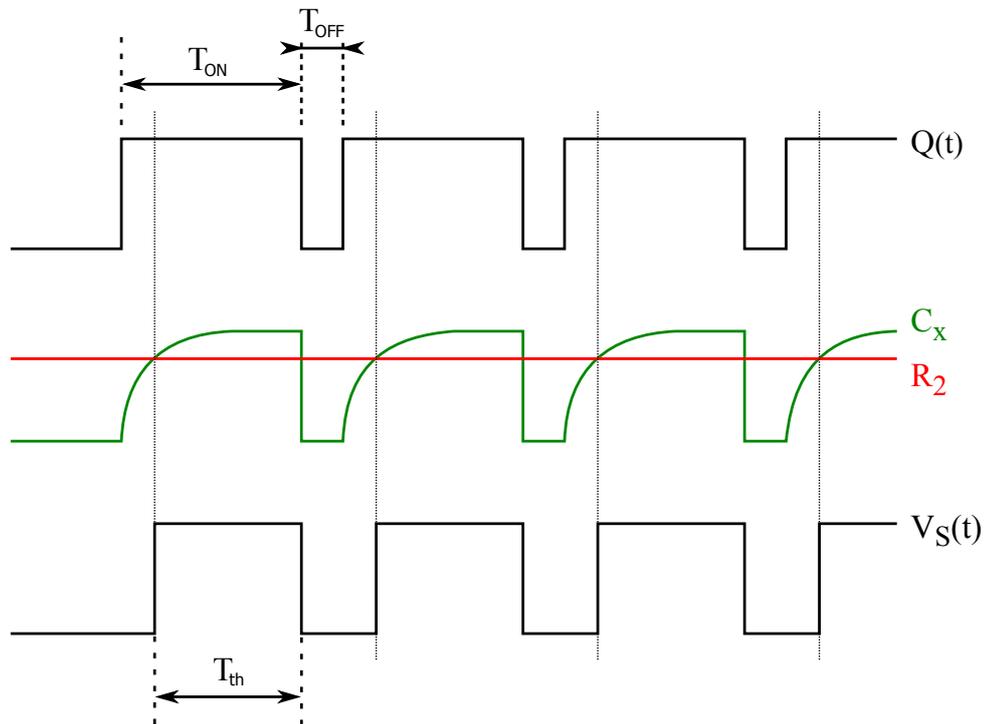
$$\frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}} + C_r \frac{d}{dt} (G V_G - V_G) = C_x \frac{dV_G}{dt}, \quad (3.4)$$

onde  $G$  é o ganho da realimentação formada pelos amplificadores  $O_1$  e  $O_2$ , que pode ser ajustado pelo potenciômetro  $R_1$ . Então, resolvendo a Equação (3.4) e substituindo na Equação (3.3), temos:

$$T_{th} = R_3 [C_x - (G - 1)C_r] \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}. \quad (3.5)$$

Desta forma, a largura do pulso de  $V_S(t)$  depende do ganho  $G$  e do valor de  $C_x$ . Assim,  $T_{th}$  é proporcional a  $C_x$  e é possível ajustar  $G$  para que  $T_{th} \approx 0$ , quando  $C_x$  for mínimo. Portanto, o funcionamento deste circuito pode ser compreendido através de um exemplo das formas de onda, sem escala, na Figura 3.10.

Outra vantagem desta técnica é que  $T_{th}$  pode ser facilmente determinado com 16 bits de resolução, mesmo usando um microcontrolador básico. Caso a saída do circuito fosse em tensão, a exatidão do valor determinado seria muito mais difícil de ser obtida para um mesmo modelo de microcontrolador.

**Figura 3.10:** Formas de onda do circuito condicionador de sinal.

Fonte: Autor.

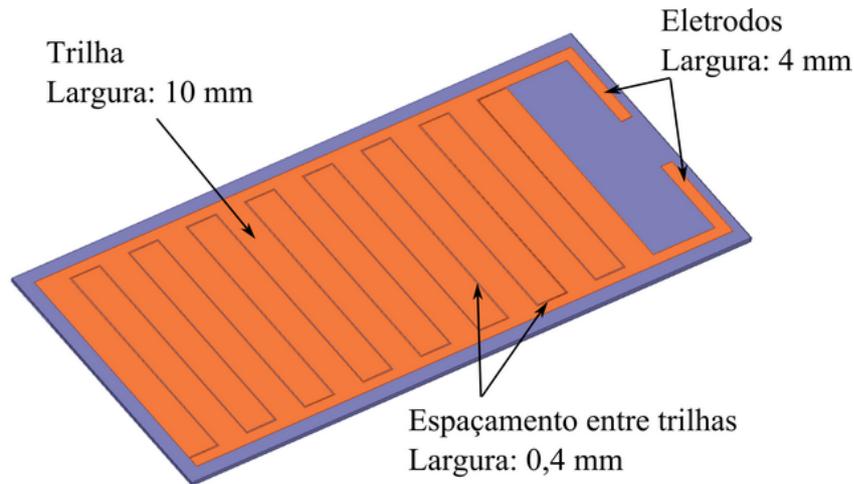
## 3.2 Construção do sensor para testes

Para validar de modo empírico alguns dos resultados obtidos em simulação, construiu-se um sensor como esboçado na Figura 3.11. Este tem dimensões de  $10 \times 20$  cm e, na face superior, trilhas de cobre com largura de 10 mm e espaçamento entre trilhas de 0,4 mm. Sua face oposta é completamente preenchida por uma camada de cobre mantida no potencial de referência (terra). Isto impede que a capacitância do sensor sofra influência de qualquer material que, porventura, entre em contato com a parte inferior do sensor.

Evidentemente, conforme as análises apresentadas na Seção 3.1, as dimensões  $d$  e  $w$  deste sensor não são as mais indicadas. Contudo, elas foram escolhidas de forma que uma gota d'água, formada a partir de uma pipeta graduada, pudesse ocupar o espaço de uma única trilha, proporcionando repetibilidade nos testes e se aproximando das situações simuladas.

## 3.3 Detecção do teor de água no solo

A água presente no solo afeta o dielétrico de um sensor capacitivo da mesma forma já discutida anteriormente. Aproveitando este comportamento, aqui será discutido o melhor

**Figura 3.11:** Esboço da placa fabricada para validação das simulações.

Fonte: Autor.

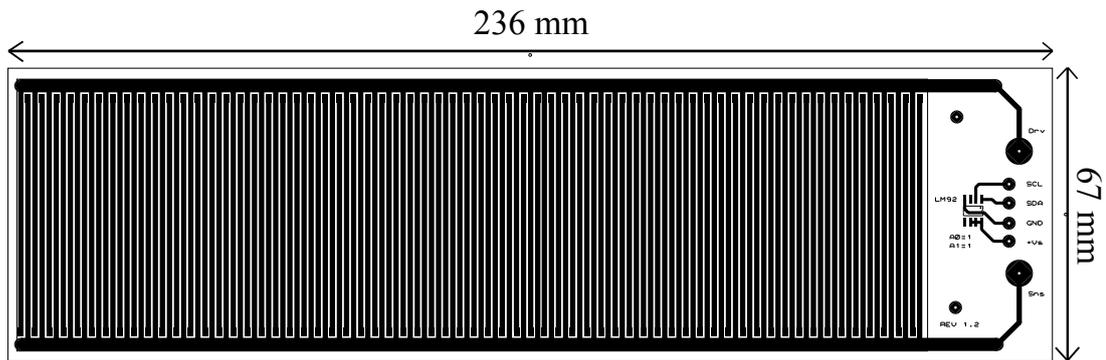
desenho para utilizá-lo com a finalidade de quantificar a concentração de água presente no solo.

O solo tem uma constante dielétrica bem menor que a da água (KIRKHAM, 2004). Assim, para aumentar a sensibilidade, optou-se pela construção de um sensor com as dimensões apresentadas na Tabela 3.2. A distância  $d$  foi escolhida por limitação do método de fabricação do sensor, enquanto  $w$  foi definido em função do resultado da Seção 3.1.4, para que as linhas de campo tenham grande intensidade até uma distância em torno de 0,5 mm do sensor. A Figura 3.12 ilustra o sensor proposto para os testes.

**Tabela 3.2:** Dimensões do sensor construído para medição da concentração de água no solo.

Propriedade	Valor
Largura das trilhas de cobre	1,25 mm
Distância entre as trilhas de cobre	0,35 mm
Comprimento total do sensor	236 mm
Largura total do sensor	67 mm
Número total de trilhas de cobre	128

Também, para padronizar o processo de medição da capacitância deste sensor durante os ensaios, foi confeccionado um porta amostras. Assim, para cada ensaio, são utilizados o porta amostras, o sensor e uma amostra de solo.

**Figura 3.12:** Esboço da placa projetada para testes no solo.

Fonte: Autor.

## 3.4 Sistema de aquisição proposto

Nesta Seção são apresentados os elementos que compõem o sistema de aquisição de dados proposto. Discute-se sua interligação física, estrutura dos módulos, características construtivas dos equipamentos, aspectos do *software* e um sensor comercial de umidade relativa e temperatura do ar escolhido para ser integrado ao sistema.

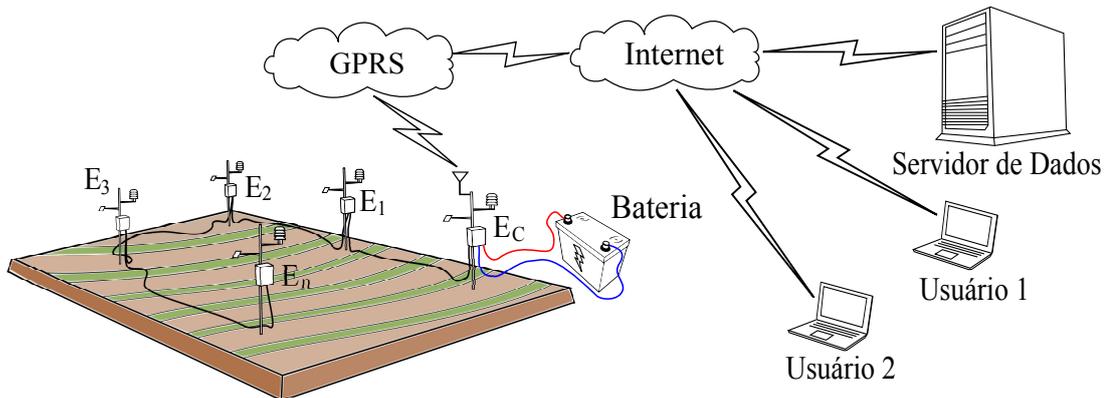
### 3.4.1 Construção da rede e módulos de aquisição

Apesar de se ter como objetivo a simplificação da estrutura de comunicação entre as estações de aquisição de dados, procurou-se definir uma rede com características de robustez, imunidade a ruídos e altas taxas de transmissão de dados. Dessa forma, a proposta neste trabalho emprega o padrão RS-485 para interligação física e o protocolo Modbus para comunicação de dados, sendo apresentados no Apêndice C. A utilização do padrão RS-485 permite que todos os dispositivos estejam interligados num único cabo (barramento de dados), simplificando o gerenciamento da transmissão de dados (algoritmos) e circuitaria. Além disto, novos nós sensores (coletores de dados) podem ser adicionados ao barramento com alterações mínimas na configuração do módulo controlador. Cada coletor pode agregar um ou mais sensores, conforme a aplicação, podendo ou não armazenar os dados das grandezas amostradas em memória (exceto o módulo controlador, que obrigatoriamente armazena os dados de todos os demais módulos).

Como forma de integrar vários sensores de molhamento para testes experimentais, foi utilizada uma rede cabeada composta de 5 módulos para aquisição de dados. A Figura 3.13 exemplifica a aplicação, que consiste em microestações de aquisição de dados ( $E_C$  e  $E_1$  a  $E_n$ ,  $n \leq 247$ ) interligadas por meio de um único cabeamento, sendo uma das estações definida como módulo mestre ou Estação Concentradora ( $E_C$ ) responsável por

concentrar estes dados e transmiti-los por meio de comunicação serial para um computador ou, através de um módulo de telefonia móvel (GPRS), para um servidor conectado à Internet. Desta forma, os usuários podem acessar estes dados para análise e tomadas de ações mesmo remotamente.

**Figura 3.13:** Representação de uma rede de sensores aplicada à AP.



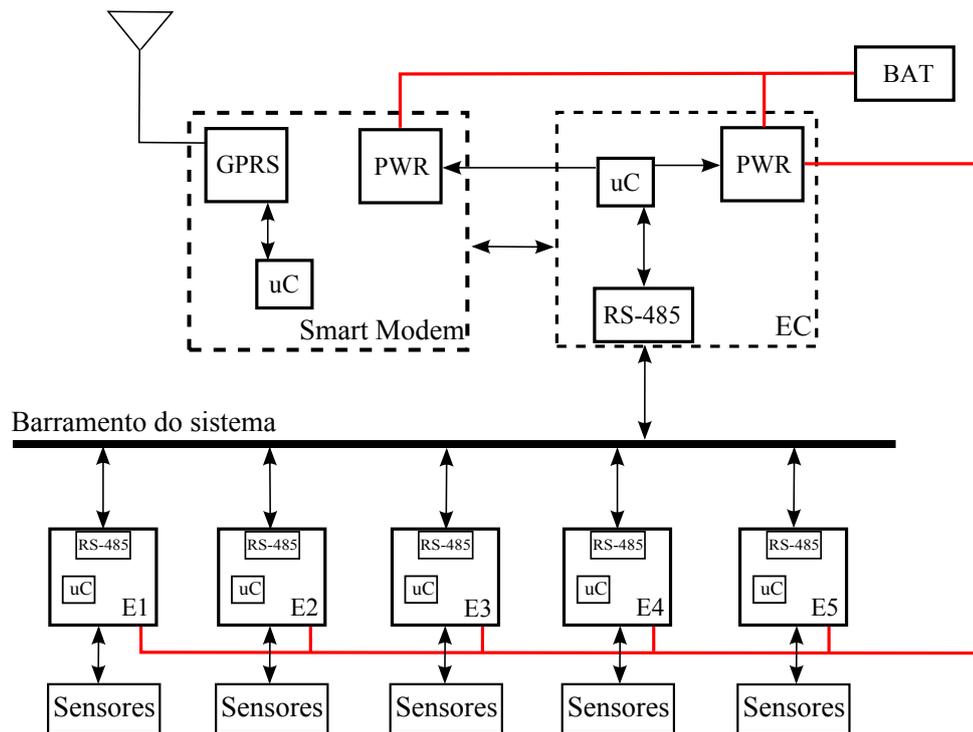
Fonte: Autor.

Embora a rede cabeada remeta à ideia de que a alimentação é obtida da rede elétrica, este sistema permite sua utilização em áreas remotas empregando apenas uma bateria para todos os módulos. A Figura 3.14 ilustra este esquema, onde o consumo é administrado pelo módulo controlador, que desliga totalmente as demais microestações e o *Smart Modem* nos períodos de inatividade (PWR), simplificando o gerenciamento e reduzindo o consumo deste sistema. Assim, junto à  $E_C$  é colocada uma bateria (BAT) com capacidade para alimentar toda a rede. Cada estação escrava ( $E_1$  a  $E_n$ ) pode realizar, sob gerenciamento da  $E_C$ , aquisições de grandezas agrometeorológicas tais como umidade relativa e temperatura do ar, DMF, QMF ou umidade do solo.

### 3.4.2 Módulos da rede

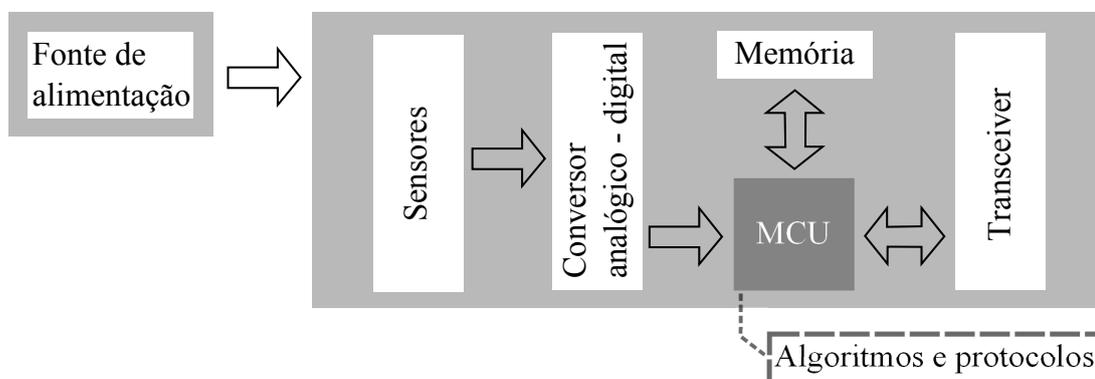
A Figura 3.15 mostra a arquitetura geral de um módulo de aquisição. Cada módulo consiste de um subsistema fornecedor de energia, um subsistema computacional (microprocessador ou microcontrolador), um subsistema sensor (sensores e atuadores), um subsistema de armazenamento (memória) e um subsistema de comunicação que realiza a interface a nível físico.

Figura 3.14: Esquema da rede de sensores proposta.



Fonte: Autor.

Figura 3.15: Arquitetura geral de um módulo de aquisição.



Fonte: Adaptado de Bharathidasan e Ponduru (2002).

### 3.4.2.1 Módulo mestre

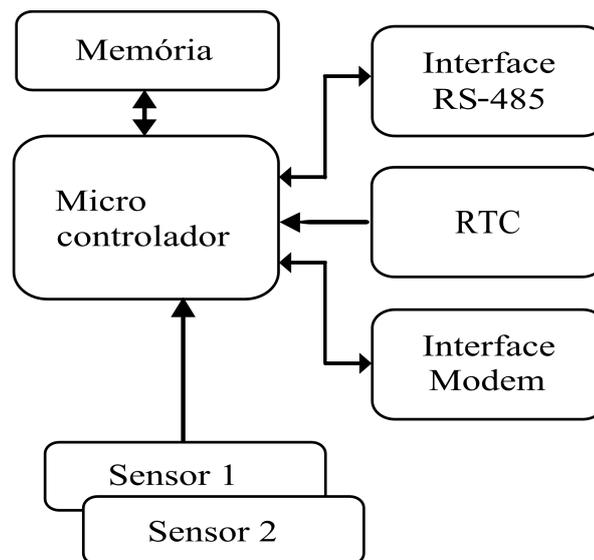
O módulo mestre do diagrama da Figura 3.16, além de concentrar os dados provenientes das demais estações escravas, é responsável também pelo controle do tempo de aquisição, enviando comando de execução de leitura dos sensores através de *broadcast* para os módulos escravos, e também, em períodos pré-definidos, transmitindo os dados armazenados em sua memória por meio de comunicação serial para outro equipamento (*Smart Modem*) acoplado ao módulo Mestre, responsável pela transmissão destes dados

para um servidor remoto através da comunicação GPRS, descrito na Subseção 3.4.2.3. Como módulo concentrador de dados e gerenciador dos demais módulos, no projeto da  $E_C$  foi implementado um microcontrolador com maior capacidade de memórias RAM e ROM, além de possuir periféricos adicionais que permitem expandir suas funcionalidades.

De modo geral, o módulo mestre é constituído dos seguintes componentes:

- Microcontrolador 8 bits HC9S08JM32 da *Freescale*;
- Memória de 1 Mbit com comunicação digital I<sup>2</sup>C ou SPI;
- Relógio de tempo real;
- CI de interface RS-485;
- Componentes diversos.

**Figura 3.16:** Diagrama de blocos do módulo mestre.

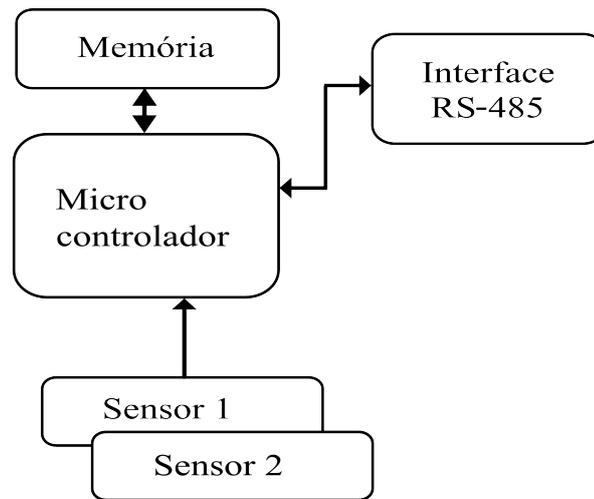


Fonte: Autor.

### 3.4.2.2 Módulo escravo

O diagrama da Figura 3.17 ilustra o módulo escravo. Este diferencia-se pouco do módulo mestre, possuindo alguns componentes a menos, o que simplifica o circuito. Basicamente, sua funcionalidade é realizar operações de conversão dos sensores acoplados a ele, operar a interface de rede Modbus e armazenar as leituras dos sensores na memória externa.

De modo geral, o módulo escravo é constituído dos seguintes componentes:

**Figura 3.17:** Diagrama de blocos do módulo escravo.

Fonte: Autor.

- Microcontrolador 8 bits HC9S08SH8 da *Freescale*;
- Memória de 256 kilobits com comunicação digital I<sup>2</sup>C;
- CI de interface RS-485;
- Componentes diversos.

Comparado ao circuito do módulo mestre, este módulo também possui um microcontrolador mais simples, com menos recursos e memória RAM. Esta escolha deve-se ao custo do microcontrolador HC9S08SH8 frente ao microcontrolador HC9S08JM32, visto que há módulos escravos em maior número, impactando no valor final.

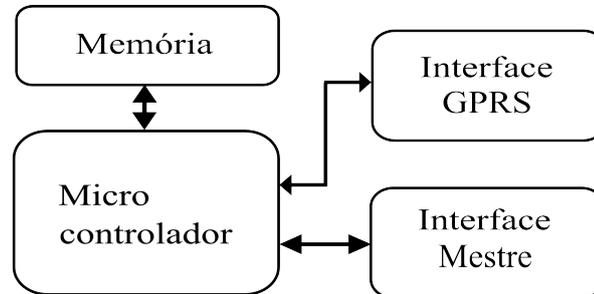
### 3.4.2.3 Módulo de transmissão GPRS

Este módulo, denominado *Smart Modem* e mostrado na Figura 3.18, é responsável por receber os dados do módulo mestre e armazená-los em memória própria, liberando o mestre para armazenamento de novos dados. A partir de então, o *Smart Modem* inicia o processo de transmissão destes dados, estabelecendo conexão com um servidor remoto através do serviço de GPRS. Ao fim da transmissão de todos os dados, o *Smart Modem* sinaliza o término da tarefa ao mestre, que desliga a alimentação do módulo.

Todo o gerenciamento de transmissão dos dados na memória até o recebimento pelo servidor é feita pelo microcontrolador integrado ao módulo, que também contém as configurações do provedor de serviço e endereço do servidor incorporadas no próprio código-

fonte. No estado atual do projeto esta característica é limitante, pois exige do usuário um conhecimento em programação para realizar as configurações necessárias.

**Figura 3.18:** Diagrama de blocos do módulo escravo.



Fonte: Autor.

Este módulo é constituído dos seguintes componentes:

- Microcontrolador 8 bits HC9S08JM32 da *Freescale*;
- Memória de 1 Mbit com comunicação digital I<sup>2</sup>C ou SPI;
- CI de aplicações para telefonia móvel modelo GC864-QUAD V2 da *Telit*;
- CI de interface USB;
- Componentes diversos.

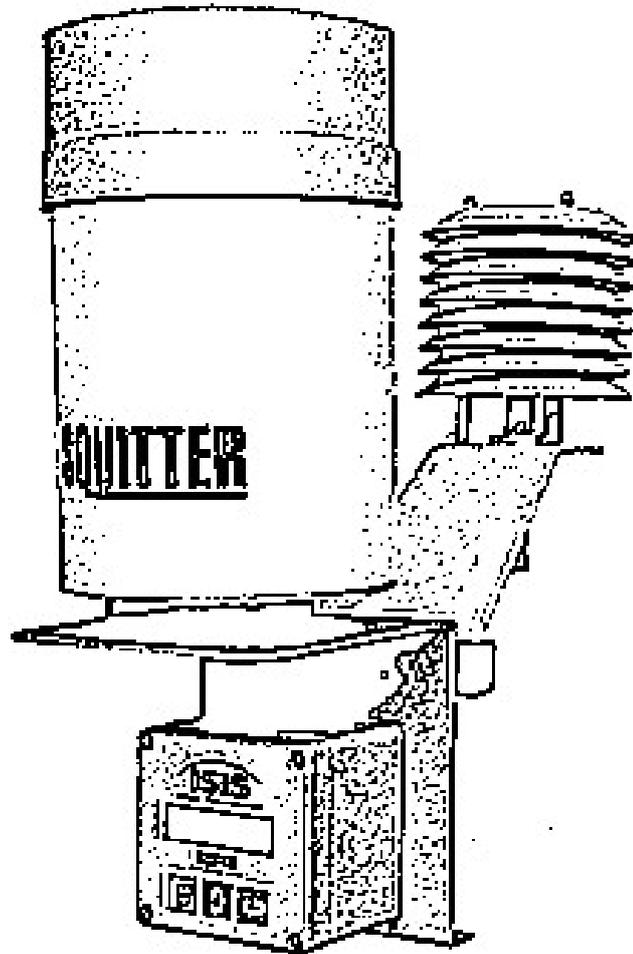
#### 3.4.2.4 Suporte e abrigo para a circuitaria

Tendo em vista que estes módulos ficarão em campo por longos períodos de tempo, submetidos à chuva, poeira, umidade e outros, devem ser acondicionados em compartimentos compatíveis com estas situações adversas. Em virtude do tamanho reduzido dos circuitos, caixas fabricadas em plástico de engenharia, com fator de proteção adequado, são ideais nesta aplicação. Ainda, o projeto de um suporte metálico faz-se necessário para que cada módulo e seus periféricos estejam acoplados num único bloco, facilitando sua montagem, manuseio e transporte. A Figura 3.19 mostra um exemplo de suporte e abrigo para o sistema, que possibilita sua fixação tanto em hastes fixas quanto móveis.

### 3.4.3 Desenvolvimento do *software* do sistema

Esta Seção apresenta as funcionalidades integradas aos módulos. Nestas implementações participam tanto o módulo mestre quanto o módulo escravo, com exceção das funcionalidades de controle, que são inerentes ao módulo mestre.

**Figura 3.19:** Exemplo de suporte e abrigo para o sistema.



Fonte: Adaptado de Squitter (2011).

### Códigos de funções Modbus

Conforme descrição do protocolo Modbus no Apêndice C, existem faixas de códigos de funções preestabelecidos. Observou-se que o protocolo dispõe de algumas funções para leitura de dispositivos, contudo, para atender algumas funcionalidades específicas do projeto, são implementadas funções do tipo *user-defined*. A Tabela 3.3 apresenta estas funcionalidades implementadas e está subdividida em tipo de função, código da função em decimal, código da função em hexadecimal e ações realizadas pelo mestre e pelo escravo para cada função descrita.

As ações de retorno realizadas pelos escravos somente ocorrem quando o comando é direcionado a um módulo escravo específico, ou seja, casos em que o módulo mestre não tenha transmitido um comando de *broadcast*. São implementações simples que auxiliam na utilização da rede de sensores, atendendo principalmente o gerenciamento das aquisições de dados.

**Tabela 3.3:** Códigos de funções implementados no sistema

Função	Código	Hexa	Ações do mestre	Ações do escravo
Limpar memória	65	41	Envia mensagem e aguarda confirmação	Limpa ponteiro da memória e envia mensagem de confirmação
Leitura total	66	42	Envia mensagem e recebe dados	Retorna todos os dados na memória
Leitura parcial	67	43	Envia mensagem com parâmetros e recebe dados	Retorna os dados do intervalo solicitado
Amostrar sensor	101	65	Envia mensagem e aguarda confirmação	Realiza leitura dos sensores e envia mensagem de confirmação
Ler amostra	102	66	Envia mensagem e recebe dados	Retorna a última leitura de sensores realizada

### Código de verificação

Também conforme o Apêndice C, o protocolo Modbus incorpora o CRC em cada mensagem transmitida. Este código de verificação foi implementado seguindo o modelo fornecido na documentação do protocolo. O processo de geração deste código é apresentado no mesmo Apêndice.

### Períodos de aquisição

Como forma de controle dos períodos de aquisição, o sistema permite configurar aquisições em intervalos múltiplos de um segundo. Isto porque o módulo mestre possui um chip RTC que controla este intervalo de forma bem mais exata do que a implementação de um contador no microcontrolador para tal finalidade. Assim qualquer atividade que exija intervalos de segundos, minutos ou horas pode ser facilmente configurado com boa exatidão.

### Velocidade de transmissão

O protocolo Modbus impõe uma velocidade de transmissão (*baud rate*) mínima de 4800 bps. Tendo em vista limitações no processamento dos microcontroladores utilizados<sup>2</sup>, até o momento conseguiu-se atingir uma taxa de transmissão de 9600 bps. Sendo que, a nível de camada física, teoricamente é possível atingir distâncias de até 1200 metros nesta taxa.

### Controle de dispositivos escravos em rede

Para que o módulo mestre possa gerenciar em sua memória os dados de aquisição de

<sup>2</sup>Na transmissão de cada *frame* de dados é calculado o CRC, que por sua vez não pode ultrapassar o intervalo de tempo limite entre cada transmissão (intervalo de silêncio).

cada módulo escravo, uma das configurações iniciais da rede pelo usuário<sup>3</sup> é, obrigatoriamente, informar ao módulo mestre a quantidade de dispositivos que está conectada na rede. Assim, torna-se possível para o concentrador gerenciar a sequência de aquisições ou coleta dos dados de um período vindas de cada escravo.

### Controle de sequência de aquisições

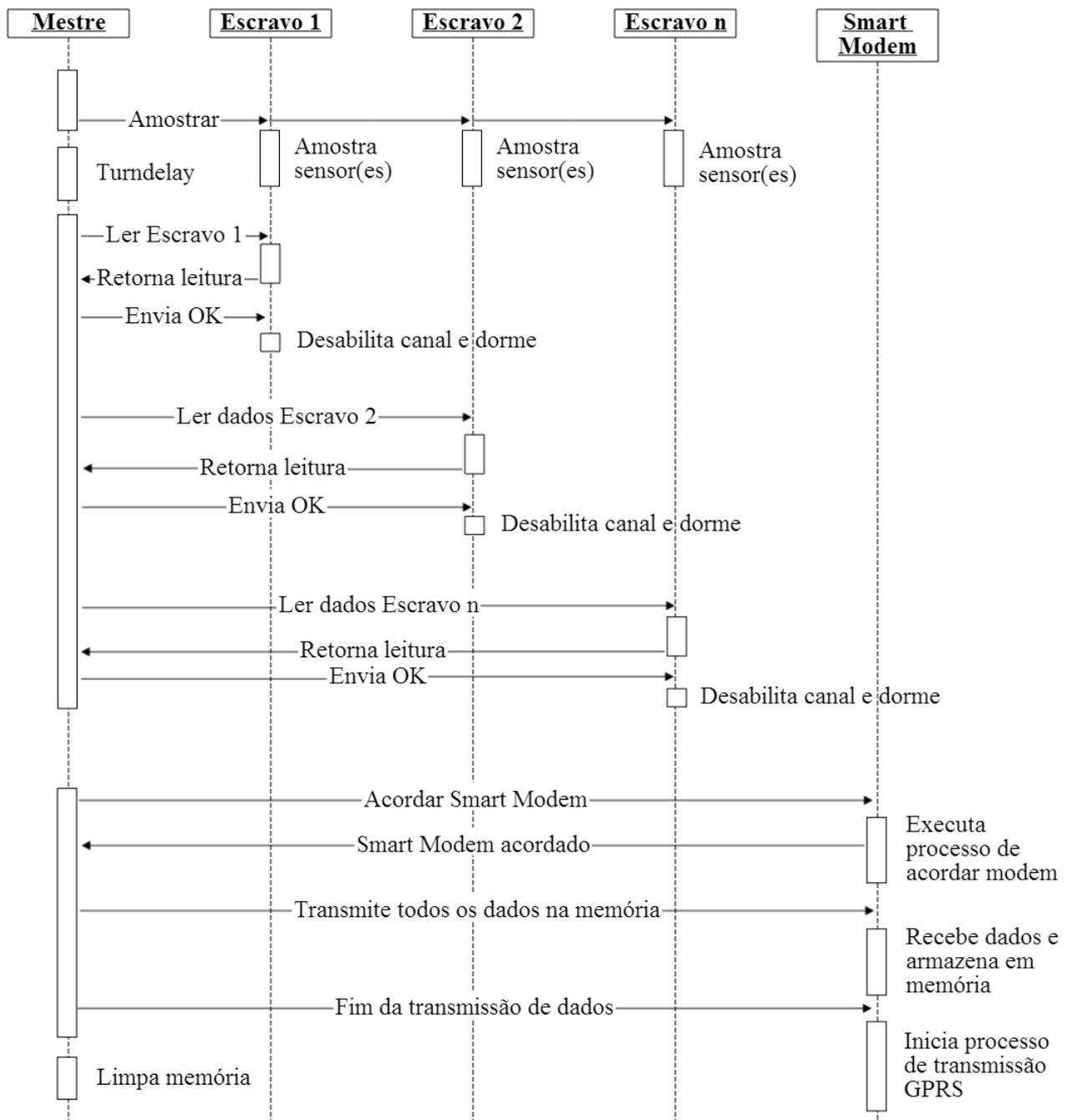
Como a análise dos dados depende do histórico das amostras e o gerenciamento de tempo e controle de amostragem está atribuído somente ao módulo mestre, faz-se necessário um controle sequencial para casos em que um módulo escravo qualquer se desconecte da rede ou, por algum motivo, perde uma amostragem. Isto porque o módulo escravo não registra o horário da aquisição e nem seu sequenciamento, somente as amostras lidas. Por outro lado, a incorporação de uma função no módulo mestre que vincule cada amostra a cada módulo da rede é pouco interessante, visto que a cada novo dado lido são atribuídas informações adicionais que ocupam um espaço precioso na memória do dispositivo. Contudo, para poupar espaço é necessário segmentar os dados de forma ordenada e sem falhas, de maneira que foi implementado um algoritmo que armazena os dados lidos de forma sequencial e organizada por ordem de identificação dos módulos escravos.

Então, para a coleta destes dados é implementada uma função onde, após o módulo mestre enviar um comando *broadcast* para leitura de sensores, ele faz também uma verificação no momento em que solicita a leitura realizada por cada módulo escravo. Caso não haja resposta de um determinado módulo escravo, o mestre realiza nova tentativa. Se não houver resposta, o mestre então preenche a área de memória correspondente a este módulo escravo que falhou com zeros, garantindo que o sequenciamento dos dados não seja quebrado e comprometa todo o conjunto de leituras do sistema. O diagrama na Figura 3.20 exemplifica o gerenciamento de coleta de dados.

---

<sup>3</sup>Esta configuração é feita enviando comandos de parametrização através de um programa de comunicação via terminal entre o equipamento e um computador, como o X-CTU, da Digi©.

Figura 3.20: Diagrama de seqüência do sistema de coleta de dados.



Fonte: Autor.

### 3.4.4 Sensor de umidade e temperatura

Dentre as grandezas que envolvem a medição de forma indireta da duração do molhamento foliar, a temperatura e a umidade relativa do ar são os principais parâmetros utilizados. Isto porque, além de serem fatores importantes na estimativa do desenvol-

vimento de doenças na planta, possuem um custo acessível, como discutido na Seção 2.2.1.

Em vista da importância destas grandezas meteorológicas para a DMF, é integrado um dispositivo comercial de temperatura e umidade relativa do ar, de modo a complementar os dados obtidos no SMFc. Dentre as características que este sensor deve atender, destacam-se as seguintes:

- Leitura de umidade relativa de 0 a 100 %
- Conversor interno da grandeza lida
- Saída digital
- Fácil montagem em PCI

Com base nestes critérios, a Tabela 3.4 apresenta 6 sensores eleitos dentre diversos dispositivos comumente disponíveis no mercado *online* de componentes. Nesta pesquisa utilizou-se como critério principal a interface de comunicação I<sup>2</sup>C, que possibilita a substituição de modelo do componente com impactos mínimos no projeto.

**Tabela 3.4:** Tabela comparativa de sensores de temperatura e umidade

Dispositivo	Fabricante	Intervalo RH (%)	Exatidão RH (%)	Tipo Saída	Filtro Proteção	Preço <sup>1</sup> (US\$)
Si7005-B-FMR	Silicon Labs	0 - 100	± 4,5	digital	não	8,24
Si7005-B-FMR1	Silicon Labs	0 - 100	± 4,5	digital	sim	9,05
HIH6130-021-001	Honeywell	0 - 100	± 4	digital	não	15,78
HIH6131-021-001	Honeywell	0 - 100	± 4	digital	sim	19,36
SHT11	Sensirion	0 - 100	± 3	digital	não	21,83
SHT15	Sensirion	0 - 100	± 2	digital	não	29,44

Pela tabela comparativa, verifica-se que apesar do SHT15 apresentar a melhor exatidão,  $\pm 2\%$ , é o dispositivo mais caro. De fato, quanto melhor a exatidão do sensor, maior será o seu custo. Porém, considerando que  $\pm 4,5\%$  de exatidão na leitura da umidade relativa não é um fator impactante para validar o sistema junto com o sensor proposto, elegeu-se o modelo Si7005-B-FMR1 como melhor opção custo-benefício. O Si7005, apresentado sem escala na Figura 3.21, fornece medidas de temperatura e umidade relativa (inclusive com compensação térmica). Abaixo são elencadas algumas características deste sensor:

<sup>1</sup>Valores sem impostos. Cotação realizada em dezembro de 2013.

- Leitura de umidade relativa com erro de 0,05 % na precisão;
- Leitura de temperatura com exatidão típica de  $\pm 0,5$  %;
- Interface I<sup>2</sup>C;
- Calibração de fábrica;
- Tensão de alimentação de 2,1 a 3,6 V;
- Baixo consumo de energia.

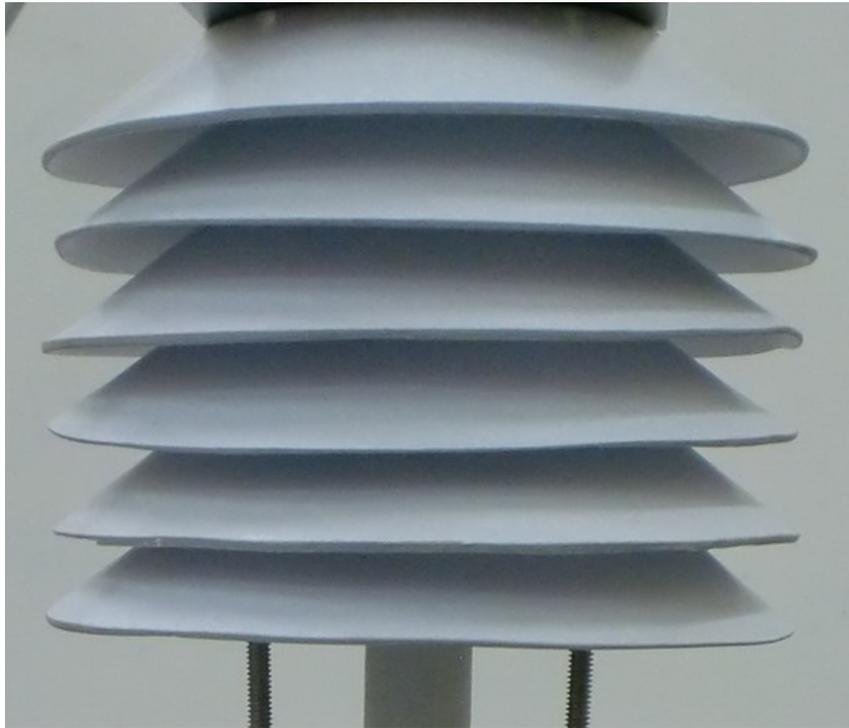
**Figura 3.21:** Sensor de umidade e temperatura da Silicon Labs®.



Fonte: Silicon Labs (2012).

Sua interface digital facilita a implementação, visto que dispensa o desenvolvimento de circuitos excitadores e calibrações necessárias na construção de um sensor, já inclusas no circuito integrado em sua fabricação, característica encontrada em todos os sensores listados na Tabela 3.4. Ainda, para a leitura dos dados, o fabricante já fornece os polinômios necessários para a conversão, sendo esta a única fase que ocupa processamento do microcontrolador durante a aquisição de uma leitura de umidade e temperatura.

Sua área de contato com o meio possui uma membrana hidrofóbica e lipofóbica que protege o elemento sensor do dispositivo de partículas contaminantes, dispensando esforços na solução de proteções deste tipo no projeto. Como o sensor ficará exposto no campo, também foi projetado um abrigo para proteger o sensor de intempéries e incidência solar direta. Este abrigo, mostrado na Figura 3.22, emprega a técnica da Janela de Stevenson para instrumentos meteorológicos, adaptada e utilizada no trabalho de Guedes (2014).

**Figura 3.22:** Abrigo para o sensor de umidade.

Fonte: Autor.

## 3.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foram abordados os métodos para construção do sensor de molhamento proposto e para medição de água no solo, sendo descritos modelos confeccionados para testes. Também foram discutidos os elementos que compõem a rede de sensores proposta, sendo apresentados aspectos estruturais de *hardware* e *software* para esta rede. Por fim, foram analisados alguns sensores de umidade relativa e temperatura do ar no intuito de se eleger um sensor para ser integrado a este sistema, sendo escolhido aquele que apresenta o melhor custo-benefício para este projeto.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos nas simulações para modelamento do sensor desenhado para testes, os resultados obtidos na validação deste sensor e também os resultados obtidos nos testes em campo com o sensor definitivo. Em seguida são apresentados os resultados de medição de água no solo e os equipamentos construídos para a rede de sensores.

## 4 Resultados Experimentais

O início deste capítulo apresenta um sensor experimental desenhado para validar os conceitos discutidos na Seção 3.1. Com base nestas validações, realizaram-se testes em campo com um novo desenho para o SMFc, juntamente com um sensor comercial de temperatura e umidade. A funcionalidade do sensor como detector de teor de água no solo também foi verificada, sendo empregadas amostras de solo com diferentes teores de umidade, preparadas através de procedimentos mostrados na Seção 4.3. As últimas Seções apresentam os resultados alcançados com a rede com fios proposta e os dispositivos construídos.

### 4.1 Validação das Simulações

Conforme discutido na Seção 3.2, aqui são apresentados os resultados obtidos a partir do sensor projetado para validação das simulações. Na Figura 4.1 é apresentado o sensor construído para testes, já pintado com esmalte sintético para proteção. Para garantir a semelhança das simulações com este experimento, todas as características construtivas do sensor: substrato FR-4, aplicação de máscara de solda, entre outras, apresentadas na Seção 3.1, foram mantidas.

Nos testes, o sensor foi acoplado ao circuito da Figura 4.1 e  $T_{th}$  (Seção 3.1.5) foi medido com auxílio do temporizador interno (de 16 bits) do microcontrolador MC9S08SH8 (da Freescale). Com o sensor completamente seco, foi obtida a largura de pulso mínima de  $V_S(t)$ , que corresponde a capacitância mínima do sensor. De forma semelhante, com o sensor completamente molhado,  $T_{th}$  que corresponde a capacitância máxima foi medido. A partir destas situações, foi obtida a faixa dinâmica do sensor como sendo igual a 1713,23  $\mu s$ . Por convenção, na apresentação dos resultados dos testes, a resposta do sensor é sempre uma porcentagem desta faixa dinâmica.

O primeiro teste realizado foi para avaliar a repetibilidade do sensor. Para isto, uma gota d'água de 0,5 ml foi adicionada a superfície sensível do sensor com o auxílio de uma

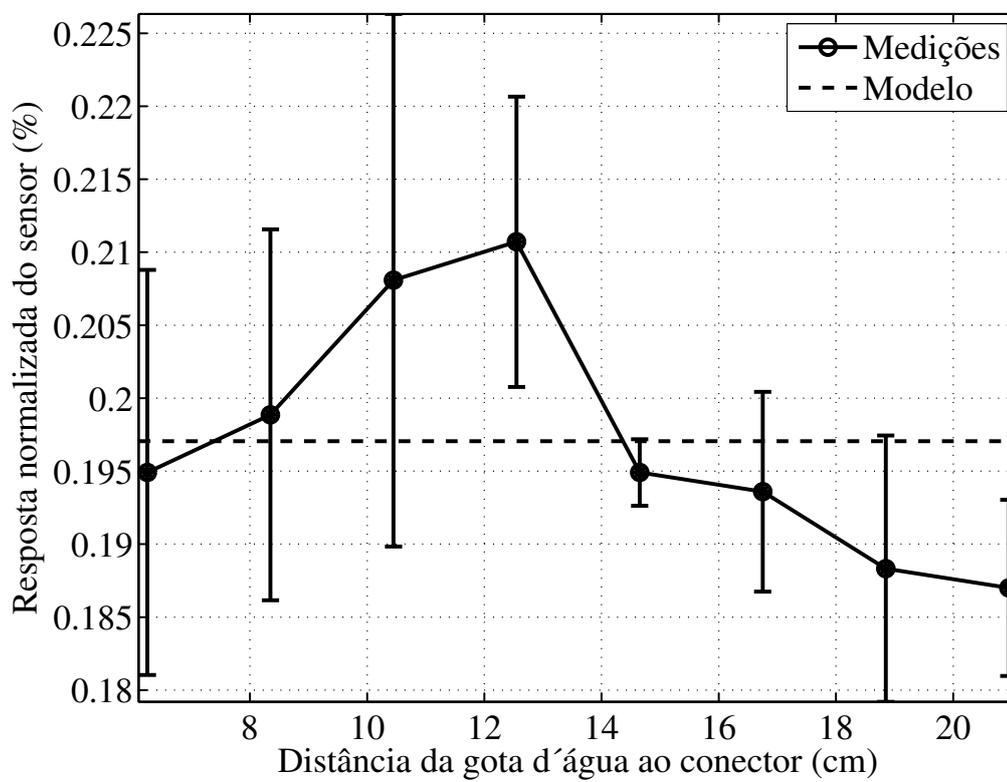
**Figura 4.1:** Sensor capacitivo fabricado para testes de validação.

Fonte: Autor.

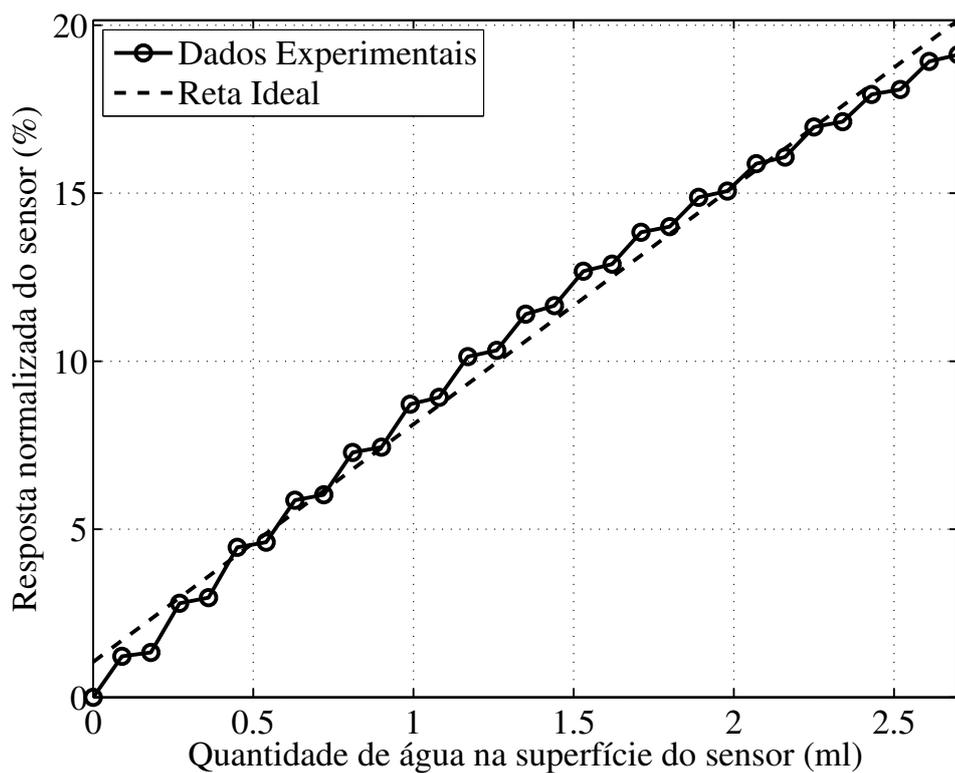
pipeta graduada de 0,5 ml e com resolução de  $\pm 0,01$  ml. Em seguida, a largura de pulso correspondente foi medida. O teste foi repetido por oito vezes e o resultado apresentado na Figura 4.2, onde se observa que uma gota de 0,5 ml de água provoca uma variação de 0,197 % da faixa dinâmica total do sensor, com uma variância de apenas  $72,8 \times 10^{-6}$  %.

Para analisar experimentalmente a variação da saída do sensor com a quantidade de água em sua superfície, um total de 30 gotas d'água, de 0,09 ml cada, foram acrescentadas gradativamente. A primeira gota foi depositada completamente sobre uma única trilha do sensor. A gota subsequente foi posicionada entre duas trilhas consecutivas, em contato com estas trilhas e a lacuna que as separa. Este procedimento foi adotado sucessivamente até que as 30 gotas estivessem posicionadas e o sensor preenchido. O resultado é apresentado na Figura 4.3. Observa-se que, para uma variação de 2,7 ml de água, a capacitância do sensor variou quase 20%. Além disto, ajustando-se os dados experimentais ao modelo de uma reta, foi obtido um  $R^2 = 0,99$ . Este é um ajuste melhor do que o obtido por simulação (Seção 3.1.2). Isto se deve ao fato que, na simulação, ao invés de uma única gota, a água preenchia toda a trilha do sensor. Assim, os degraus do gráfico da Figura 3.3 são muito mais acentuados.

**Figura 4.2:** Variação da capacitância em função da posição de uma única gota de água sobre o sensor.

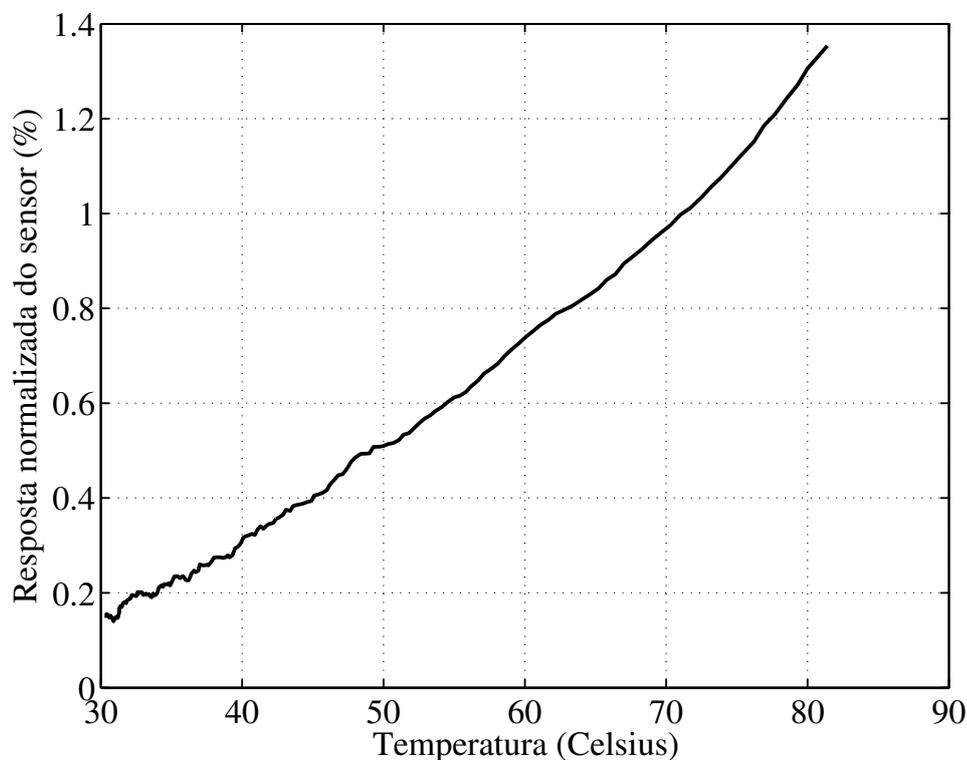


**Figura 4.3:** Variação da capacitância do sensor em função da quantidade de água em sua superfície.



Para avaliar experimentalmente a variação do sensor com a temperatura, o mesmo foi inserido em uma estufa. Em seguida,  $T_{th}$  foi medido enquanto a temperatura da estufa variou de 82 a 30 °C. Este experimento durou aproximadamente três horas. O resultado é apresentado na Figura 4.4, cuja análise permite observar que, para uma variação de temperatura de 52 °C, a capacitância do sensor variou apenas 1,4 %. Esta variação é menor que a obtida através de simulação, mas isto é porque, como já discutido na Seção 3.1.3, espera-se que tal variação seja maior quando o sensor estiver molhado, pois a constante dielétrica da água é mais dependente da temperatura.

**Figura 4.4:** Variação da capacitância em função da temperatura do sensor.



## 4.2 Testes em campo

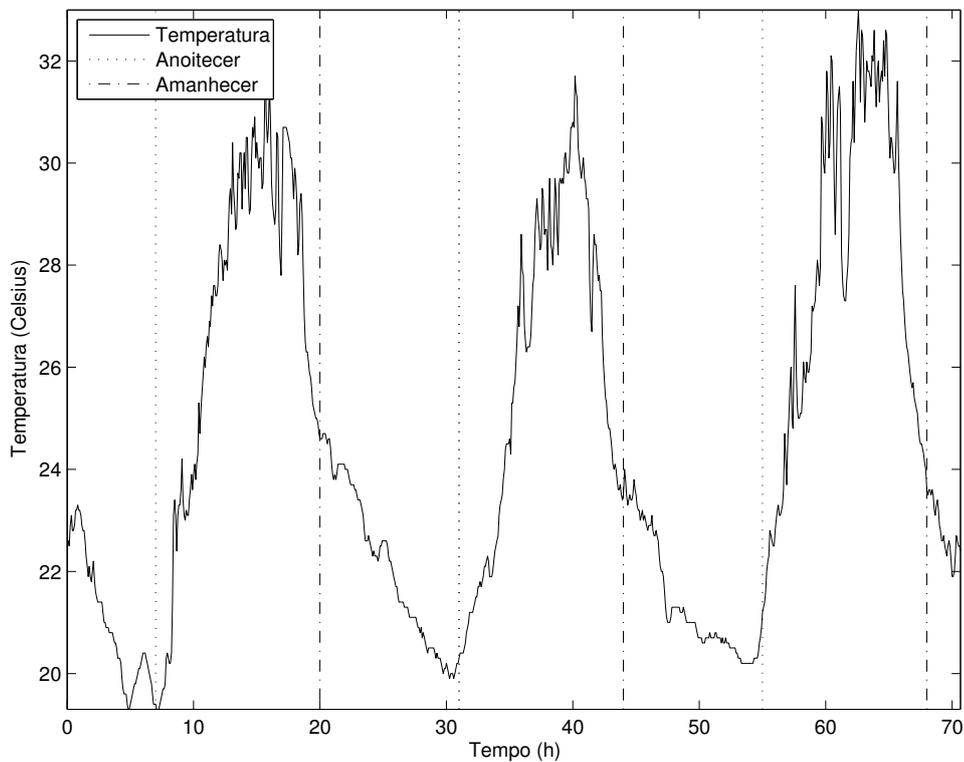
O sensor de molhamento proposto também foi testado em campo. Para isso, foi acoplado ao módulo de aquisição de dados um sensor de umidade<sup>1</sup> acondicionado em um abrigo meteorológico (GUEDES, 2014). O módulo e o abrigo foram instalados no campo, onde permaneceram por aproximadamente 70 horas.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, a temperatura e a umidade relativa registradas pelo módulo de aquisição de dados, enquanto que o molhamento foliar medido

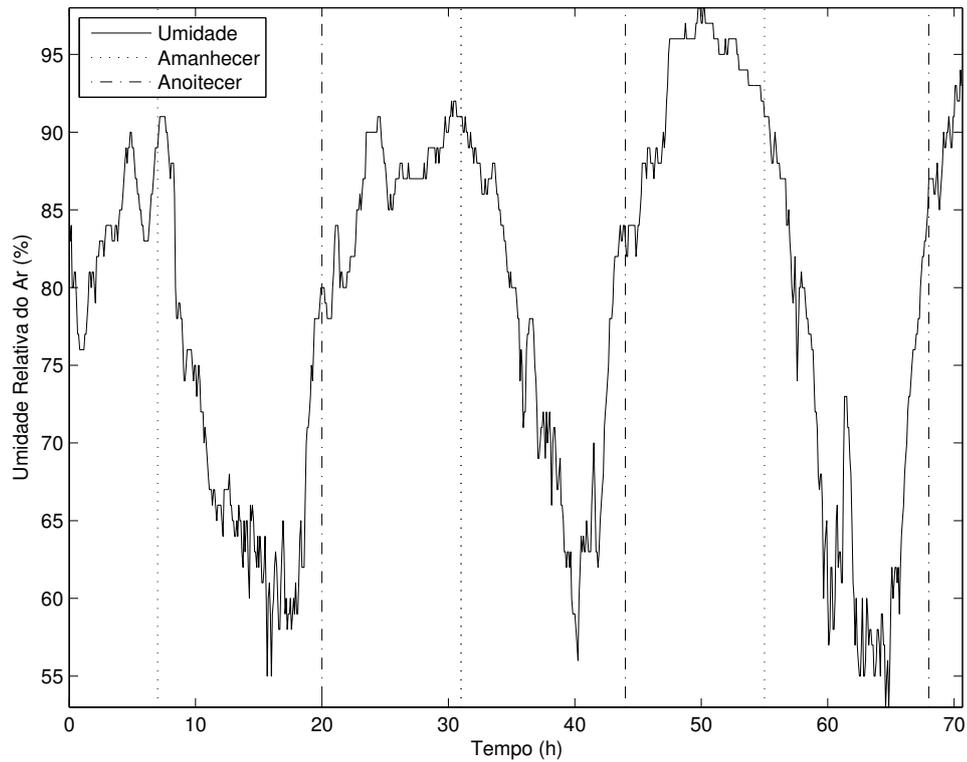
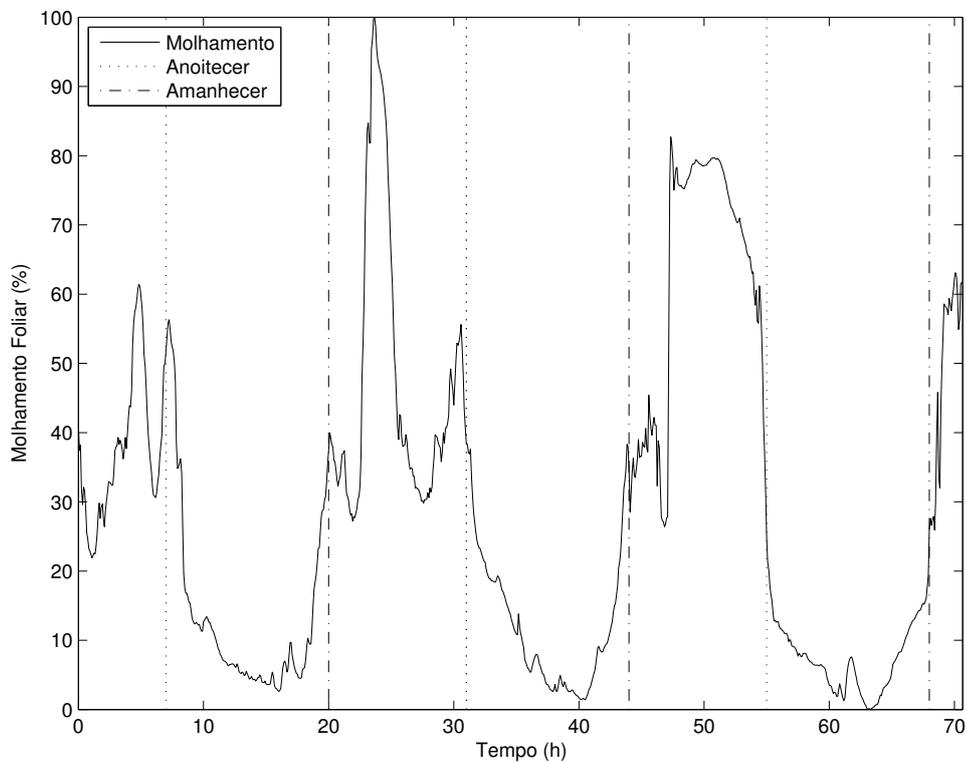
<sup>1</sup>No caso, o modelo SHT71 da fabricante Sensirion, que mede umidade relativa e temperatura com exatidão de 3,5% e 0,5%, respectivamente.

pelo sensor proposto é apresentado na Figura 4.7. Nas Figuras 4.5 e 4.6 observa-se a tendência de evolução inversa entre a temperatura e a umidade relativa. Este padrão de variação diária da umidade relativa está relacionado com o fato do volume de uma massa de ar ser diretamente proporcional a sua temperatura. Portanto, o volume de ar contrai/expande com a variação da temperatura, impondo limites à quantidade de vapor d'água que pode ser retida por ele (ETWS, 2010). Nas horas mais frias do dia, o volume de ar encontrava-se contraído e a quantidade de vapor d'água existente na atmosfera era suficiente para fazer com que a umidade relativa tendesse a saturação (100%). Ao contrário, nas horas mais quentes do dia, com o volume expandido, a umidade relativa apresentou os menores valores.

**Figura 4.5:** Gráfico da temperatura *versus* tempo nos testes em campo.



A porcentagem de molhamento foliar está diretamente relacionada com a umidade relativa, uma vez que esta é proveniente da condensação do vapor d'água da atmosfera. Sendo assim, é esperado que o gráfico do molhamento foliar e da umidade relativa tenham tendências semelhantes. Isto pode ser comprovado comparando as Figuras 4.6 e 4.7. Na Figura 4.7, observa-se que o sensor registrou, de maneira progressiva e gradual, a porcentagem de molhamento e de secamento foliar e não somente registrou se a folha estava ou não molhada, como a maioria dos sensores existentes no mercado.

**Figura 4.6:** Gráfico da umidade *versus* tempo nos testes em campo.**Figura 4.7:** Gráfico do molhamento foliar *versus* tempo nos testes em campo.

Em particular, mesmo nas horas mais quentes do dia, com baixa umidade relativa, o

sensor acusou uma pequena porcentagem de molhamento. Esta informação é de grande importância para o estudo da epidemiologia de doenças em plantas, pois acreditava-se que somente acima de um determinado valor, normalmente 90% de umidade relativa, poderia ocorrer molhamento foliar. Portanto, com o uso deste sensor, determinar-se-á com maior exatidão a porcentagem de molhamento da folha e, conseqüentemente, as condições favoráveis para desenvolvimento epidemiológico de determinada doença. Além de definir qual a porcentagem mínima de molhamento foliar necessária para os esporos iniciarem o processo germinativo.

### 4.3 Medição da água no solo

Nesta seção, examina-se o comportamento do sensor quando ele é utilizado para quantificar a concentração<sup>2</sup> de água presente no solo. Para isto foi utilizado o porta amostras de PVC e amostras de solo padronizadas descritas anteriormente.

Para o experimento foram preparados sete corpos de prova com diferentes teores de umidade, sendo que as concentrações de água teórica e real destes sete corpos de prova são apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Concentração de água no solo desejada ( $C_t$ ) e real ( $C_p$ ), medida pelo método gravimétrico.

$C_t$ (%)	10	15	20	25	30	35	40
$C_p$ (%)	8,96	13,24	18,02	22,90	27,61	32,44	37,14

Os corpos de prova utilizados neste experimento foram preparados a partir de uma amostra de 21 kg de solo deformado, coletado a uma profundidade de 2 m, de um de poço existente no campo experimental de Engenharia Geotécnica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), na cidade de Londrina (Brasil). O solo desta região é basicamente constituído de argila siltosa, vermelha escura, laterizada, com 55% de argila e 23% de silte em sua composição granulométrica, com massa específica dos sólidos de 3,0 g/cm<sup>3</sup> e limites de liquidez e índice de plasticidade de, aproximadamente, 52% e 13,5%, respectivamente (RODRIGUEZ et al., 2011).

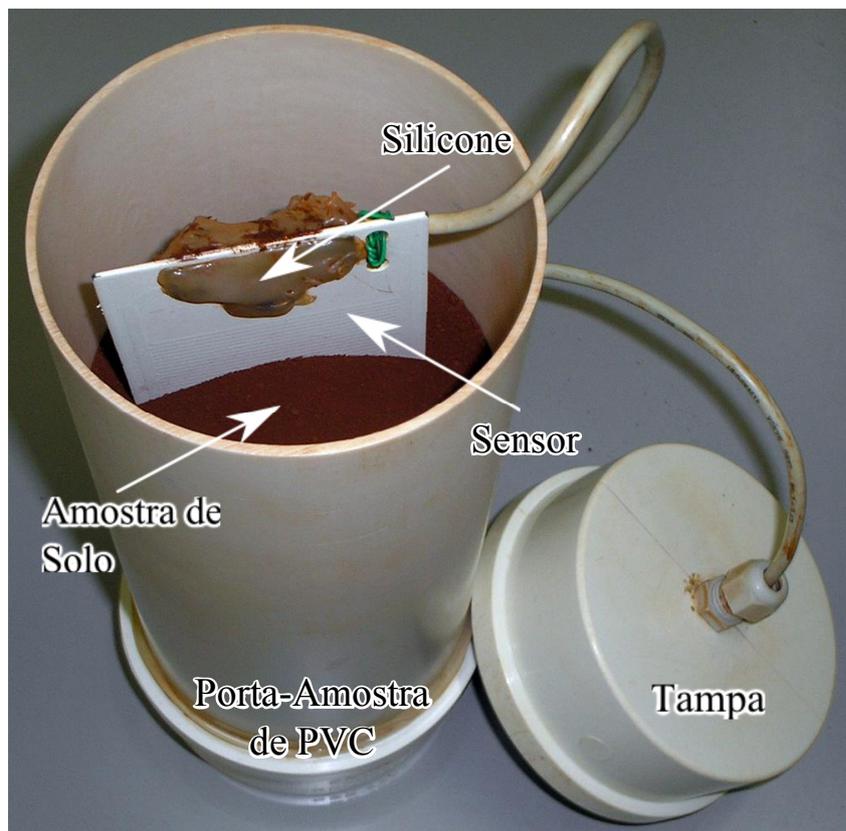
Após a coleta da amostra de solo, seguindo recomendação da ISO 23909/2008 (ISO, 2008) sobre operações preliminares para preparo de amostras para ensaio de caracterização com secagem prévia, foram obtidas sete parcelas com cerca de 3 kg cada uma. Em seguida,

<sup>2</sup>Aqui, considerou-se esta concentração como sendo a fração de água livre em uma determinada amostra de solo.

foi determinada, de acordo com a mesma norma, a concentração de água de cada parcela e calculada a massa de água a ser adicionada para obtenção de sete corpos de prova com diferentes umidades. Cada um destes foi preparado para atingir uma determinada concentração teórica de água ( $C_t$ ), no entanto, a concentração real de água ( $C_p$ ) só pode ser determinada pelo método gravimétrico (ISO, 2004), devido a sua rápida evaporação. Para realização do teste gravimétrico, foram utilizadas uma balança de precisão e uma estufa com temperatura controlada em 105 °C.

Com as amostras de solo devidamente classificadas, iniciou-se os ensaios utilizando-se o porta amostras, o corpo de prova e o sensor. Este conjunto é ilustrado na Figura 4.8, onde se observa o sensor com seus terminais protegidos por silicone e em contato com o solo. Tudo isto encontra-se dentro de um porta amostra de PVC com tampa.

**Figura 4.8:** Solo e sensor posicionados no porta amostras para realização dos testes.

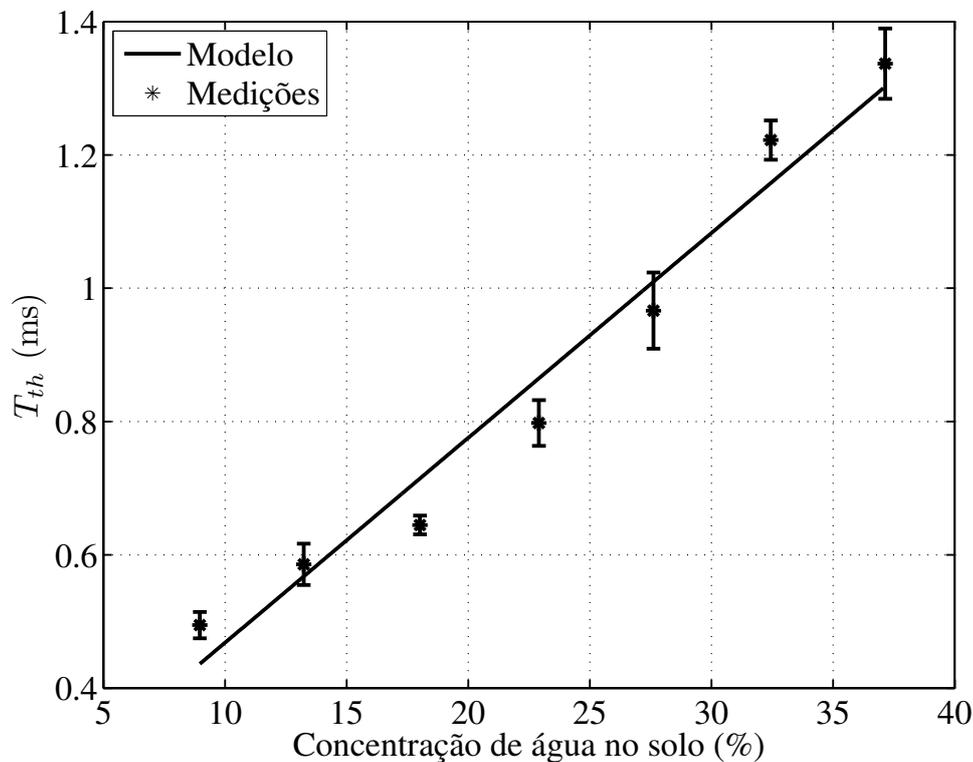


Durante cada ensaio, o sensor e a amostra de solo permaneceram dentro do porta amostras por 10 minutos. Enquanto isto, a capacitância do sensor foi inferida a cada 20 segundos medindo-se a largura de pulso  $T_{th}$ . Após 10 minutos, considerou-se  $T_{th}$  como sendo a média de 30 valores medidos.

Devido a complexidade do solo, a capacitância do sensor pode também sofrer influência de outros fatores (lacunas, gases, etc), além da concentração de água neste dielétrico. Para

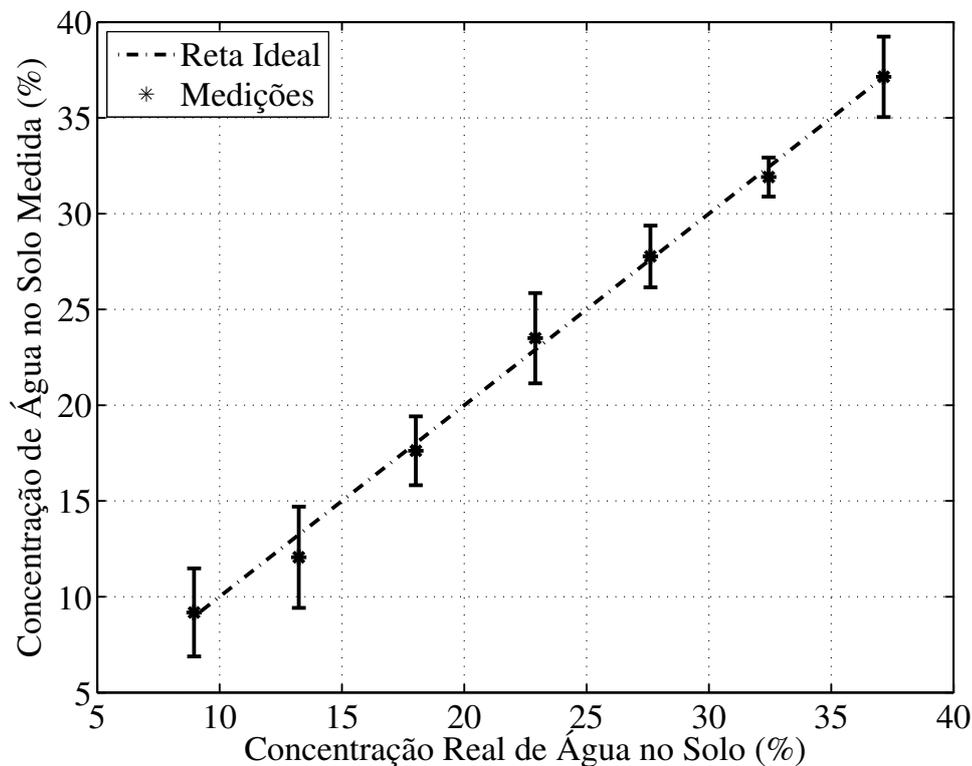
reduzir a influência destes outros fatores no experimento, para cada um dos valores de concentração  $C_p$  de água no solo, conforme a Tabela 4.1, realizou-se o mesmo ensaio três vezes, mas com amostras de solo diferentes. Além disto, do conjunto total de 21 ensaios, 3 valores atípicos da amostra (*outliers*) foram eliminados através da técnica de z-scores. O resultado é apresentado na Figura 4.9. Analisando o gráfico desta figura, observa-se que, quanto maior o valor de  $C_p$ , maior é a variância da capacitância de um ensaio para o outro. Contudo, um solo com concentração de água acima de 25 % já é bastante encharcado (KIRKHAM, 2004), podendo ser considerado como saturado para muitas aplicações. Além disto, os demais 18 valores de amostra do experimento ajustam-se ao modelo de uma reta com  $R^2 = 0,94$ , como ilustra a Figura 4.9.

**Figura 4.9:** Concentração de água no solo *versus*  $T_{th}$ .



Com os 18 valores obtidos do experimento, o sensor foi calibrado. Em seguida, a concentração de água de outras 21 amostras (três para cada valor da Tabela 4.1) foi medida com o sensor proposto. O valor medido pelo sensor e o valor considerado real são apresentados na Figura 4.10. As medições feitas com o sensor ajustam-se ao modelo ideal com  $R^2 = 0,94$  e erro médio de  $\pm 3,5\%$ . Portanto, através destes resultados, verifica-se que a técnica demonstra-se bastante promissora como ferramenta de apoio ao monitoramento de irrigação, por exemplo.

**Figura 4.10:** Concentração de água no solo obtida pelo método gravimétrico *versus* a obtida pelo sensor proposto já calibrado.

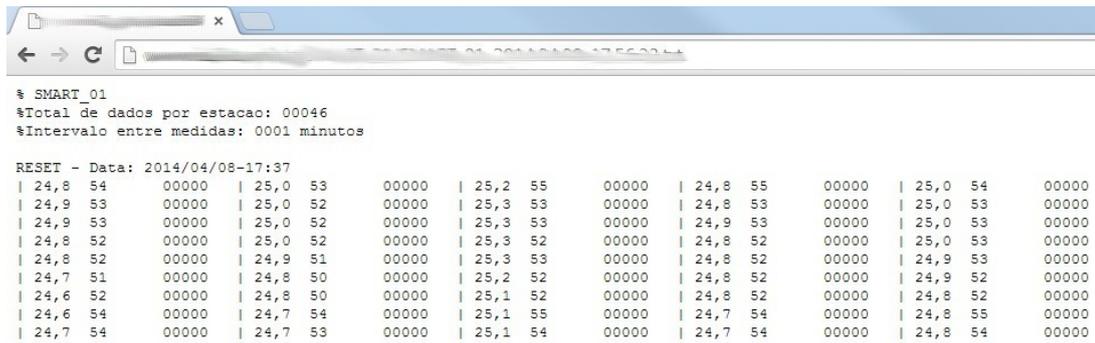


## 4.4 Implementação da Rede

Testes com os módulos construídos também foram realizados para verificar o seu funcionamento. Assim, foram utilizados 5 módulos escravos e um módulo mestre com o módulo de telefonia móvel acoplado. Cada módulo escravo está ligado a um sensor de temperatura e umidade relativa do ar e um sensor de molhamento.

O sistema foi configurado para fazer aquisições de dados a cada 1 minuto, de maneira que no horário de aquisição o módulo mestre aciona a alimentação dos escravos e emite comando em *broadcast* para iniciar aquisição. A seguir, o mestre inicia a requisição destes dados de cada estação escrava, individualmente, armazenando em sua memória. Ao término deste processo de leitura de dados com todos os módulos escravos, o mestre suspende a alimentação da rede novamente. Este controle foi implementado de forma bem simples, utilizando-se poucos componentes, sendo apresentado na Seção 4.5.5.

O sistema também foi configurado para realizar uma transmissão GPRS a cada 10 minutos. Assim, na Figura 4.11 pode ser visualizada a recepção da primeira parte dos dados no servidor realizada com sucesso.

**Figura 4.11:** Visualização parcial dos dados transmitidos para o servidor.


```

% SMART_01
%Total de dados por estacao: 00046
%Intervalo entre medidas: 0001 minutos

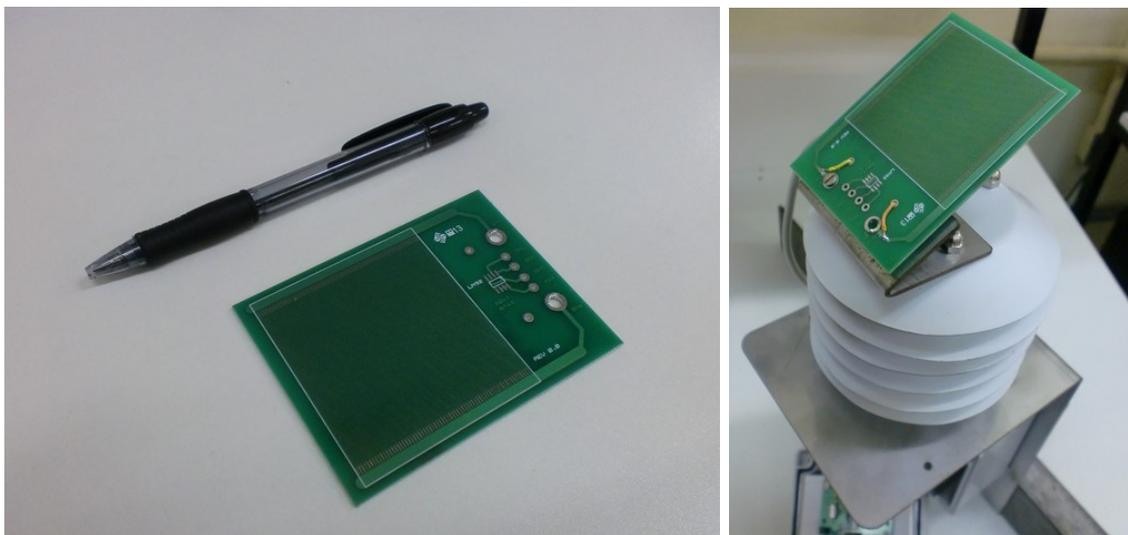
RESET - Data: 2014/04/08-17:37
| 24,8 54 00000 | 25,0 53 00000 | 25,2 55 00000 | 24,8 55 00000 | 25,0 54 00000
| 24,9 53 00000 | 25,0 52 00000 | 25,3 53 00000 | 24,8 53 00000 | 25,0 53 00000
| 24,9 53 00000 | 25,0 52 00000 | 25,3 53 00000 | 24,9 53 00000 | 25,0 53 00000
| 24,8 52 00000 | 25,0 52 00000 | 25,3 52 00000 | 24,8 52 00000 | 25,0 53 00000
| 24,8 52 00000 | 24,9 51 00000 | 25,3 53 00000 | 24,8 52 00000 | 24,9 53 00000
| 24,7 51 00000 | 24,8 50 00000 | 25,2 52 00000 | 24,8 52 00000 | 24,9 52 00000
| 24,6 52 00000 | 24,8 50 00000 | 25,1 52 00000 | 24,8 52 00000 | 24,8 52 00000
| 24,6 54 00000 | 24,7 54 00000 | 25,1 55 00000 | 24,7 54 00000 | 24,8 55 00000
| 24,7 54 00000 | 24,7 53 00000 | 25,1 54 00000 | 24,7 54 00000 | 24,8 54 00000

```

## 4.5 Dispositivos construídos

### 4.5.1 Sensor de Molhamento Foliar Capacitivo

Com os resultados animadores dos testes obtidos na Seção 4.1, um novo sensor foi construído, sendo apresentado na Figura 4.12(a). A Figura 4.12(b) apresenta o SMFc, montado em conjunto com o abrigo para o sensor de umidade na estrutura do módulo Escravo, que será apresentado mais adiante.

**Figura 4.12:** SMFc construído.

(a)

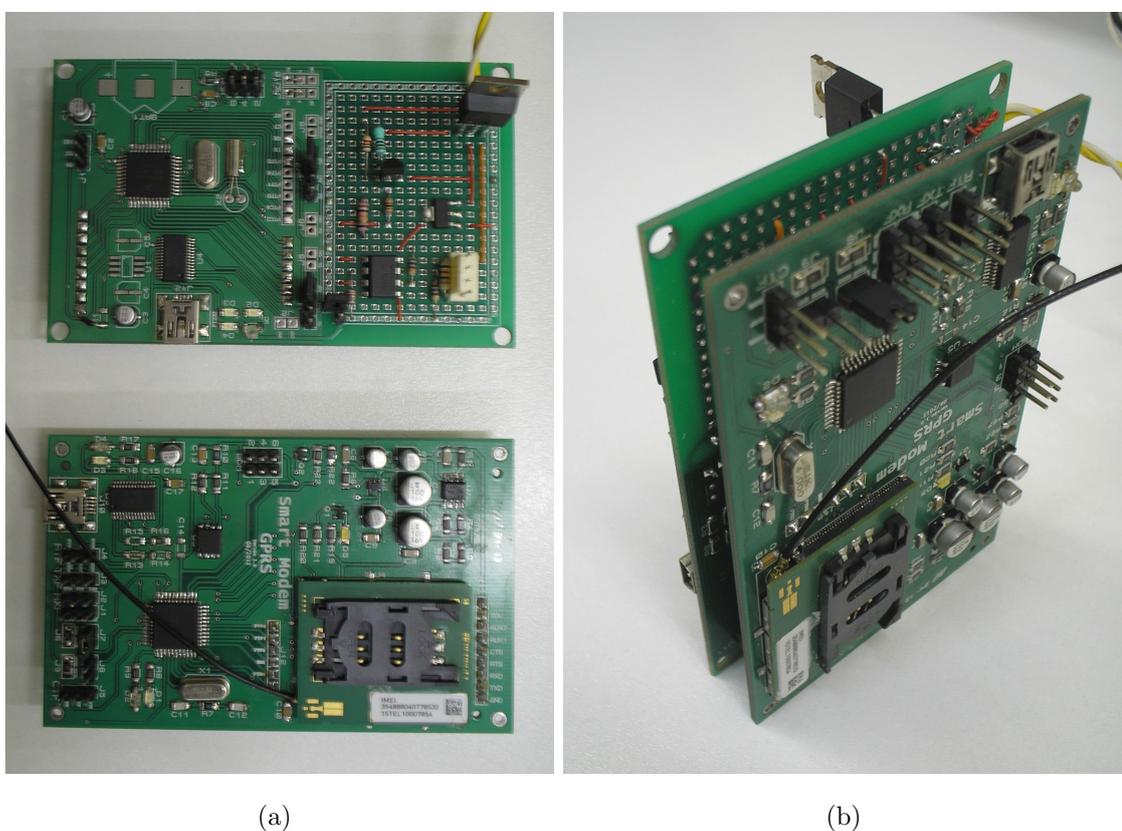
(b)

Fonte: Autor.

### 4.5.2 Módulo Mestre e Módulo GPRS

Na Figura 4.13(a) são apresentadas as PCIs dos Módulos Mestre e Modem GPRS, respectivamente, parte superior e inferior da figura, utilizadas nos testes de validação da rede. Estas placas foram projetadas de modo a se integrarem de maneira modular, facilitando a montagem e futuras alterações ou implementações de *hardware*. São interligadas através de duas barras de pinos, proporcionando uma conexão firme e direta, dispensando o uso de fios e soldagens. Na Figura 4.13(b) são mostradas as placas dos Módulos Mestre e GPRS já encaixadas.

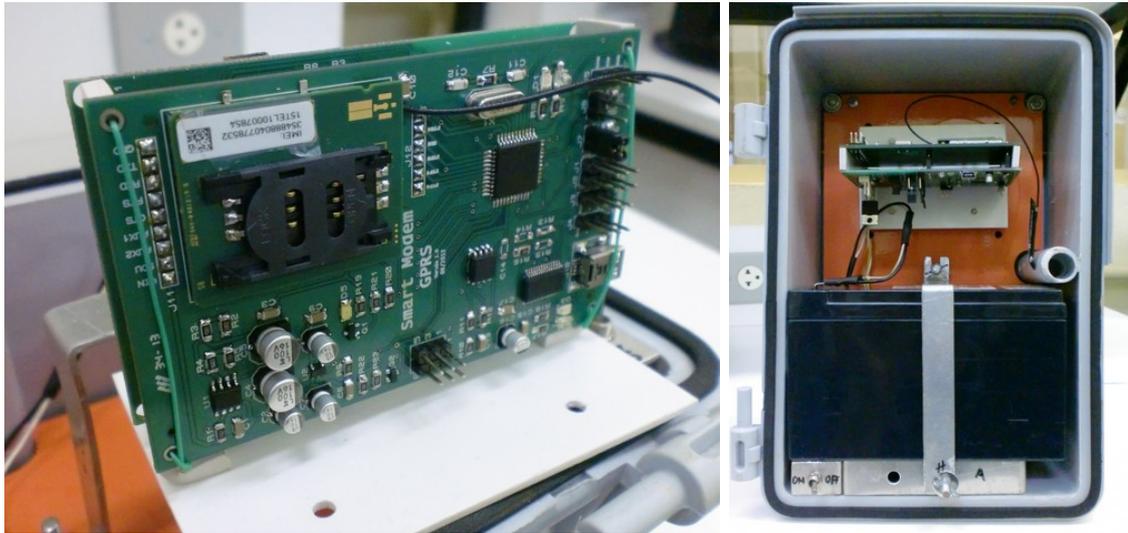
**Figura 4.13:** Módulos Mestre e GPRS construídos.



Fonte: Autor.

A Figura 4.14(a) mostra o Módulo Mestre acoplado ao Módulo GPRS, denominado *Smart Modem*, e fixado num suporte plástico, de forma a facilitar o acondicionamento destas placas e a bateria que alimenta toda a rede em um abrigo. Este abrigo escolhido para o sistema é mostrado na Figura 4.14(b) sem a tampa frontal. Fabricada em plástico de engenharia e resistente a intempéries, possui fator de proteção IP-67. Em seu interior é visto o suporte plástico com o Módulo Mestre e o *Smart Modem*, juntamente com uma bateria selada de 12 V.

**Figura 4.14:** Módulos fixados no suporte e o abrigo montado.



(a)

(b)

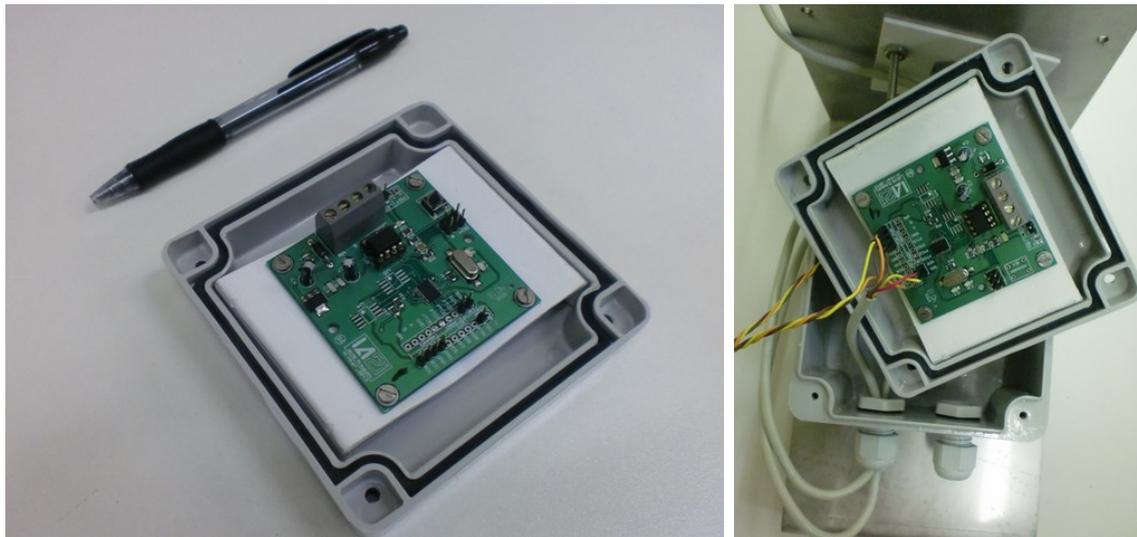
Fonte: Autor.

### 4.5.3 Módulo Escravo

Na Figura 4.15(a) é mostrada a placa do módulo Escravo construída e fixada em seu suporte plástico que, por sua vez, está embutido na parte interna da tampa da caixa que abriga todo o circuito. Dessa forma, boa parte do espaço interno da caixa fica livre para serem manuseados os cabos das conexões com os sensores, interface de comunicação e alimentação. Também fabricada em plástico de engenharia e com fator de proteção IP-54, pela Figura 4.15(b) observa-se o circuito com as ligações dos sensores, fixada na estrutura que será descrita na Seção a seguir.

### 4.5.4 Estrutura de fixação do Módulo Escravo

A Figura 4.16(a) apresenta um Módulo Escravo completo, montado numa estrutura em aço inoxidável desenhada para permitir fixação numa haste ou suporte. Nesta mesma estrutura é fixado o abrigo meteorológico do sensor de temperatura e umidade relativa do ar, onde também foi adaptado um suporte para um SMFc com inclinação de 30°, conforme observado no trabalho de Sentelhas et al. (2004). Na Figura 4.16(b) são apresentados os quatro Módulos Escravos montados em suas estruturas e prontos para uso.

**Figura 4.15:** Módulo Escravo construído e seu abrigo.

(a)

(b)

Fonte: Autor.

**Figura 4.16:** Controle de alimentação implementado.

(a)

(b)

Fonte: Autor.

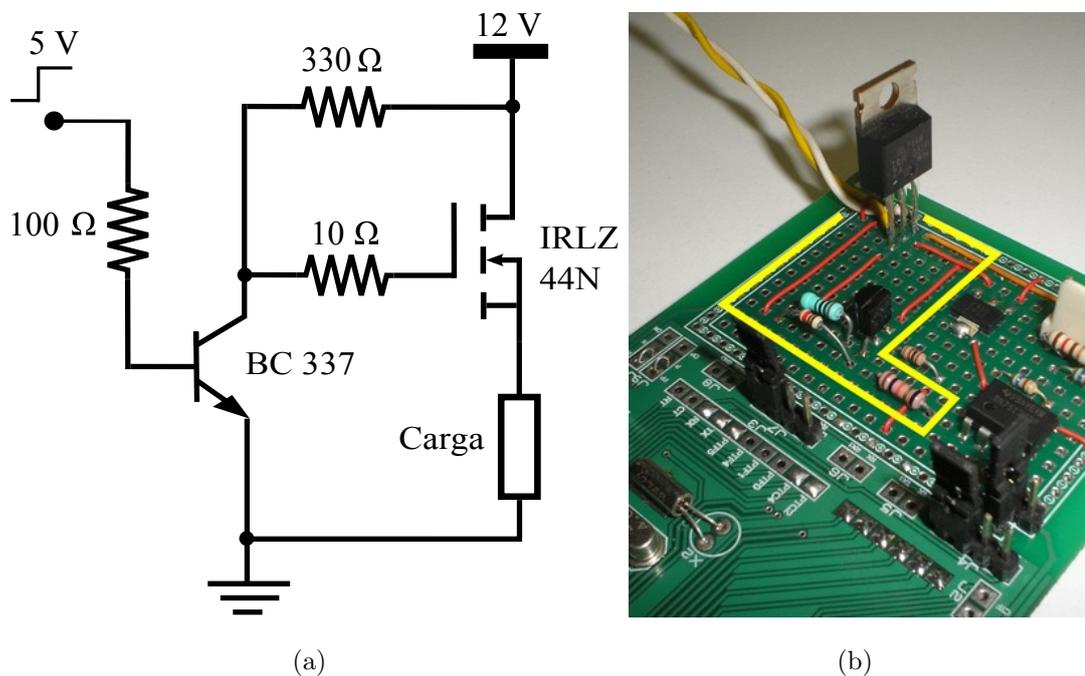
### 4.5.5 Controle de alimentação dos Módulos Escravos

Levando-se em consideração o baixo consumo de energia que sistema deve oferecer, montou-se um circuito bem simples para controle de alimentação para os Módulos Escravos. O circuito mostrado na Figura 4.17(a), onde a *Carga* representa os Módulos Escravos, foi incorporado à placa do Módulo Mestre, que possui um espaço reservado para integração

de pequenos circuitos. Este circuito responsável pelo controle da alimentação da *Carga* está destacado na Figura 4.17(b).

Assim, nos períodos de aquisição de dados, o microcontrolador do Módulo Mestre aciona este circuito de controle, permitindo a alimentação para todos os Escravos e aguardando um período para estabilização dos circuitos antes de iniciar a transmissão de comandos. Ao término da coleta, o microcontrolador desliga a chave, cessando imediatamente o consumo de energia dos Módulos Escravos.

**Figura 4.17:** Estruturas para os Módulos Escravos construídas.



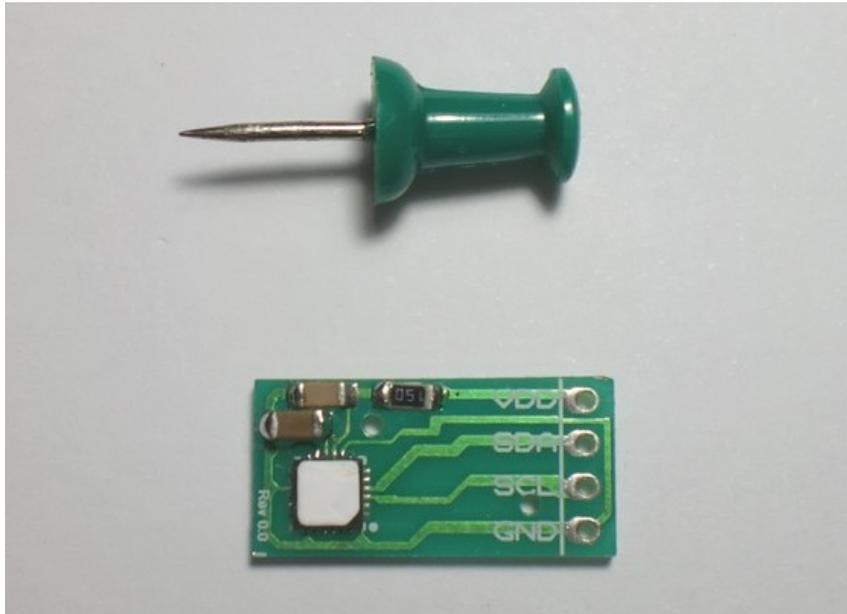
Fonte: Autor.

#### 4.5.6 Sensor de umidade e temperatura

Devido à disponibilidade para uso imediato, inicialmente neste trabalho foi utilizado o sensor SHT71, da Sensirion, para testes em campo. Porém, verificou-se que seu custo é elevado para utilização em maior número, juntamente com o sensor de molhamento desenvolvido. Assim, adotou-se o sensor Si7005 da Silicon Labs®, como discutido na Seção 3.4.4, que apresenta características semelhantes ao SHT71, porém mais barato.

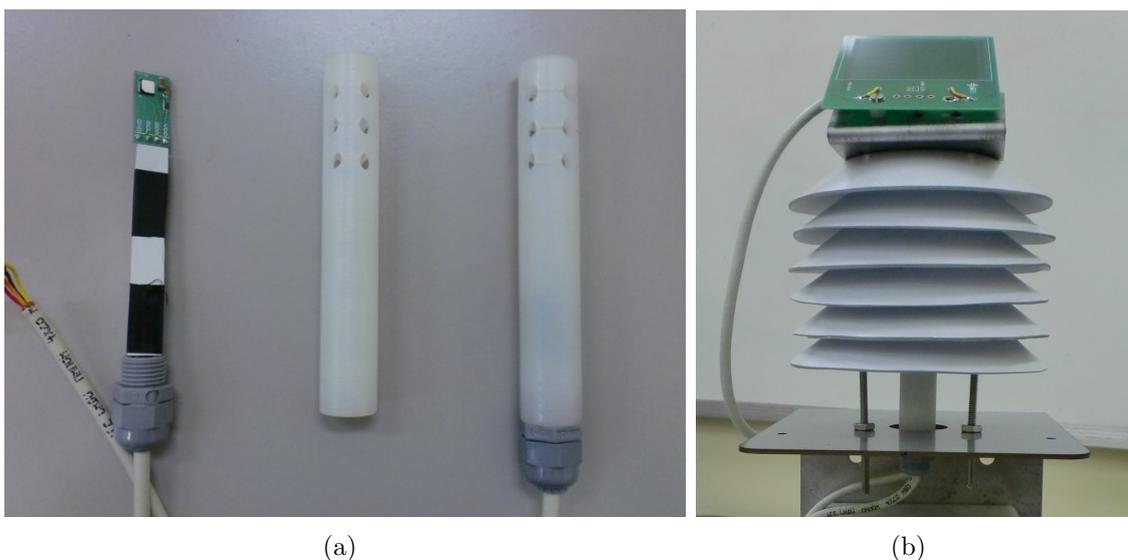
Este componente de dimensões reduzidas ( $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ) requer poucos externos, permitindo sua montagem em áreas com pouco espaço. A Figura 4.18 apresenta o sensor montado em PCI e comparado a um alfinete.

Na Figura 4.19(a) verifica-se o sensor preso numa haste de plástico e sua cápsula

**Figura 4.18:** Sensor de umidade integrado a uma PCI.

Fonte: Autor.

de acondicionamento, fabricada a partir de tarugos usinados de polipropileno, com perfurações em uma de suas extremidades para contato do sensor com a atmosfera, sendo sua abertura de acesso rosqueada para fixação de um prensa cabos, protegendo o sensor de infiltrações por água nesta abertura. A haste serve para posicionar corretamente o sensor dentro da cápsula.

**Figura 4.19:** Sensor de temperatura e umidade relativa implementado.

(a)

(b)

Fonte: Autor.

Também foi construído um abrigo para o sensor com o objetivo de oferecer proteção contra incidência solar e particulados, prevenindo o mesmo de possíveis erros de leitura.

Assim, tal abrigo protege o dispositivo sem perda do contato atmosférico (GUEDES, 2014). A Figura 4.19(b) detalha o abrigo com a cápsula do sensor, integrados ao suporte do sistema e com o sensor de molhamento acoplado no topo.

## 4.6 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos do sensor experimental. Como estes resultados foram satisfatórios para a validação do sensor proposto, um novo desenho foi feito e novos testes em campo foram realizados junto com um sensor comercial de temperatura e umidade relativa do ar. Os resultados obtidos foram analisados e mostraram-se animadores.

A seguir testes também foram feitos com o sensor como detector do teor de água no solo por meio de amostras de solo com diferentes teores de umidade, apresentando um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,94$ .

Por fim, também foi mostrado a implementação da rede de sensores e os resultados alcançados, apresentando um sistema com características eletrônicas simplificadas de construção e também um circuito de controle de alimentação de energia para os módulos escravos, pensando na autonomia do sistema. A circuitaria apresentada foi acondicionada em caixas plásticas resistentes a intempéries e fixadas num suporte metálico que agrupa todo este conjunto: o circuito com a caixa, o sensor de molhamento e o sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Um módulo de transmissão GPRS também foi apresentado como recurso para transmissão de dados remotamente para um servidor na Internet, garantindo acesso aos dados coletados em qualquer lugar no planeta.

As conclusões finais do trabalho são apresentadas no capítulo seguinte.

## 5 Conclusões

Dentre os parâmetros agrometeorológicos que influenciam no aparecimento e na severidade de diversas doenças fúngicas, um dos mais importantes é a permanência de água sobre as folhas de plantas, que é dado pela DMF. No entanto, até bem pouco tempo, não se associava a severidade das doenças fúngicas à quantidade de água sobre a superfície das folhas.

O presente trabalho apresentou um sensor eletrônico que quantifica o molhamento foliar sobre a superfície das folhas das plantas. A sua principal vantagem é o baixo custo, pois, para uma melhor caracterização da região de cultivo, o ideal é que esses sensores sejam instalados em diversos pontos da lavoura. Assim, com o sensor proposto, será possível conduzir estudos que definam a partir de qual porcentagem de molhamento foliar os esporos iniciam o processo germinativo, melhorando ainda mais a eficiência e racionalização do controle químico.

O sensor proposto é baseado no princípio físico de capacitância por campo de borda do dielétrico. Através de simulações, avaliou-se a influência da geometria do sensor (dimensões, largura das trilhas condutoras, etc.) na sua sensibilidade e determinou-se que é possível conhecer a quantidade de água em sua superfície com exatidão da ordem de  $\pm 1\%$ . Isso também foi comprovado através de ensaios em laboratório. Testes em campo com este sensor mostraram que, tal como na superfície das folhas das plantas, a tendência de molhamento do sensor acompanha o aumento da umidade relativa, indicando que o sensor consegue caracterizar bem o molhamento em uma região de cultivo.

Embora a água se apresente de maneira diferente no solo, sua sensibilização no sensor capacitivo é bem semelhante. De fato, o teor de água no solo também afeta o dielétrico do sensor, provocando mudança no valor de capacitância de forma proporcional a este teor. Porém, no SMFc a água estabelece contato através de gotas distribuídas na superfície do sensor, já no solo tem-se contato com a água através de sua mistura com o solo, conferindo uma distribuição quase uniforme de água ao longo de toda a superfície sensora. O solo também tem uma constante dielétrica bem menor que a da água, assim, para aumentar a

sensibilidade, optou-se pela construção de um sensor dimensionado com base no método apresentado neste trabalho, de maneira que outra geometria foi utilizada para construir o sensor de água para o solo.

Os testes em laboratório para quantificar o teor de água no solo mostraram que, quanto maior o valor de  $C_p$ , maior é a variância da capacitância de um ensaio para o outro. Contudo, um solo com concentração de água acima de 25 % já é bastante encharcado, podendo ser considerado como saturado para muitas aplicações. Além disto, os resultados do experimento ajustam-se ao modelo de uma reta com  $R^2 = 0,94$ , evidenciando que a técnica demonstra-se bastante promissora para utilização na agricultura, como no controle de irrigação, e também em outras aplicações.

Para integrar vários sensores em testes experimentais, foi construída uma rede cabeada como proposta de baixo custo. Esta rede é composta de módulos para aquisição de dados interligadas por meio de um único cabeamento, sendo uma das estações definida como Estação Concentradora, responsável por concentrar estes dados, gerenciando sua aquisição pelas demais estações coletoras e também administrando o consumo de energia, desligando totalmente estas estações nos períodos de inatividade.

Ainda, acoplado ao sistema, tem-se um módulo independente que recebe os dados da Estação Concentradora e é responsável pela transmissão destes dados, através de um serviço de telefonia móvel (GPRS), para um servidor conectado à Internet. Testes em laboratório mostraram que o sistema proposto funciona satisfatoriamente, realizando a aquisição dos dados e transmitindo para um servidor remoto. Desta forma, os usuários podem acessar estes dados para análise e tomadas de ações, mesmo remotamente.

## 5.1 Perspectivas para continuidade do trabalho

Como perspectiva para trabalhos futuros, aponta-se para o emprego do sensor desenvolvido juntamente com a rede de sensores proposta para testes em campo, de forma a validar a severidade da doença nas plantas em função da quantidade de molhamento. Também, devido ao baixo custo de fabricação do sensor, pode-se verificar sua geometria ótima em função do tipo de planta em análise, garantindo melhor exatidão nas leituras.

O mesmo poderá ser feito com o sensor de concentração de água no solo, de forma a comprovar a eficácia deste sensor como ferramenta auxiliar no controle de irrigação. A geometria deste sensor também pode ser analisada para se obter um desenho de dimensões reduzidas, porém com a mesma eficácia, proporcionando redução de custos de fabricação.

A rede cabeada proposta também pode ser melhorada, utilizando-se protocolos mais direcionados para aplicações agrícolas, como o protocolo Isobus, bem como o aperfeiçoamento do circuito de controle de alimentação da rede proposto para gerenciamento de energia.

Como o sistema atualmente transmite os dados brutos para o servidor, o usuário que utilizar estes dados para análise deve transferi-los para um programa de planilha, como o Excel da Microsoft, e fazer o tratamento adequado. Em vista desta limitação, será útil o desenvolvimento de uma aplicação WEB que processe estes dados e os apresente de forma mais amigável, visual e rápida para o usuário.

# Referências

- ALIPPI, C.; CAMPLANI, R.; GALPERTI, C.; MARULLO, A.; ROVERI, M. An hybrid wireless-wired monitoring system for real-time rock collapse forecasting. In: *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2010 IEEE 7th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 224–231. ISSN 2155-6806.
- ANA. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe 2011*. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas (Brasil), 2011. 112 p. ISBN 9788589629737. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/>>.
- BAGLIO, S.; CASTORINA, S.; GANCI, G.; SAVALLI, N. A high sensitivity conditioning circuit for capacitive sensors including stray effects compensation and dummy sensors approach. In: *IMTC 2004 - Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Como, Italy: [s.n.], 2004. p. 1542–1545.
- BHARATHIDASAN, A.; PONDURU, V. A. S. *Sensor networks: an overview*. Davis, California, 2002. 24 p.
- BRAITHWAITE, K.; CROFT, B.; MAGAREY, R.; SCHARASCHKIN, T. Phulogenetic placement of the sugarcane orange rust pathogen puccinia kuehnii in a historical and regional context. *Australasian Plant Pathology*, v. 38, n. 6, p. 380–388, 2009.
- BREGAGLIO, S.; DONATELLI, M.; CONFALONIERI, R.; ACUTIS, M.; ORLANDINI, S. Multi metric evaluation of leaf wetness models for large-area application of plant disease models. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, n. 9, p. 1163–1172, set. 2011. ISSN 01681923.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. *LWS Leaf Wetness Sensor Data Sheet*. Logan, Utah, 2008.
- CHASE, O. A.; SAMPAIO, M. H. K.; SOUZA, J. R. B. de; ALMEIDA, J. F. S. Data acquisition systems: an approach to de amazonian environment. *IEEE Latin American Transactions*, v. 10, n. 2, p. 1616–1621, March 2012.
- DAVID MEEKER. *Finite Element Method Magnetics, version 4.2*. October 2010. Software.
- DEAN, R.; RANE, A.; BAGINSKI, M.; RICHARD, J.; HARTZOG, Z.; ELTON, D. A capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 4, p. 1105–1112, April 2012.
- DECAGON DEVICES. *Dielectric Leaf Wetness Sensor Operator's Manual*. Pullman, WA, 2010.
- ETWS. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations*. [S.l.: s.n.], 2010. 1–32 p. ISBN 9789263100085.

- FRANÇA, J. A. d.; JUNIOR, E. L. B.; KOYAMA, M. H.; PEREIRA, R. V.; CANTERI, M. G.; FRANÇA, M. B. d. M. System of microstations of data acquisition for wireless monitoring of the microclimate in crop areas. In: *7th World Congress on Computer in Agriculture and Natural Resources 2009*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 13–18.
- GEORGE, B.; KUMAR, V. J. Analysis of the switched-capacitor dual-slope capacitance-to-digital converter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 59, n. 5, p. 997–1006, May 2010.
- GIESLER, L.; HORST, G.; YUEN, G. A site-specific sensor for measuring leaf wetness duration within turfgrass canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 81, n. 1-2, p. 145–156, 1996.
- GILLESPIE, T.; SRIVASTAVA, B.; PITBLADO, R. Using operational weather data to schedule fungicide-sprays on tomatoes in southern ontario, canada. *Journal of Applied Meteorology*, v. 32, p. 567–573, 1993.
- GOUMOPOULOS, C.; O'FLYNN, B.; KAMEAS, A. Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 105, p. 20–33, jul. 2014. ISSN 01681699.
- GUEDES, A. L. *Uma plataforma de hardware e software para desenvolvimento de rede de sensores sem fio aplicada à agrometeorologia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Brasil, 2014.
- GUYOT, J.; OMANDA, E.; PINARD, F. Some epidemiological investigations on colletotrichum leaf disease on rubber tree. *Crop Protection*, v. 24, n. 1, p. 65–77, 2005.
- HAZARIKA, D.; LASKAR, S.; SARMA, A.; SARMAH, P. Pcbased instrumentation system for the detection of moisture content of tea leaves at its final stage. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 55, n. 5, p. 1641–1647, 2006.
- HEIDARY, A.; MEIJER, G. C. M. Features and design constraints for an optimized sc front-end circuit for capacitive sensors with a wide dynamic range. v. 43, n. 7, p. 1609–1616, july 2008.
- HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 15, p. 1965–1978, dez. 2005. ISSN 0899-8418. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1276>>.
- HUBER, L.; GILLESPIE, T. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, v. 30, n. 1, p. 553–577, 1992.
- IGNJATOVIC, Z.; BOCKO, M. F. An interface circuit for measuring capacitance changes based upon capacitance-to-duty-cycle (cdc) converter. *IEEE Sensors J.*, v. 5, n. 3, p. 403–410, June 2005.
- INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE Álvaro Vilela de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011.

INMET. *Rede de estações meteorológicas automáticas do INMET*. Brasília, DF: Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011. Nota Técnica No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET.

ISO. *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - part1: determination of water content*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2004. ISO/TS 17892-1.

ISO. *Soil quality - preparation of laboratory samples from large samples*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008. ISO 23909.

KARLSSON, N. A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, v. 48, n. 6, p. 1122–1124, December 1999.

KIM, K.; TAYLOR, S.; GLEASON, M.; KOEHLER, K. Model to enhance site-specific estimation of leaf wetness duration. *Plant Disease*, v. 86, n. 2, p. 179–185, 2002.

KIM, K. S.; TAYLOR, S. E.; GLEASON, M. L.; Nutter Jr., F. W.; COOP, L. B.; PFENDER, W. F.; SEEM, R. C.; SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; Dalla Marta, A. Spatial portability of numerical models of leaf wetness duration based on empirical approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 150, n. 7-8, p. 871–880, jul. 2010. ISSN 01681923.

KIRKHAM, M. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. 1st. ed. USA: Elsevier Academic Press, 2004.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, v. 40, n. 7, p. 1550–1556, jul. 2010. ISSN 0103-8478.

KOMOLINE AEROSPACE LIMITED. *KDS-151 Leaf Wetness Sensor*. Ahmedabad, India, 2012.

LECA, A.; PARISI, L.; LACOINTE, A.; SAUDREAU, M. Comparison of Penman-Monteith and non-linear energy balance approaches for estimating leaf wetness duration and apple scab infection. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, n. 8, p. 1158–1162, ago. 2011. ISSN 01681923.

LI, X.; MEIJER, G. C. M. Elimination of shunting conductance effects in a low-cost capacitive-sensor interface. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 49, n. 3, p. 531–534, June 2000.

LI, X.; MEIJER, G. C. M. An accurate interface for capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 51, n. 5, p. 935–939, October 2002.

LIDE, D. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90th. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

MADEIRA, A.; KIM, K.; TAYLOR, S.; GLEASON, M. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 111, n. 1, p. 55–63, 2002.

- MAGAREY, R. *A theoretical standard for estimation of surface wetness duration in grape*. Tese (Doutorado) — Cornell University, Ithaca, NY, USA, 1999.
- MAGAREY, R. D.; SEEM, R. C.; RUSSO, J. M.; ZACK, J. W.; WAIGHT, K. T.; TRAVIS, J. W.; OUDEMANS, P. V. Site-specific weather information without on-site sensors. *Plant Disease*, v. 85, n. 12, p. 1216–1226, December 2001.
- MAJID, H. A.; HAZALI, N.; SULAIMAN, M. S.; A'AIN, A. K. A capacitive sensor interface circuit based on phase differential method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 55, p. 630–633, 2009.
- MAJONE, B.; VIANI, F.; FILIPPI, E.; BELLIN, A.; MASSA, A.; TOLLER, G.; ROBOL, F.; SALUCCI, M. Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Soil Moisture Dynamics at the Field Scale. *Procedia Environmental Sciences*, v. 19, p. 426–435, jan. 2013. ISSN 18780296.
- MAMISHEV, A. V.; SUNDARA-RAJAN, K.; YANG, F.; DU, Y.; ZAHN, M. Interdigital sensors and transducers. In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 92, n. 5, p. 808–845.
- MARTA, A.; MAGAREY, R.; MARTINELLI, L.; ORLANDINI, S. Leaf wetness duration in sunflower (*helianthus annuus*): analysis of observations, measurements and simulations. *European Journal of Agronomy*, v. 26, n. 3, p. 310–316, 2007.
- MARTA, A.; ORLANDINI, S.; GHIRONI, M.; SABATINI, F. Influence of different sensor positions on leaf wetness measurements and their effect on the simulation of grapevine downy mildew (*plasmopara viticola*). *Idojárás*, v. 108, p. 253–263, 2004.
- MCINTOSH, R.; CASADA, M. Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. *IEEE Sensors Journal*, v. 8, n. 3, p. 240–247, 2008.
- MIRABELLA, O.; BRISCHETTO, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, v. 60, n. 2, p. 398–407, 2011. ISSN 0018-9456.
- MODBUS.ORG. *Modbus over serial line specification and implementation guide v1.0*. [S.l.]: Modbus.org, 2002.
- NEPAL, A.; MENDOZA, L. d. R. Effect of sclerotial water content on carpogenic germination of *sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Disease*, n. September, p. 1315–1322, 2012. Disponível em: <<http://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PDIS-10-11-0889-RE>>.
- PACHECO, A.; OLIVEIRA, G. Q. de; LOPES, A. d. S.; BARBOSA, A. S. Manejos de irrigação e nitrogênio na produção de feijoeiro sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, n. 3, p. 323–330, set. 2012. ISSN 1983-4063.
- PAPASTAMATI, K.; MCCARTNEY, H.; BOSCH, F. van den. Modeling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 123, n. 1-2, p. 69–78, 2004.

- PEREIRA, R. V. *Sensores e transdutores para um sistema automático de aquisição de dados agrometeorológicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Brasil, 2008.
- PONTE, E. D.; FERNANDES, J.; PAVAN, W. A risk infection simulation model for Fusarium head blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira*, v. 30, n. 6, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-41582005000600011&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-41582005000600011&script=sci_arttext)>.
- RODRIGUEZ, T.; TEIXEIRA, R.; FERNANDES, F.; JR, O.; BERALDO, F.; KOMORI, E.; DANZIGUER, D. Estudo da compactação do lodo de eta para uso em aterros sanitários. In: *VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*. [S.l.: s.n.], 2011.
- ROTH, K.; SCHULIN, H.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Reserarch*, n. 26, p. 2267–2273, 1990.
- SANTOS, E. A. *Duração do período de molhamento foliar: medida com sensores eletrônicos, variabilidade espacial em culturas e estimativa com modelos empíricos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brasil, 2006.
- SAUTER, T. The three generations of field-level networks - evolution and compatibility issues. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 57, n. 11, p. 3585–3595, 2010. ISSN 0278-0046.
- SAXENA, S. C.; TAYAL, G. M. Capacitive moisture meter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI-28, n. 1, p. 37–39, February 1981.
- SCHMITZ, H.; GRANT, R. Precipitation and dew in a soybean canopy: spatial variations in leaf wetness and implications for phakopsora pachyrhizi infection. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 149, n. 10, p. 1621–1627, 2009.
- SENTELHAS, P.; GILLESPIE, T.; BATZER, J.; GLEASON, M.; MONTEIRO, J.; PEZZOPANE, J.; PEDRO, M. Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *Internationa Journal of Biometeorology*, v. 49, p. 363–370, 2005.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; GLEASON, M. L.; MONTEIRO, J. E. M. B.; HELLAND, S. T. Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 126, p. 59–72, 2004.
- SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. a.; GILLESPIE, T. J. Electronic leaf wetness duration sensor: why it should be painted. *International journal of biometeorology*, v. 48, n. 4, p. 202–5, maio 2004. ISSN 0020-7128. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14750003>>.
- SHI, X.; MATSUMOTO, H.; MURAO, K. A high-accuracy digital readout technique for humidity sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 50, n. 5, p. 1277–1282, October 2001.
- SILICON LABS. *Digital P<sup>2</sup>C humidity and temperature sensor Data Sheet*. Austin, Texas, 2012.

- SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. *Precision Agriculture*, v. 12, n. 1, p. 67–81, jan. 2010. ISSN 1385-2256.
- SILVA, P. H.; MIRANDA, A. C.; MORAES, M. L.; FURTADO, E. L.; STAPE, J. L.; ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; MORI, E. S.; SEBBENN, A. M. Selecting for rust (*Puccinia psidii*) resistance in *Eucalyptus grandis* in São Paulo State, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 303, p. 91–97, set. 2013. ISSN 03781127.
- SOBRINHO, O. G.; MARÈ, R. M.; CUGNASCA, C. E.; LEITE, B. C. C.; HONDA, R. M. Proposta para monitoramento seguro e contínuo de variáveis ligadas à qualidade de ambientes internos por meio de redes de sensores sem fio. In: *XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2011*. [S.l.: s.n.], 2011.
- SOYLU, M. E.; KUCHARIK, C. J.; LOHEIDE, S. P. Influence of groundwater on plant water use and productivity: Development of an integrated ecosystem - Variably saturated soil water flow model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 189-190, p. 198–210, jun. 2014. ISSN 01681923.
- SQUITTER. *Estação Meteorológica ISIS Modelo S1220 SQUITTER*. February 2011. Folha de dados.
- SYNGENTA. *Pedrado*. 2014. Online; acessado em 18/02/2014. Disponível em: <<http://www3.syngenta.com/country/pt/pt/culturas/Pomoideas/Problemas/Pages/Pedrado>>.
- TEXAS INSTRUMENTS INC. *AN-1057 ten ways to bulletproof rs-485 interfaces*. October 1996. Application Note.
- WU, S.; ZHOU, Q.; WANG, G.; YANG, L.; LING, C. The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content. *Environmental Earth Sciences*, Springer-Verlag, v. 62, n. 5, p. 999–1011, 2011. ISSN 1866-6280. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0585-4>>.

## Apêndice A – Artigos Aceitos para Publicação

# Fringing Field Capacitive Sensor for Measuring Soil Water Content: Design, Manufacture and Testing

Jaime Mizuguchi, Juliani Chico Piai, José Alexandre de França, Maria B. de Morais França, Karina Yamashita & Luis Carlos Mathias

**Abstract**—Capacitors are used as sensors in several applications. Typically, the quantity to be measured changes either the geometric properties of the structure used as a capacitive sensor or the physical properties of the dielectric between the electrodes of that structure. On the other hand, if the sensor geometry maximizes the capacitance due to fringing, then the possibilities are totally different. In this case, the electric field can be projected onto the test sample. This paper covers the usage of fringing field sensors to measure the water present in the soil. We examine how the geometry of the PCB-made interdigitated electrode structure influences the characteristics of the sensor. However, fringing field sensors are difficult to be analytically modeled due to its intrinsic non-linear characteristic. Therefore, our conclusions were mainly based on results of simulations, but we also tried to reproduce the results of the simulations experimentally. Also, we discuss a circuit that converts the changes in the sensor's capacitance into variations in the width of a pulse signal. Finally, the proposed solution has been experimentally compared with the standard gravimetric method to quantify the water content in the soil. The results were encouraging since the proposed sensor's measurements fit to the experimental data with a coefficient of determination  $R^2 = 0.94$ .

**Index Terms**—Interdigital Electrodes; Capacitive Measurement; Moisture Measurement; Nondestructive Measurement.

## I. INTRODUCTION

Capacitors are used as sensors in several applications. Typically, the quantity to be measured changes either the geometric properties of the structure used as a capacitive sensor or the physical properties of the dielectric between the electrodes of that structure. For example, the determination of the concentration of components in a two phase flow through Capacitance Tomography systems. These are based on the different dielectric constants of the material in the flow and that are used as the dielectric of the capacitive sensor [1–3]. In other applications, it is considered that the weight of a commodity can change the distance between the electrodes [4]. Thus, by observing changes in the capacitance of the structure, one can infer the weight of the material of interest. On the other hand, if the sensor geometry maximizes the capacitance due to fringing, then the possibilities are totally different. In this case, the electric field can be projected onto the test sample. It allows non-invasive measurements, in which the electrodes of the capacitor are completely isolated from the analyte. Thus, fringing field sensors have been used to

measure non-invasively even the level of blood glucose for diabetes diagnosis, for example [5].

Fringing field capacitors may be manufactured with MEMS technology, in which co-planar electrodes are designed over a thin oxide dielectric layer deposited over a substrate of grounded silicon. Using this technology, some studies show the results for applications in motion sensors [6, 7]. In these sensors, a small mass, when in motion, change the field lines formed by the electrodes comprising the capacitor. Thus, the value of its capacitance varies and the sensor response as a function of the movement of the mass can be detected. One of the advantages of MEMS technology is the capability to integrate on the same silicon wafer both the sensor and all the conditioning circuit, which results in a SoC. On the other hand, this type of sensor requires a highly-specialized manufacturing process.

In the making of fringing field sensors, an interdigitated electrode structure is typically used, as it maximizes the contribution of the fringing field effect in the sensor capacitance. Another advantage of this structure is its ease of preparation. They can be entirely produced by using only printed circuit board (PCB) technology, which even allows that any additional electronics (required for measuring the capacitance) be included in the body of the sensor itself. Evidently, these features make the fringing field sensors very popular, especially in the quantification of water in various substances. This is because the dielectric constant of water is much higher than the one of most other substances. Thus, a variation in the concentration of water causes a significant change in the electric field and, therefore, so in the capacitance of the sensor. Therefore, these sensors have already been used to measure water in soil [8], tea leaves [9], paper pulp [10] and in other commodities [11, 12].

This paper covers the usage of fringing field sensors to quantify water in substances in general. However, the final goal of the research is to develop a low cost system to quantify the water present in the soil. Therefore, we examine how the geometry of the PCB-made interdigitated electrode structure influences the characteristics of the sensor (sensitivity, intensity, etc.). We analyzed, for example, what happens when the geometry allows water to remain completely over a single tooth of the interdigitated structure. Also, factors such as the influence of temperature on the capacitance are studied. However, fringing field sensors are difficult to be analytically modeled due to their intrinsic non-linear characteristic. Therefore, most of the existing analytical models apply only to simplified geometries or to idealized situations that limit their application in the real world [13]. Therefore, in this paper, our conclusions were

J. Mizuguchi, J. Piai, J. de França, M. França, K. Yamashita & L. Mathias are with the Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Caixa Postal 10039, Londrina, PR, 86057-970, Brazil (e-mail: jaime.mizu@gmail.com, jpiai@uel.br, jaf@jaf.eng.br, mbmorais@uel.br, karina\_yamashita@hotmail.com, luis.mathias@uel.br).

mainly based on the results of simulations, but we also tried to reproduce the results of the simulations experimentally. Also, we discuss a circuit that converts the changes in the sensor's capacitance into variations in the width of a pulse signal. Besides exciting the sensor with an always-constant frequency, the parameters of this circuit may be adjusted so that the pulse width is set very close to zero when the amount of water is minimal. Finally, the proposed solution has been experimentally compared with the standard gravimetric method to quantify the water content in the soil. The results were encouraging since the proposed sensor's measurements fit to the experimental data with a coefficient of determination  $R^2 = 0.94$ .

## II. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GEOMETRY AND EXTERNAL FACTORS IN THE SENSOR'S CAPACITANCE

The sensor under study (Figure 1) uses fringing field capacitance configuration, rather than the well-known parallel plate capacitance configuration. In fringing field capacitance sensors, there is a structure with  $n$  copper tracks (referred to as electrode teeth) arranged in parallel, which are separated by a distance  $d$  and deposited in a substrate (dielectric material). Each electrode tooth is electrically connected together through a common electrode arm. This electrode configuration is referred to as two interdigitated electrodes. A ground plane can fill the entire surface opposite to the electrodes (Figure 1) [2, 3]. This prevents any substance coming into contact with this surface to influence on the capacitance of the sensor. One of the advantages of fringing field capacitance sensors is that they can be made using the printed circuit boards (PCB) technology. This makes its manufacturing very inexpensive. In this case, normally, the substrate used essentially consists of several layers of fiberglass held together by an epoxy polymer, giving it the property of slowing the spread of flames. These FR-4 substrates can be found in a variety of thicknesses, but the most common one is around 1.57 mm. The electrodes teeth (tracks) are, in turn, typically made of copper having thickness ranging from 17.78 to 71.12  $\mu\text{m}$ , and width that may be as thin as 100  $\mu\text{m}$ , depending on the manufacturing process [8]. These tracks are covered with an insulating varnish, referred to as solder mask, which has a primary function of avoiding short circuit.

Due to the difficulty in analytically modeling fringing field capacitance sensors, the sensor under study was modeled using the FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) application. FEMM is a suite of programs for solving low frequency electromagnetic problems on two-dimensional planar and axisymmetric domains using finite element techniques. This is a free software developed for the Windows<sup>®</sup> platform [14]. The goal of the simulations was to determine how certain factors influence on aspects such as the sensor's capacitance and sensitivity. To this end, various situations were simulated with water strips (fully or partially) covering the sensing surface. Water was used in the simulations not only because the ultimate goal of this research is to measure the water content in the soil, but also because the amount of water is the

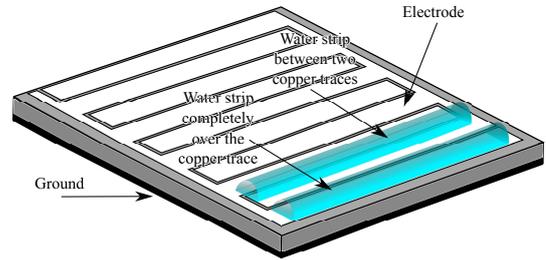


Figure 1. Positioning of water on the surface of the sensor.

Table I  
PROPERTIES OF THE SENSOR USED IN THE SIMULATIONS.

Property	Value
Width of copper tracks	1.12 mm
Height of copper tracks	36 $\mu\text{m}$
Distance between copper tracks	0.1 mm
Height of substrate	1.575 mm
Height of solder mask	16.9 $\mu\text{m}$
Height of the water strip	1.372 mm
Total length of the sensor	61 mm
Total width of the sensor	57 mm
Total number of copper tracks	50
Temperature	20°C
Dielectric constant of air	1.00059
Dielectric constant of water	80.34

quantity most commonly measured with fringing field sensors. This is mainly due to the fact that the dielectric constant of water is much higher than the one of most substances, which makes this kind of sensor very sensitive in these applications. Finally, in the simulations, the properties of the sensor were always those presented in Table I.

### A. Influence of the wetted area

In this step, we aimed to evaluate the dependence between the sensor's capacitance and the amount of water on its surface. For this, water strips were gradually placed on the sensing surface of the sensor, with its wet area varying from 0 to 100%. Each water strip was placed in two different positions: either completely over one of the copper tracks or exactly in the central region between two neighbor tracks. Also, each strip of water had the same width of the conductive tracks (Figure 1). The result of this simulation is presented in the graph of Figure 2. It can be observed in the graph that, in some regions, the capacitance remains practically constant even with the increasing of the amount of water. This happens whenever the strip of added water is positioned completely over one of the copper tracks. In practice, this may occur whenever the diameter of the portion of water is smaller than or equal to the width of the conductive tracks of the sensor. On the other hand, if a drop is positioned between two tracks, in the region where the field lines are formed, then there is a linear change in the capacitance value (Figure 2). Therefore, the interaction of the material under test (in this case, the water) with the field lines is necessary for the sensor to function as desired. This only occurs where there is a potential difference, i.e., in the region where the copper tracks are separated by a small

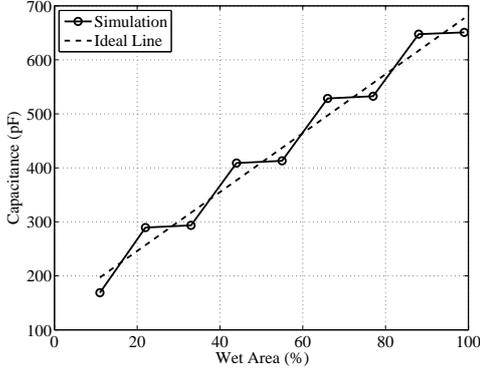


Figure 2. Variation of the sensor's capacitance with the wet area.

distance. Thus, in practice, in order to increase the sensitivity and linearity, the sensor must be made with its conductive tracks as close as possible, ensuring that the field lines are formed in very small spaces.

Despite the sensor's characteristic of presenting levels (related to the water strips completely over one of the tracks) as shown in Figure 2, the graph can be modeled by a straight line with a coefficient of determination<sup>1</sup>  $R^2 = 0.97$ .

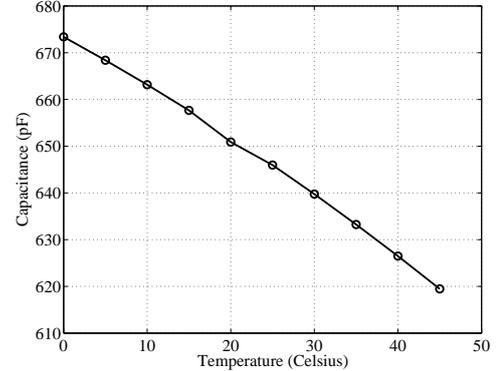
### B. Influence of temperature

The dielectric constant of water ( $\epsilon_{\text{water}}$  varies considerably with temperature changes. According to [15],

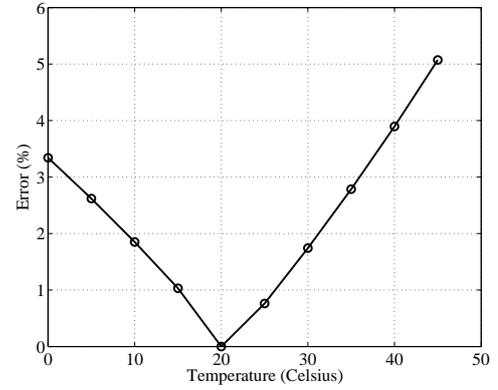
$$\epsilon_{\text{water}}(t) = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25)^3], \quad (1)$$

where  $t$  is the water temperature in degrees Celsius. On the other hand, for the air and solid particles, the dielectric constant is less dependent on the temperature [16] and thus, depending on the application, it may be considered constant. In this way, the influence of temperature on the sensor's capacitance will be greater when 100 % of the surface is covered by water. To examine this influence, the sensor was modeled in this condition, with the temperature varying from 0 to 45°C and its permittivity given by (1). The result is shown in Figure 3(a). One can observe that the capacitance changed significantly with temperature. However, if the sensor calibration occurs at 20°C, for example, as shown in Figure 3(b), the maximum error committed by ignoring the influence of temperature for the same previous variation would be 5 %. In addition, it can be observed that, although (1) is a polynomial of the third degree, the dependence of the sensor's capacitance with temperature fits a linear model with  $R^2 = 0.9975$ . Thus, in practice, if greater accuracy is required, a temperature sensor can be coupled to the fringing field capacitor in order to compensate such dependence. In particular, water content sensors are very dependent on soil

<sup>1</sup>The coefficient of determination is a measurement of the fitting of a generalized linear statistical model, such as the linear regression, in relation to the observed values. The closer to the unit is  $R^2$ , the better is the fit of the experimental data to the proposed model.



(a)



(b)

Figure 3. (a) Variation of sensor's capacitance as a function of temperature, and; (b) error committed when calibrating the sensor at 20°C.

type. Therefore, normally, it is necessary to calibrate the sensor using the soil of interest. Then, in this same process, it would be also possible to calibrate the sensor in order to correct the effects of temperature. Nevertheless, this aspect is not dealt with in this paper.

### C. Influence of sensor's geometry

In making the sensor, it is important to choose its geometry in order to maximize its sensitivity, that is, aiming to increase the variation of the capacitance as a function of the quantity to be measured. Certainly, the larger the sensor's dimensions (width and length), the greater will be its sensitivity. Thus, according to the limitations of the application, the size of the sensor should be as large as possible. However, the choice of the width of the conductive tracks ( $w$ ) and the spacing between them ( $d$ ) is not so evident. Therefore, in this paper, the influence of these parameters was also examined through simulation.

In order to determine the influence of the distance between the copper tracks, the sensor was simulated with  $d$  ranging from 0.1 to 1.2 mm. The result of this simulation is shown in Figure 4(a). It can be seen that the capacitance of the sensor decreases rapidly as  $d$  increases.

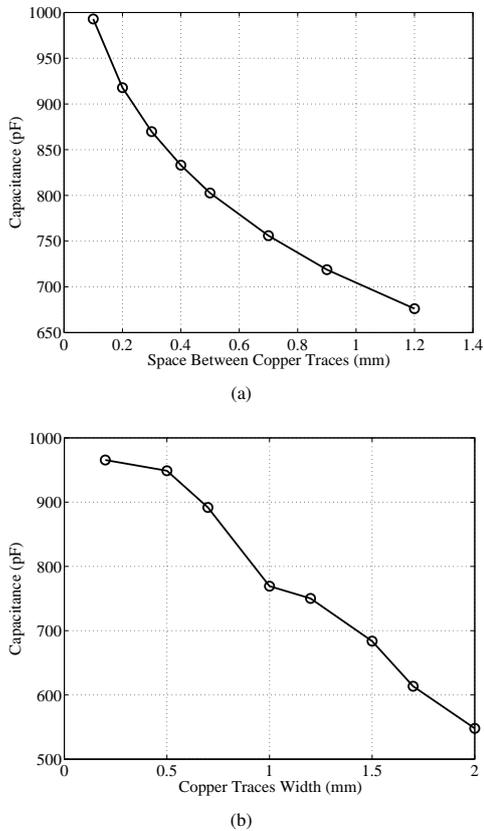


Figure 4. Capacitance of the sensor according to: (a) the space between the conductive tracks, and; (b) the width the tracks.

The influence of the width of the conductive tracks was evaluated by simulating the sensor with  $w$  ranging from 0.2 to 2.0 mm. The result of this simulation is shown in Figure 4(b). Again, it can be noted that the capacitance decreases rapidly as  $w$  increases.

According to the simulation results,  $d$  and  $w$  must be as small as possible, and explanation is as follows. In fringing field sensors, the capacitance is given mainly by the electromagnetic interaction between the edges of the two electrodes' conductive tracks. Thus, considering fixed-size sensor, the greater  $d$  (or  $w$ ), the smaller is the number of edges in the tracks of the electrodes, which reduces the value of the capacitance and hence its sensitivity. Also, this fact confirms the result already obtained from the analysis of the simulations discussed in Section II-A. However, with the current technology of printed circuits, there is a restriction on how small  $d$  and  $w$  can be (in order to prevent short circuits or faults/breaks in the conducting tracks). This limit depends on the equipments used in the manufacture of PCB, but they can be as small as 0.2 mm.

Figure 5 shows the field distribution in the vicinity of two sensors. The first one has  $d = 0.2$  mm and  $w = 0.2$  mm, while the second one has  $d = 0.2$  mm and  $w = 1.2$  mm. It can be seen in Figure 5(a) that the maximum field intensity occurs

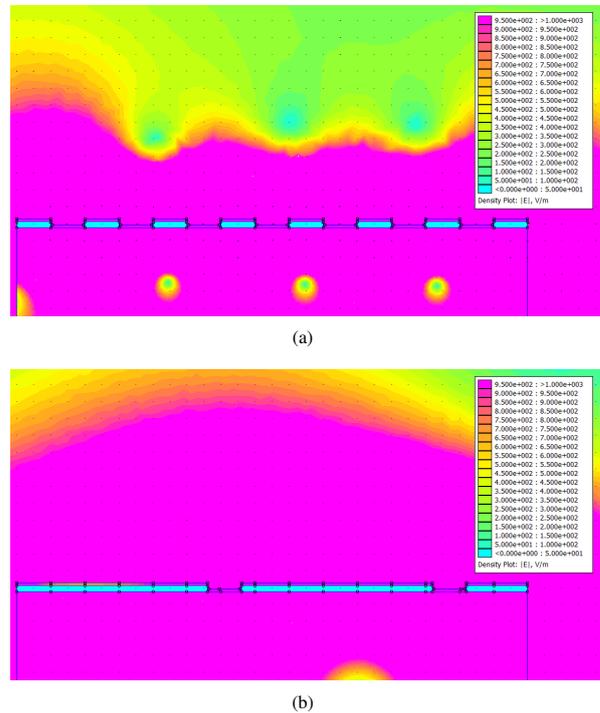


Figure 5. Simulation of the electric field intensity on the sensor's surface: (a) with  $d = 0.2$  mm and  $w = 0.2$  mm, and (b)  $d = 0.2$  mm and  $w = 1.2$  mm. (Light blue represents 0 V/m, while pink refers to 950 V/m or more.)

up to a distance of 0.42 mm from the sensor's surface, rapidly tending to 0 V/m. However, in Figure 5(b), the maximum electric field extends to 0.82 mm, still maintaining good levels of intensity at greater distances. This fact must be evaluated according to the desired application. If the goal is to collect data near the sensor's surface, a small value of  $w$  should meet the needs. However, if there is need for greater penetration into the material under test, one should choose a higher  $w$ .

### III. SIGNAL CONDITIONING

As already discussed, fringing field sensors vary their capacitance as a function of the quantity being measured. Most studies involving this kind of sensor use commercial measuring instruments to determine the capacitance, typically LCR meters with basic precision of 0.1% [8, 11]. That is because, depending on the geometry of the sensor, its capacitance may change less than 1 nF within its entire dynamic range. Thus, measuring this quantity with precision and without the use of commercial instruments is not a trivial task. Thus, many authors have different techniques. Saxena and Tayal [17] used a capacitive bridge, which requires a variable capacitor for adjustment, though. The solution proposed by Hazarika et al. [9], in turn, uses an oscillator based on the LM555 integrated circuit, from National Semiconductor®. However, this solution is not advantageous because, in this case, the oscillation frequency varies with the capacitance. This fact can lead to inaccuracies, since it is known that the dielectric

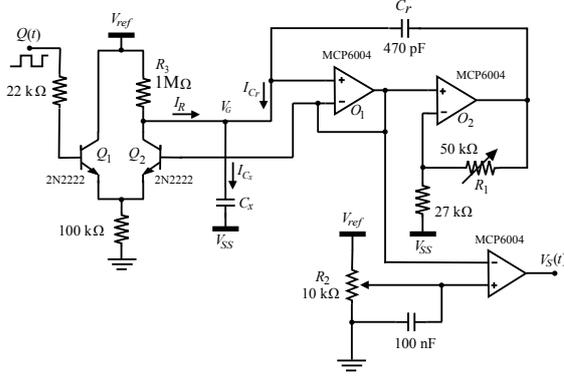


Figure 6. Signal conditioning circuit.

constant of the material under test has a relationship with the frequency at which the measurement is done [18]. Thus, it is ideal that the sensor be always excited at the same frequency. An alternative that satisfies this condition was used by Majid *et al.* [19], who proposed a circuit with the phase difference at the output is directly proportional to the capacitance of the sensor. However, this solution is quite complex and requires a sinusoidal oscillator, being more suitable for implementation in integrated circuits. In fact, in the literature one can find several other circuits for capacitance measurement, but most of them use techniques that are most appropriate for integrated circuit design (such as the use of switched capacitors) [20–23]. Two exceptions are the works of Baglio *et al.* [24] and Karlsson [25] who proposed circuits with output voltage proportional to the capacitance being measured. Unfortunately, however, these solutions apply only to small capacitance sensors, with a very narrow range of variation (of the order of pF).

In the present work, we adopted a very simple solution, as shown in Figure 6 [26]. Here, the sensor is excited with a constant frequency signal and converts the capacitance variation into a pulse width variation. As excitement, the circuit requires only a digital signal that can be easily generated by a microcontroller. Furthermore, the variation in pulse width has a wide dynamic range.

A square signal  $Q(t)$  (Figure 6) with period  $T$  is used to switch the differential pair formed by transistors  $Q_1$  and  $Q_2$ . When at high level,  $Q(t)$  generates a current  $I_R$  which contributes to charge of the capacitor charge  $C_x$  (the fringing field sensor). On the other hand, when at low level, the same signal causes the discharge of  $C_x$ . Thus, the voltage  $V_G$  oscillates with constant period which is also equal to  $T$ . Furthermore, the current that flows through the capacitor  $C_x$  is

$$I_{C_x} = I_R + I_{C_r}, \quad (2)$$

where  $I_{C_r}$  is the current through the reference capacitor  $C_r$ .

The potentiometer  $R_1$  is used to adjust the pulse width ( $T_{th}$ ) of the output signal  $V_S(t)$ . This is because the current  $I_{C_x}$  causes the voltage over  $C_x$  to reach a threshold voltage  $V_{th}$

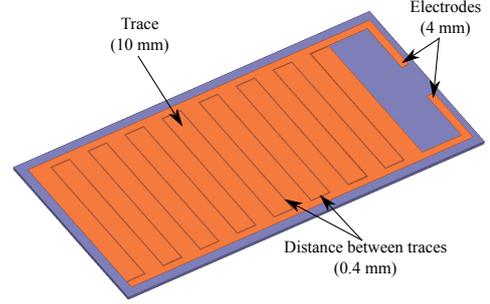


Figure 7. Sketch of the sensor used in the tests.

at a time equal to

$$T_{th} = R_3 C_x \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}.$$

Thus, from the above equation, (2) can be rewritten as

$$\frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}} + C_r \frac{d}{dt} (GV_G - V_G) = C_x \frac{dV_G}{dt},$$

where  $G$  is the feedback gain formed by the amplifiers  $O_1$  and  $O_2$ , which can be adjusted by the potentiometer  $R_1$ . Then, the above equation leads to

$$T_{th} = R_3 [C_x - (G - 1)C_r] \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}. \quad (3)$$

Thus, the pulse width of  $V_S(t)$  depends on the gain  $G$  and on the value of  $C_x$ . In this way,  $T_{th}$  is proportional to  $C_x$  and it is possible to set  $G$  so that  $T_{th} \approx 0$ , when  $C_x$  is minimum. Another advantage of this technique is that  $T_{th}$  may be easily measured with 16-bit resolution, even using a basic microcontroller. If the output of the circuit were voltage, it would be much more difficult to obtain such precision.

#### IV. EXPERIMENTAL RESULTS

In order to empirically validate some of the simulation results, we made a sensor as the one outlined in Figure 7. It has dimensions of  $10 \times 20$  cm and, at the upper surface, copper tracks with width of 10 mm and spacing between tracks of 0.4 mm. The opposite face is completely filled by a copper layer maintained at the reference potential (ground). This prevents the sensor's capacitance to suffer influence of any material that may come into contact with the bottom of the sensor.

Evidently, according to the results of Section II, the dimensions of this sensor ( $d$  and  $w$ ) are not the most suitable ones. However, they have been chosen so that a drop of water can occupy the space of a single track. In order to ensure the similarity between the simulations and this experiment, all constructive characteristics of the sensor (FR-4 substrate, solder mask application, among others), as presented in Section II, were maintained.

In our tests, the sensor was coupled to the circuit of Figure 6 and  $T_{th}$  (Section III) was measured using the internal timer (16-bit) of an MC9S08SH8 microcontroller (from Freescale). With the sensor completely dry, the minimum pulse width

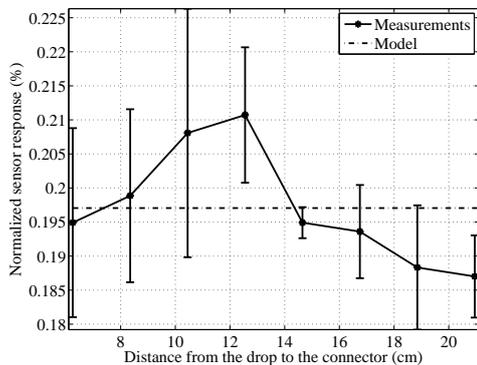


Figure 8. Variation of the sensor's capacitance as a function of the positioning of a single water drop over the sensor.

of  $V_S(t)$  was obtained, which is related to the minimum capacitance of the sensor. Similarly, with the sensor completely wet,  $T_{th}$  corresponding to the maximum capacitance was also measured. From these cases, we obtained a dynamic range of the sensor equal to  $1,713.23 \mu s$ . Moreover, by convention, in our test results, the sensor response is always shown as a percentage of the dynamic range.

The first test was to evaluate the repeatability of the sensor. With this purpose, a 0.5 ml water drop was placed on the sensing surface of the sensor with the aid of a 0.5 ml graduated pipette, which has an accuracy of  $\pm 0.01$  ml. Then, the corresponding pulse width was measured. The drops were placed in eight different positions of the sensor. For each position, the experiment has been repeated five times and the result is shown in Figure 8. By analyzing this figure, one can observe that a 0.5 ml water drop causes a variation of 0.197 % of the sensor's total dynamic range, with a variance of only  $149.731 \times 10^{-6}$  % and standard deviation of  $12.236 \times 10^{-3}$  %.

In order to experimentally analyze the variation of the sensor output with the amount of water on its surface, a total of 30 water drops, of 0.09 ml each, were gradually added. The first drop was placed completely over a single track of the sensor. The subsequent drop was positioned between two consecutive tracks, so staying over these tracks and the gap that separates them. This procedure was adopted successively until the 30 drops were placed and sensor was filled in. The result is shown in Figure 9. Each point in this figure corresponds to the average of five repetitions. (The standard deviation is not visible because it is of the order of 0.01 %.) One can see that, for a variation of 2.7 ml of water, the capacitance of the sensor changed almost 20 %. Moreover, by adjusting the experimental data using a linear model, we obtained a  $R^2 = 0.99$ . This fit is better than that one obtained through simulation (Section II-A). This is due to the fact that, in the simulation, the water filled the entire track of the sensor, instead of a single drop. Therefore, the steps in the graph of Figure 2 are much more pronounced.

Now, in order to experimentally evaluate the variation of the sensor with temperature, the sensor was put into a heater. Then

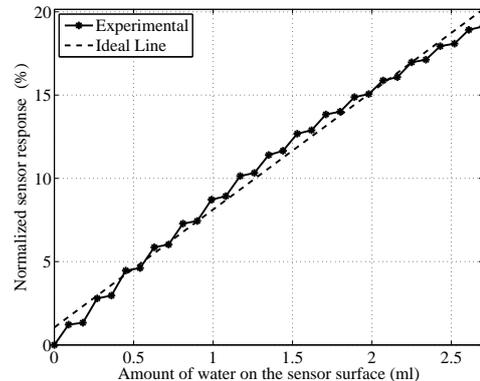


Figure 9. Variation of the sensor's capacitance according to the amount of water on its surface.

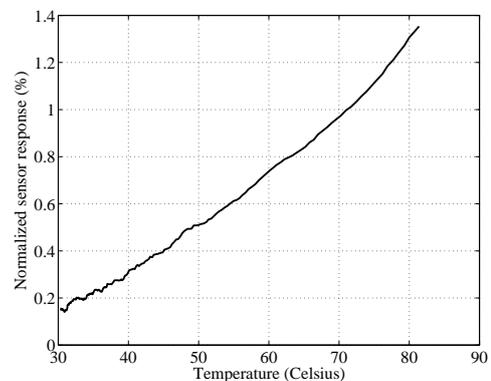


Figure 10. Variation of capacitance as a function of the sensor's temperature.

$T_{th}$  was measured while the temperature of the heater varied from 82 to 30 °C. This experiment lasted for approximately three hours. The result is shown in Figure 10. The analysis of this figure allows us to observe that, for a temperature change of 52 °C, the capacitance of the sensor changed only 1.4 %. This variation is smaller than the one obtained through simulation, but this is because it is expected that such variation be greater when the sensor is wet, as discussed in Section II-B, since the dependence of the water dielectric constant with the temperature increases.

#### A. Measurement of the Soil Water Content

In the previous section, water was used as the dielectric. In this section, we examine the behavior of the sensor when it is used to quantify the water concentration<sup>2</sup> in the soil. The soil is a very heterogeneous mixture and is usually divided into three parts: solid, gaseous and liquid. The solid portion consists of mineral and organic matter. In turn, the gaseous portion consists of air, whose composition depends on the biological activity. Finally, the liquid part consists of a solution of mineral

<sup>2</sup>Here, we considered concentration as the fraction of free water in a given soil sample.

Table II  
SOIL WATER CONTENT: DESIRED ( $C_t$ ) AND REAL ( $C_p$ ) MEASURED BY THE GRAVIMETRIC METHOD.

$C_t$ (%)	10	15	20	25	30	35	40
$C_p$ (%)	8.96	13.24	18.02	22.90	27.61	32.44	37.14

salts and organic compounds, whose concentration varies with soil type and its water content [27]. Furthermore, the water present in the soil can occur in different forms: adsorbed, free (absorbed) and capillary. The adsorbed water is attached to the surfaces of the soil particles through electrostatic forces, being not moving within the porous mass. The free (absorbed) water is the one that can move without obstacles other than those imposed by its viscosity and by the soil structure. Lastly, the capillary flow of water is the water portion arising from groundwater [27] and thus it can be neglected in laboratory experiments. The specimens used in this experiment were prepared from a 21 kg disturbed soil sample, which was collected at a 2 m depth of a well in an experimental area of Geotechnical Engineering, at Londrina State University, in Londrina (Brazil). The soil of this region is mainly composed of dark-red, silty, laterite clay, with 55% of clay and 23% of silt in its granulometric composition, which has solid specific mass of  $3.0 \text{ g/cm}^3$  and liquidity limits and plasticity index of approximately 52% and 13.5%, respectively [28].

After collecting the soil sample, by following the recommendation of ISO 23209/2008 [29] about preliminary operations to prepare samples for characterization assay with previous drying, we obtained seven parts with about 3 kg each. Then we determined, according to the same standard, the concentration of water in each part and we calculated the mass of water to be added in order to obtain seven specimens with different moisture contents. Each of them was prepared in order to reach a certain theoretical water concentration ( $C_t$ ). However, the actual water concentration ( $C_p$ ) can only be determined by the gravimetric method<sup>3</sup> [30] due to its rapid evaporation. To perform the gravimetric test, we used a scale with a precision of 0.01/0.1 g and a heater with controlled temperature at 105 °C. The theoretical and real water concentrations of the seven specimens are presented in Table II.

The soil has a dielectric constant which is significantly lower than the one of water. Thus, in order to increase the sensitivity, we chose to build a sensor with the dimensions shown in Table III. The distance  $d$  was chosen by limitation of the sensor manufacturing method, while  $w$  was defined according to the results of Section II-C, so that the field lines have a high intensity up to a distance of about 0.5 mm from the sensor. Also, for the measurements of the sensor's capacitance during the tests, we made a PVC sample holder (Figure 11). One may notice in this figure that it is possible to use the sensor even with the sample holder closed, while it remains in contact with the ground but completely isolated from the

<sup>3</sup>In this method, the collected sample of soil is, first, weighed wet. Then it is left in an oven for drying at a constant temperature during a period of 36 hours. After, the sample is reweighed and the ratio between the two obtained masses (before and after drying) represents the relative humidity of the soil in this sample.

Table III  
DIMENSIONS OF THE SENSOR THAT WAS MADE FOR MEASURING THE WATER CONCENTRATION IN THE SOIL.

Property	Value
Width of copper tracks	1.25 mm
Distance between the copper tracks	0.35 mm
Total length of the sensor	236 mm
Total width of the sensor	67 mm
Total number of copper tracks	128

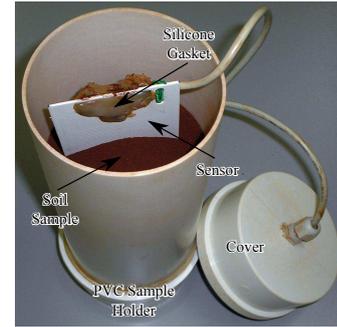


Figure 11. Soil and sensor positioned on the sample holder to perform the tests.

external environment. During each test, the sensor and the soil sample remained in the sample holder for 10 minutes. Meanwhile, again with the aid of the circuit described in Section III, the capacitance of the sensor was inferred at every 20 seconds by measuring the pulse width  $T_{th}$ . Then, after 10 minutes, we considered  $T_{th}$  as the average of 30 measured values.

Due to the complexity of the soil, the capacitance of the sensor can also be influenced by other factors (gaps, gases, etc.), besides the concentration of water in this dielectric. In order to reduce the influence of these other factors in the experiment, we repeated the same test three times for each water concentration in soil ( $C_p$ ), but with different soil samples (Table II). Furthermore, from the total set of 21 tests, three *outliers* were eliminated. The result is shown in Figure 12. By analyzing this figure, one can observe that the greater the value of  $C_p$ , the greater is the variance of the capacitance from one test to another. However, a soil water concentration above 25 % is already quite wet, and can be regarded as saturated for many applications. Moreover, the 17 inliers of the experiment fit a linear model with  $R^2 = 0.94$  (Figure 12). Thus, the technique appears to be very promising.

With 17 inliers of the previous experiment, the sensor was calibrated. After, the water content of 21 other samples (three of them for each value in Table II) was measured by the proposed sensor. The value measured by the sensor and the one considered as real are shown in Figure 13. The measurements taken with the sensor fit to the ideal model with  $R^2 = 0.94$  and a mean error of  $\pm 3.5\%$ .

It is noteworthy that, with more than 21 soil samples, it would be possible to better characterize the proposed sensor. In this work, the use of a few samples in the sensor calibration process was mainly due to the time required to calculate the

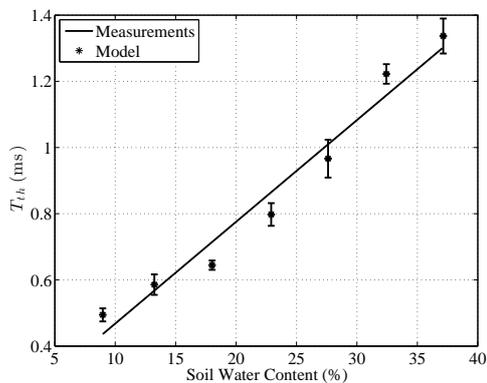


Figure 12. Concentration of water in the soil versus  $T_{th}$ .

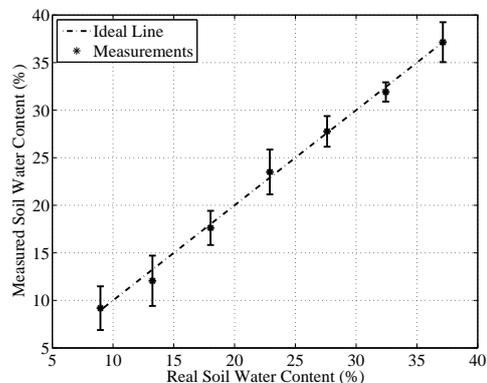


Figure 13. Soil water content obtained by the gravimetric method versus the one obtained by the calibrated proposed sensor.

water content by gravimetric method. However, the research objective was mainly to develop a rapid and low-cost sensor. This is because an inexpensive and easy-to-manufacture sensor makes it economically feasible to distribute a larger number of measurement points, making it possible to have a farming area with more uniform water content measurements. In the application, that is more important than a higher accuracy, since a difference of, for example, 5% in soil properties does not cause significant difference in crop productivity.

## V. CONCLUSIONS

Fringing field capacitive sensors with interdigitated electrode structure allow non-invasive measurements, since they project the electric field onto the test samples. However, the larger the electrode teeth width, the longer the distance where these field lines are projected. On the other hand, the capacitance of the sensor depends on how small are the width of these electrodes and the distance between neighbor electrodes. In addition, when the sensor is completely covered by water, its capacitance may vary up to 5% due to temperature. This same variation does not reach 1.5% when the sensor is completely dry. The capacitance of the sensor was found to be fairly linear with the amount of water on its surface (except when water

remains completely over one of its electrodes). Finally, the sensor showed up able to quantize the water present in soil samples and had an excellent correlation with the standard gravimetric method.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank CAPES, CNPq, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Fundação Araucária and FAEPE/Uel for funding the research.

## REFERENCES

- [1] C. G. Xie, A. L. Stott, A. Plaskowski, and M. S. Beck, "Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow," *Measurement Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 65–78, 1989.
- [2] C. Xie, S. Huang, B. Hoyle, R. Thorn, C. Lenn, D. Snowden, and M. Beck, "Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors," *Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings G*, vol. 139, no. 1, pp. 89–98, Feb 1992.
- [3] O. Isaksen, "A review of reconstruction techniques for capacitance tomography," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 325–337, 1996.
- [4] H. Golnabi, "Simple capacitive sensors for mass measurements," *Review of Scientific Instruments*, vol. 68, no. 3, pp. 1613–1617, Mar 1997.
- [5] F. Dewarrat, L. Falco, A. Caduff, M. Talary, Y. Feldman, and A. Puzenko, "Measurement and simulation of conductive dielectric two-layer materials with a multiple electrodes sensor," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 5, pp. 1406–1414, October 2008.
- [6] A. Tocchio, G. Langfelder, A. Longoni, and E. Lasalandra, "In-plane and out-of-plane mems motion sensors based on fringed-capacitances," *Procedia Engineering*, vol. 5, p. 1392–1395, Septembre 2010.
- [7] G. Langfelder and A. Tocchio, "Differential fringe-field mems accelerometer," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, no. 2, pp. 485–490, February 2012.
- [8] R. Dean, A. Rane, M. Baginski, J. Richard, Z. Hartzog, and D. Elton, "A capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 4, pp. 1105–1112, April 2012.
- [9] D. Hazarika, S. Laskar, A. Sarma, and P. Sarmah, "Pebased instrumentation system for the detection of moisture content of tea leaves at its final stage," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 5, pp. 1641–1647, 2006.
- [10] K. Sundara-Rajan, L. Byrd, and A. V. Mamishev, "Moisture content estimation in paper pulp using fringing field impedance spectroscopy," *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 71–78, January 2004.
- [11] R. McIntosh and M. Casada, "Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 240–247, 2008.
- [12] S. Mukhopadhyay, C. P. Gooneratne, G. Sen Gupta, and S. Demidenko, "A low-cost sensing system for quality monitoring of dairy products," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, pp. 1331–1338, Aug 2006.
- [13] X. Li, G. Rowe, V. Inclan, and A. Mamishev, "Nondimensionalized parametric modeling of fringing electric-field sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1602–1608, Dec 2006.
- [14] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics (FEMM), Version 4.2 (25Aug2013 Build)," 2010.
- [15] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90th ed. CRC Press, 2009.

- [16] K. Roth, R. Schulin, H. Fluhler, and W. Attinger, "Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach," *Water Resources Research*, no. 26, pp. 2267–2273, 1990.
- [17] S. C. Saxena and G. M. Tayal, "Capacitive moisture meter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-28, no. 1, pp. 37–39, 1981.
- [18] S. Wu, Q. Zhou, G. Wang, L. Yang, and C. Ling, "The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content," *Environmental Earth Sciences*, vol. 62, pp. 999–1011, 2011.
- [19] H. A. Majid, N. Hazali, M. S. Sulaiman, and A. K. A'ain, "A capacitive sensor interface circuit based on phase differential method," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 55, pp. 630–633, 2009.
- [20] B. George and V. J. Kumar, "Analysis of the switched-capacitor dual-slope capacitance-to-digital converter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 5, pp. 997–1006, May 2010.
- [21] A. Heidary and G. C. M. Meijer, "Features and design constraints for an optimized sc front-end circuit for capacitive sensors with a wide dynamic range," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, no. 7, pp. 1609–1616, July 2008.
- [22] X. Li and G. C. M. Meijer, "An accurate interface for capacitive sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 5, pp. 935–939, October 2002.
- [23] X. Shi, H. Matsumoto, and K. Murao, "A high-accuracy digital readout technique for humidity sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 5, pp. 1277–1282, October 2001.
- [24] S. Baglio, S. Castorina, G. Ganci, and N. Savalli, "A high sensitivity conditioning circuit for capacitive sensors including stray effects compensation and dummy sensors approach," in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 2, May 2004, pp. 1542–1545.
- [25] N. Karlsson, "A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 6, pp. 1122–1124, December 1999.
- [26] Z. Ignjatovic and M. F. Bocko, "An interface circuit for measuring capacitance changes based upon capacitance-to-duty-cycle (cdc) converter," *IEEE Sensors J.*, vol. 5, no. 3, pp. 403–410, June 2005.
- [27] M. Kirkham, *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier Academic Press, 2004.
- [28] T. T. Rodriguez, R. S. Teixeira, F. Fernandes, O. M. O. Jr, F. M. Beraldo, E. T. Komori, and D. H. Danziger, "Estudo da compactação de lodo de eta para uso em aterros sanitários," in *VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, 2011.
- [29] ISO, "Soil quality – Preparation of laboratory samples from large samples," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISO 23909, 2008.
- [30] —, "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISO/TS 17892-1, 2004.



**Jaime Mizuguchi** is graduated in Computer Engineering (2006) from the University of Mogi das Cruzes (UMC). Currently, he is a student of the Master's Course in Electrical Engineering from the State University of Londrina (UEL). Since 2012 he is a fellow researcher at the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation (LA2I) of UEL, and he has experience in Electronic Instrumentation, Computer and in the development of embedded systems and instruments for data collection.



**Juliani Chico Piai** received the degree in Electrical Engineering from State University of Londrina (UEL), Brasil, in 2006, and the Master degree in Electrical Engineering from UEL in 2009. She is currently professor and member of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation of UEL. His research interests involve soil moisture sensors, electronic instrumentation, precision agriculture and energy.



**José Alexandre de França** received the degree in Electrical Engineering from Federal University of Campina Grande (UFCG), Brasil, in 1995; Master degree in Electrical Engineering from UFCG in 1997; Doctor degree in Electrical Engineering from Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil, in 2005. He is currently professor and leader of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation (LA2I), State University of Londrina, Brazil. His areas of interest involves ultrasonic anemometers, soil moisture sensors, near infrared spectroscopy, electronic instrumentation, precision agriculture, calibration of cameras and computer vision.



**Maria Bernadete de M. França** received the degree in Electrical Engineering from Federal University of Campina Grande (UFCG), Brasil, in 1996 and Master degree in Electrical Engineering from UFCG in 1998. Currently, she is a professor and researcher of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation, State University of Londrina, Brazil. Her research interests involve electronic instrumentation, microelectronics and precision agriculture.



**Karina Yamashita** is a student of Electrical Engineering from State University of Londrina (UEL), Brazil, since 2008. In 2012, she became a scientific initiation researcher at the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation (LA2I) of UEL, assisting in research projects and developing new sensors and data acquisition systems for use in precision agriculture.



**Luis Carlos Mathias** Received the degree in Physics (2007) and Master degree in Electrical Engineering (2013) from State University of Londrina (UEL). He has been a Professor and Coordinator of the Industrial Instrumentation Technical Course from Professional Education Center of SENAI, Ponta Grossa, Brazil. He also has experience in Industrial Electronics Maintenance and Electronics Projects involving Microcontrollers and Digital Signal Processors.

# SENSOR PENTE CAPACITIVO APLICADO À DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

JAIME MIZUGUCHI\*, JULIANI CHICO PIAT\*, JOSÉ ALEXANDRE DE FRANÇA\*, MARIA B. DE MORAIS FRANÇA\*, KARINA YAMASHITA\*, LUIS CARLOS MATHIAS\*

\*Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente - Departamento de Engenharia Elétrica -  
Universidade Estadual de Londrina  
Caixa Postal 10039, Londrina, PR, 86057-970, Brasil

Emails: jaime.mizu@gmail.com, jpiai@uel.br, jaf@jaf.eng.br, mbmorais@uel.br,  
karina\_yamashita@hotmail.com, luis.mathias@uel.br

**Abstract**— Capacitors are used as sensors in several applications. Typically, the quantity to be measured changes either the geometric properties of the structure used as a capacitive sensor or the physical properties of the dielectric between the electrodes of that structure. The sensor proposed here uses the fringing fields effect of the capacitor finite plates. In this case, the electric field can be projected onto the test sample, providing a non-invasive measurement. This paper covers the usage of fringing field sensors to measure the water present in the soil, important information for areas such as geotechnical and agronomy, among other. The interdigitated electrode structure was analysed, as well as a circuit that converts the changes in the sensor's capacitance into variations in the width of a pulse signal. Finally, the proposed solution has been experimentally compared with the standard gravimetric method to quantify the water content in the soil. The results were encouraging since the proposed sensor's measurements fit to the experimental data with a coefficient of determination  $R^2 = 0,94$ .

**Keywords**— Interdigital Electrodes; Moisture Measurement; Nondestructive Measurement.

**Resumo**— Capacitores são utilizados como sensores nas mais diversas aplicações. Normalmente, a grandeza a ser medida altera as propriedades geométricas de uma estrutura capacitiva ou as propriedades físicas do dielétrico entre os eletrodos desta mesma estrutura. O sensor aqui proposto utiliza o efeito de campo de borda das placas finitas de um capacitor plano. Neste caso, o campo elétrico é projetado para dentro da amostra em análise, garantindo uma medição não invasiva. Neste artigo, este tipo de sensor é utilizado na quantificação da água presente no solo, importante informação para áreas como geotecnia e agronomia, entre outras. A estrutura interdigitada do sensor foi apresentada, bem como um circuito que transforma a variação na capacitância em uma alteração na largura de um sinal pulsado. Por fim, a solução proposta foi comparada experimentalmente com o método gravimétrico padrão para quantificação de água no solo. Os resultados foram animadores, pois as medições do sensor proposto ajustou-se aos dados experimentais com coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,94$ .

**Palavras-chave**— Eletrodos Interdigitados; Medidas de Umidade; Medidas Não Destrutivas

## 1 Introdução

A determinação da umidade do solo é um processo de grande relevância, visto a diversidade de interesses e aplicações, tanto agrícolas (produção de alimentos, madeiras, fibras, etc), quanto para aterramento elétrico, fabricação de telhas e tijolos, geotecnia, entre outros (dos Santos et al., 2005). Os métodos para determinação da umidade do solo podem ser classificados em diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos, que se caracterizam por análise de amostras de solo deformado ou não deformado, e necessitam de equipamentos laboratoriais, está o método padrão chamado gravimétrico. Já os indiretos, que podem causar alterações das propriedades físicas e químicas dos solos, utilizam sensores.

O método gravimétrico baseia-se na coleta de amostras do solo, que são levadas a laboratório para pesagem e secagem. O processo é lento e o resultado pode ser estabelecido após, no mínimo, 24 horas. Além disso, são necessárias balança de precisão e estufa, tornando o processo custoso (ISO, 2004).

Dentre os métodos indiretos, está o sensor TDR (*Time - Domain Reflectometry*), cuja téc-

nica é baseado na análise do comportamento da constante dielétrica do solo  $Ka$  a partir da variação do tempo de propagação de uma onda eletromagnética. Isto é possível devido a diferença entre as constantes dielétricas da água, do ar e do material sólido no solo (Roque, 2008).

Os sensores FDR (*Frequency - Domain Reflectometry*) são constituídos basicamente por um par de anéis metálicos (eletrodos) acoplados a um capacitor. Para que um campo elétrico seja gerado entre os dois eletrodos atingindo o solo, é necessário a utilização de um circuito oscilador  $LC$  ( $L$  = indutor e  $C$  = capacitor) para polarizar as moléculas de água. Assim, as trocas de frequência do oscilador acontecem livremente, uma vez que só depende da variação da capacitância na matriz do solo, ou seja, quanto maior o teor de água no solo, maior será o valor da capacitância e de  $Ka$ , desta forma, menor será a frequência. (Technologies, 2009).

O sensor capacitivo é um dos mais utilizados nesta classificação. O seu princípio de funcionamento é baseado na medição da constante dielétrica do solo  $K$ . Esta medição é realizada através do valor da capacitância entre dois eletrodos implantados no solo. A matriz solo-água-ar forma o

meio dielétrico do capacitor. Uma vez que a distância entre eles sejam fixas no sensor, a tendência é que a capacitância varie consideravelmente conforme a variação do número de moléculas de água livres, de acordo com o campo elétrico criado pelo capacitor e aplicado ao meio (Eller and Denoth, 1996).

No entanto, o presente artigo propõe um sensor capacitivo diferente do apresentado anteriormente. Basicamente, o sensor pente capacitivo é composto por faixas de cobre interdigitadas. Devido a finitude destas faixas paralelas, as linhas de campo elétrico passam a se estender além do substrato, atingindo o material posicionado sobre ele. Isto permite medições não-invasivas, onde os eletrodos do capacitor estão completamente isolados da substância em análise.

Outra vantagem desta estrutura é a sua facilidade de confecção. Ela pode ser totalmente produzida usando apenas a tecnologia de placas de circuito impresso (PCI), o que permite, inclusive, que qualquer eletrônica adicional (necessária para determinação da capacitância) seja incluída no próprio corpo do sensor. Evidentemente, estas características tornam os sensores pente capacitivos muito populares, principalmente na quantificação de água. Isto porque a constante dielétrica desta é muito superior a da maioria das outras substâncias. Assim, uma variação na concentração de água provoca uma significativa alteração no campo elétrico e, conseqüentemente, na capacitância do sensor. Por isso, estes sensores já foram utilizados para quantificar água no solo (Dean et al., 2012), em folhas de chá (Hazarika et al., 2006), em papel (Sundara-Rajan et al., 2004) e outras commodities (McIntosh and Casada, 2008; Mukhopadhyay et al., 2006).

O objetivo principal da pesquisa é desenvolver um sistema rápido e de baixo custo para quantificar a água presente no solo. Por isto, examina-se a geometria da estrutura interdigitada fabricada em PCI. Discute-se também um circuito que converte a variação da capacitância do sensor na largura de um sinal pulsado. Além de excitar o sensor com uma frequência sempre constante, os parâmetros deste circuito podem ser ajustados de forma que a largura do pulso seja feita bem próxima de zero quando a quantidade de água é mínima. Por fim, a solução proposta foi comparada experimentalmente com o método gravimétrico padrão. Os resultados foram animadores, pois as medições do sensor proposto ajustaram-se aos dados experimentais com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,94$ .

## 2 Sensor proposto para determinação da umidade do solo

O sensor capacitivo de campo de borda ou pente capacitivo possui uma estrutura com  $n$  faixas de

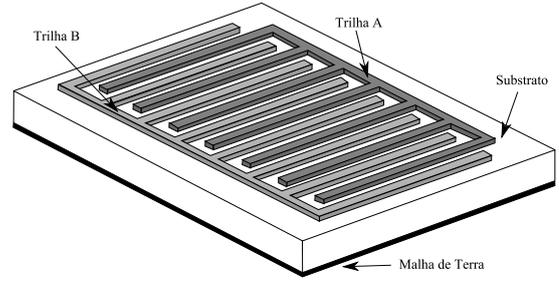


Figura 1: Sensor Capacitivo de Campo de Borda.

cobre posicionadas em paralelo, separadas por uma distância  $d$  e depositadas em um substrato. Estas faixas são conectadas eletricamente, de forma alternada, a um dos dois braços de eletrodo. Cada um dos braços possui um nível de tensão elétrica, e esta diferença de potencial, adicionada a finitude das faixas paralelas, faz com que as linhas de campo se espalhem pelo material sob teste. Uma malha de terra preenche toda a superfície oposta aos eletrodos (Figura 1). Isto evita que qualquer substância, em contato com esta face da placa, influencie na capacitância do sensor.

O substrato utilizado é composto, essencialmente, de um material chamado FR-4 que, por sua vez, é formado basicamente de várias camadas de fibra de vidro, unidas por um polímero epóxi, o que lhe dá a propriedade de retardar a propagação de chamas. Estes substratos de FR-4 podem ser encontradas em uma variedade de espessuras, mas a mais comum é em torno de 1,57 mm. Já as faixas são tipicamente de cobre e tem espessuras que vão de 17,78 a 71,12  $\mu\text{m}$  e largura que, dependendo do processo de confecção, podem ser tão finas quanto 100  $\mu\text{m}$  (Dean et al., 2012). Estas faixas são cobertas por um verniz isolante, chamado de máscara de solda, que tem como função primária evitar curto-circuito.

Para determinar a melhor geometria do sensor, simulações foram realizadas utilizando o software livre FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), um programa para resolver problemas em duas dimensões aplicando técnicas de elementos finitos (Meeker, 2010).

## 3 Condicionamento do sinal

A grande maioria dos trabalhos envolvendo sensores do tipo pente capacitivo utiliza instrumentos de medição comerciais, normalmente ponte LCR, com exatidão básica de 0,1%, para determinar a capacitância (Dean et al., 2012; McIntosh and Casada, 2008). Isto ocorre porque, dependendo da geometria do sensor, a variação da capacitância pode ser menor que 1 nF, exigindo exatidão do instrumento.

Para instrumentar o sensor permitindo o seu uso fora dos laboratórios, diversos autores dispõem de diferentes técnicas. Saxena and Tayal (1981)

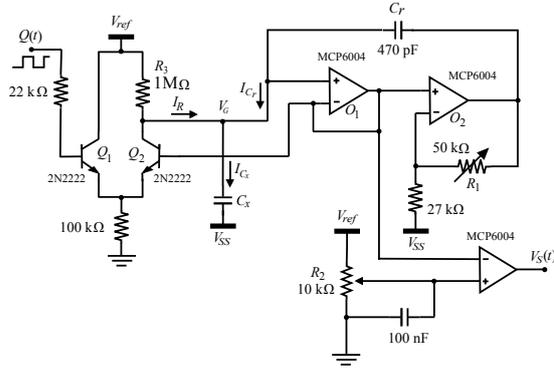


Figura 2: Circuito condicionador de sinal.

utilizaram uma ponte capacitiva, mas que necessita de um capacitor variável para ajuste. Já a solução proposta por Hazarika et al. (2006) utiliza um oscilador baseado no circuito integrado LM555, da National Semiconductor®. Contudo, tal solução não é vantajosa, pois neste caso, a frequência de oscilação varia com a capacitância, interferindo na medida (Wu et al., 2011). O ideal é que o sensor esteja excitado sempre na mesma frequência. Uma alternativa que satisfaz esta condição foi utilizada por (Majid et al., 2009), que propôs um circuito cuja diferença de fase na saída é diretamente proporcional a capacitância do sensor. Contudo, tal solução é bastante complexa e exige um oscilador senoidal, sendo mais indicada para implementação em circuitos integrados. De fato, na literatura, é possível encontrar vários outros circuitos para medição de capacitância, mas a maioria deles utiliza técnicas mais adequadas para uso em projeto de circuitos integrados (George and Kumar, 2010; Heidary and Meijer, 2008; Li and Meijer, 2000; Li and Meijer, 2002; Shi et al., 2001). Uma exceção é o trabalho de Baglio et al. (2004) e Karlsson (1999), que propuseram circuitos com saída em tensão proporcional à capacitância a ser medida. Contudo, tais soluções aplicam-se apenas a sensores de pequenas capacitâncias, com uma faixa muito estreita de variação (da ordem de pF).

No presente artigo, adotou-se uma solução bastante simples, Figura 2 (Ignjatovic and Bocko, 2005). Nela, o sensor é excitado com um sinal de frequência constante e transforma a variação de capacitância em uma variação de largura de pulso. O circuito exige, como excitação, apenas um sinal digital, que pode ser gerado facilmente por um microcontrolador. Além disto, a variação na largura de pulso apresenta uma grande faixa dinâmica.

Um sinal quadrado  $Q(t)$  (Figure 2) e de período  $T$  é usado para chavear o par diferencial formado pelos transistores  $Q_1$  e  $Q_2$ . Quando em nível alto,  $Q(t)$  gera uma corrente  $I_R$  que contribui para a carga do capacitor  $C_x$  (o sensor pente capacitivo). Por outro lado, quando em nível baixo, este

mesmo sinal provoca a descarga de  $C_x$ . Assim, a tensão  $V_G$  oscila com período constante também igual a  $T$ . Além disto, a corrente que atravessa o capacitor  $C_x$  é

$$I_{C_x} = I_R + I_{C_r}, \quad (1)$$

onde  $I_{C_r}$  é a corrente que atravessa o capacitor de referência  $C_r$ .

O potenciômetro  $R_1$  é usado para ajustar a largura de pulso ( $T_{th}$ ) do sinal de saída,  $V_S(t)$ . Isto porque a corrente  $I_{C_x}$  faz com que a tensão sobre  $C_x$  atinja um limiar  $V_{th}$  em um tempo igual a

$$T_{th} = R_3 C_x \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}.$$

Assim, da equação anterior, pode-se reescrever (1) como sendo

$$\frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}} + C_r \frac{d}{dt}(GV_G - V_G) = C_x \frac{dV_G}{dt},$$

onde  $G$  é o ganho da realimentação formada pelos amplificadores  $O_1$  e  $O_2$ , que pode ser ajustado pelo potenciômetro  $R_1$ . Então, a equação anterior leva a

$$T_{th} = R_3 [C_x - (G - 1)C_r] \ln \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{th}}. \quad (2)$$

Desta forma, a largura do pulso de  $V_S(t)$  depende do ganho  $G$  e do valor de  $C_x$ . Assim,  $T_{th}$  é proporcional a  $C_x$  e é possível ajustar  $G$  para que  $T_{th} \approx 0$ , quando  $C_x$  for mínimo. Outra vantagem desta técnica é que  $T_{th}$  pode ser facilmente medido com 16 bits de exatidão, mesmo usando um microcontrolador básico. Caso a saída do circuito fosse em tensão, tal exatidão seria muito mais difícil de ser obtida.

## 4 Resultados

### 4.1 Simulação

O objetivo das simulações foi determinar como a quantidade de água influencia na capacitância do sensor e a sua sensibilidade. Para isto, foram simuladas diversas situações com lâminas de água envolvendo (total ou parcialmente) a superfície sensível, utilizando o software FEMM. A água foi usada nas simulações não apenas porque o objetivo final desta pesquisa é medir o teor de água no solo, mas também por a quantidade de água ser a grandeza mais medida com os sensores pente capacitivos. Isto se deve principalmente ao fato da constante dielétrica da água ser muito maior que a da maioria das substâncias, o que faz este tipo de sensor ser muito sensível nestas aplicações.

Durante as simulações, as propriedades do sensor são sempre aquelas apresentadas na Tabela 1. Para avaliar a dependência da capacitância do sensor com a quantidade de água em sua superfície, porções de água foram posicionadas sobre

Tabela 1: Propriedades do sensor usado na simulação.

Propriedade	Valor
Largura das faixas de cobre	1,12 mm
Altura das faixas de cobre	36 $\mu\text{m}$
Distância entre as faixas de cobre	0,1 mm
Altura do substrato	1,575 mm
Altura da máscara de solda	16,9 $\mu\text{m}$
Altura da lâmina de água	1,372 mm
Comprimento total do sensor	61 mm
Largura total do sensor	57 mm
Número total de faixas de cobre	50
Temperatura	20°C
Constante dielétrica do ar	1,00059
Constante dielétrica da água	80,34

o lado sensitivo do sensor, de forma gradativa, variando a área molhada de 0 até 100 %. Cada porção de água foi alocada em duas posições distintas: completamente sobre uma das faixas de cobre ou exatamente na região central entre duas faixas vizinhas. Também, cada porção de água tem largura idêntica as das faixas condutoras. O resultado desta simulação é apresentado no gráfico da Figura 3. Observa-se que existem algumas regiões nas quais, mesmo aumentando a quantidade de água, a capacitância permanece praticamente constante. Isto acontece sempre que a porção de água adicionada está posicionada completamente sobre uma das faixas de cobre. Na prática, isto poderá ocorrer sempre que o diâmetro da porção de água for menor ou igual a largura das faixas condutoras do sensor. Por outro lado, se uma gota estiver posicionada entre duas faixas, na região onde as linhas de campo se formam, existe alteração (de forma linear) no valor da capacitância (Figura 3). Portanto, para que o sensor funcione como desejado, é necessário o contato do material sob teste (no caso água) com as linhas de campo. Isto só ocorre onde existe uma diferença de potencial, ou seja, na região onde as faixas de cobre são separadas por uma pequena distância. Assim, na prática, para aumentar a sensibilidade e a linearidade do sensor, o mesmo deve ser confeccionado com faixas condutoras tão estreitas quanto possível, garantindo que as linhas de campo se formem em espaços muito pequenos.

Apesar da característica do sensor de apresentar os patamares (referentes as porções de água totalmente sobre uma das faixas) vistos na Figura 3, o gráfico pode ser modelado por uma reta com coeficiente de determinação igual a  $R^2 = 0,97$ .

Com base nestes resultados, a geometria definida para a construção do sensor a ser utilizado nos experimentos foi a apresentada na Tabela 2. Algumas variações foram realizadas para facilitar o processo de fabricação e os experimentos em laboratório.

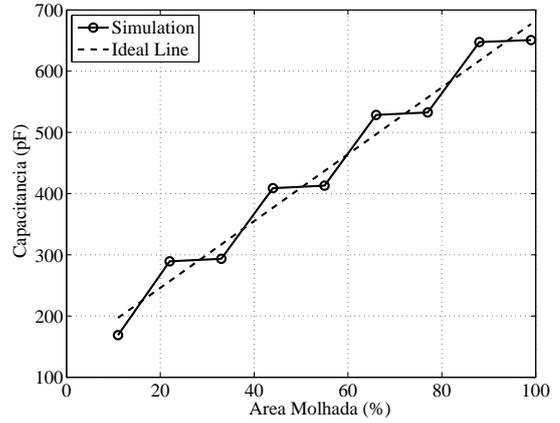


Figura 3: Variação da capacitância do sensor em função do posicionamento das porções de água.

Tabela 2: Dimensões do sensor construído para medição da concentração de água no solo.

Propriedade	Valor
Largura das faixas de cobre	1,25 mm
Distância entre as faixas de cobre	0,35 mm
Comprimento total do sensor	236 mm
Largura total do sensor	67 mm
Número total de faixas de cobre	128

#### 4.2 Experimentais

Nesta seção, examina-se o comportamento do sensor na determinação da quantidade<sup>1</sup> de água presente no solo. O solo é uma mistura bastante heterogênea e normalmente dividida em três partes: sólida, gasosa e líquida. A parte sólida constitui-se de matéria mineral e orgânica. Por sua vez, a gasosa é formada de ar, cuja composição depende das atividades biológicas. Já a fase líquida é constituída de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos, cuja concentração varia com o tipo de solo e seu teor de água (Kirkham, 2004). Esta fase líquida pode se apresentar de diferentes formas no solo: adsorvida, livre (absorvida) e capilar. A água adsorvida está ligada as superfícies das partículas do solo por meio de forças eletrostáticas, não se movendo no interior da massa porosa, e será desprezada neste experimento porque o solo utilizado foi deformado<sup>2</sup>. Por sua vez, a água livre (absorvida) é aquela que pode se mover, sem outro obstáculo senão aqueles impostos por sua viscosidade e pela estrutura do solo. Finalmente, o fluxo de água capilar representa a porção de água advinda dos lençóis freáticos (Kirkham, 2004), sendo desconsiderada em experimentos de laboratório.

Os corpos de prova utilizados foram preparados a partir de uma amostra de 21 kg de solo deformado, coletada a uma profundidade de 2 m,

<sup>1</sup>Aqui, considerou-se esta quantidade como sendo a fração de água livre em uma determinada amostra de solo.

<sup>2</sup>Amostra de solo retirada com a destruição ou modificação apreciável de suas características *in situ*

Tabela 3: Concentração de água desejada ( $C_t$ ) nas amostras de solo e concentração real ( $C_r$ ), medida pelo método gravimétrico.

$C_t$ (%)	$C_r$ (%)
10	8,96
15	13,24
20	18,02
25	22,90
30	27,61
35	32,44
40	37,14

de um poço existente no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina-Paraná-Brasil. O solo desta região é basicamente constituído de argila siltosa, vermelha escura, laterizada, com 55% de argila e 23% de silte em sua composição granulométrica, com massa específica dos sólidos de  $3,0 \text{ g/cm}^3$  e limites de liquidez e índice de plasticidade de, aproximadamente, 52% e 13,5%, respectivamente (Rodríguez et al., 2011).

Após a coleta da amostra de solo, seguindo recomendação da NBR 6457/1986 (ABNT, 1986) sobre operações preliminares para preparo de amostras para ensaio de caracterização com secagem prévia, foram obtidas sete parcelas com cerca de 3 kg cada. Em seguida, foi determinada, de acordo com a mesma norma, a concentração de água em cada parcela e calculada a massa de água a ser adicionada para obtenção de sete corpos de prova com diferentes umidades. Cada um destes foi preparado para atingir uma determinada concentração de água teórica ( $C_t$ ), no entanto, a concentração de água real ( $C_r$ ) só pode ser determinada pelo método gravimétrico (ISO, 2004), devido a sua rápida evaporação. Para realização do teste gravimétrico, foram utilizadas uma balança de precisão de 0,01/0,1 g e uma estufa com temperatura controlada em  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . As concentrações de água teórica e real dos sete corpos de prova são apresentadas na Tabela 3.

Para possibilitar o correto acondicionamento dos corpos de prova e sensor durante os ensaios, isolando-os do contato com o ar e evitando assim a perda de água para o meio, foi confeccionado um porta amostras em PVC (Figura 4). Como observa-se nesta Figura, é possível instrumentar o sensor mesmo com o porta amostras fechado.

Ensaio foram conduzidos com os 7 corpos utilizando o circuito de condicionamento do sinal descrito. A capacitância do sensor foi inferida a cada 20 segundos, medindo-se a largura de pulso  $T_{th}$ . Após 10 minutos, tempo total de cada teste, considerou-se  $T_{th}$  como sendo a média de 30 valores medidos.

Devido a complexidade do solo, a capacitância do sensor pode também sofrer influência de



Figura 4: Solo e sensor posicionados no porta amostras para realização dos testes.

outros fatores (lacunas, gases, etc). Para reduzir tal influência no experimento, para cada um dos valores de concentração ( $C_r$ ) de água no solo (Tabela 3), realizou-se o mesmo ensaio três vezes, mas com amostras de solo diferentes. Além disto, do conjunto total de 21 ensaios, três *outliers* foram eliminados. O resultado é apresentado na Figura 5.

Observa-se que, quanto maior o valor de  $C_r$ , maior é a variância da capacitância de um ensaio para o outro. Contudo, um solo com concentração de água acima de 25% já é bastante encharcado, podendo ser considerado como saturado para muitas aplicações. Além disto, as 18 *inliers* do experimento ajustam-se ao modelo de uma reta (Figura 5) com  $R^2 = 0,94$ . Dessa forma, a técnica demonstra-se bastante promissora.

A estrutura do solo apresenta grande variação nas diferentes regiões brasileiras, principalmente devido a rocha formadora. Por isso, o sensor proposto deve ser calibrado com o solo a ser testado. Sendo assim, os resultados obtidos com os 18 *inliers* do experimento anterior, serviram para calibrar o sensor. Em seguida, a quantidade de água de outras 21 amostras (três amostras de cada corpo de prova) foi determinada utilizando o sensor calibrado. O valor medido através dos testes e o valor real (obtido pelo método gravimétrico padrão) são apresentados na Figura 6. As medições realizadas com o sensor ajustam-se ao modelo ideal com  $R^2 = 0,94$  e erro médio de  $\pm 3,5\%$ .

## 5 Conclusões

Capacitores são utilizados como sensores nas mais diversas aplicações. Normalmente, a grandeza a ser medida altera as propriedades geométricas de uma estrutura capacitiva ou as propriedades físi-

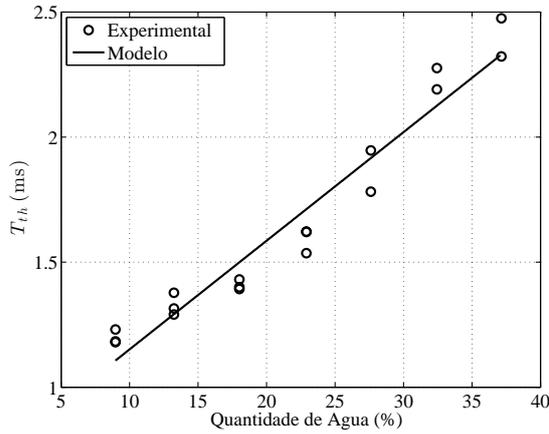


Figura 5: Concentração de água no solo *versus*  $T_{th}$ .

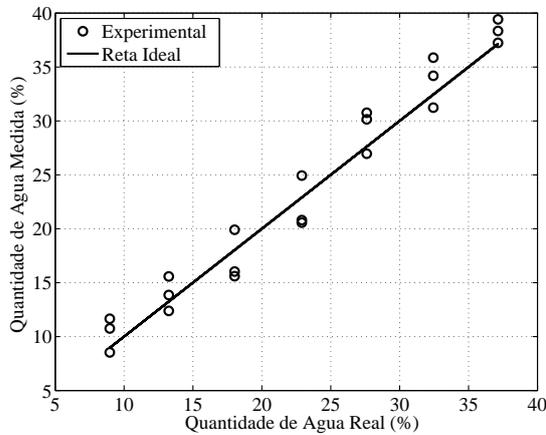


Figura 6: Quantidade de água no solo obtido pelo método gravimétrico *versus* o obtido pelo sensor proposto já calibrado.

cas do dielétrico entre os eletrodos desta mesma estrutura. O sensor aqui proposto utiliza o efeito de campo de borda das placas finitas de um capacitor plano. Neste caso, o campo elétrico é projetado para dentro da amostra em análise, garantindo uma medição não invasiva. Neste artigo, este tipo de sensor é utilizado na quantificação da água presente no solo, importante informação para áreas como geotecnia e agronomia, entre outras. A estrutura interdigitada do sensor foi apresentada, bem como um circuito que transforma a variação na capacitância em uma alteração na largura de um sinal pulsado. Por fim, a solução proposta foi comparada experimentalmente com o método gravimétrico padrão para quantificação de água no solo. Os resultados foram animadores, pois as medições do sensor proposto ajustou-se aos dados experimentais com coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,94$ .

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, a EMBRAPA Soja, a Fundação Araucária e ao FA-EPE/UEL pelo financiamento das pesquisas.

## Referências

- ABNT (1986). *Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e caracterização*, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Baglio, S., Castorina, S., Ganci, G. and Savalli, N. (2004). A high sensitivity conditioning circuit for capacitive sensors including stray effects compensation and dummy sensors approach, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 2, pp. 1542 – 1545.
- Dean, R., Rane, A., Baginski, M., Richard, J., Hartzog, Z. and Elton, D. (2012). A capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **61**(4): 1105–1112.
- dos Santos, R. D., de Lemos, R. C., dos Santos, H. G., Ker, J. C. and dos Anjos, L. H. C. (2005). *Manual de descrição e coleta de solo no campo*, Folha de Viçosa Ltda. ISBN 858650403-3.
- Eller, H. and Denoth, A. (1996). A capacitive soil moisture sensor, *Journal of Hydrology* **185**(1?4): 137 – 146.
- George, B. and Kumar, V. J. (2010). Analysis of the switched-capacitor dual-slope capacitance-to-digital converter, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **59**(5): 997–1006.
- Hazarika, D., Laskar, S., Sarma, A. and Sarma, P. (2006). Pcbased instrumentation system for the detection of moisture content of tea leaves at its final stage, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **55**(5): 1641–1647.
- Heidary, A. and Meijer, G. C. M. (2008). Features and design constraints for an optimized sc front-end circuit for capacitive sensors with a wide dynamic range, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **43**(7): 1609 –1616.
- Ignjatovic, Z. and Bocko, M. F. (2005). An interface circuit for measuring capacitance changes based upon capacitance-to-duty-cycle (cdc) converter, *IEEE Sensors J.* **5**(3): 403–410.

- ISO (2004). *Geotechnical investigation and testing - Determination of water content*, International Organization for Standardization.
- Karlsson, N. (1999). A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **48**(6): 1122–1124.
- Kirkham, M. (2004). *Principles of Soil and Plant Water Relations*, Elsevier Academic Press.
- Li, X. and Meijer, G. C. M. (2000). Elimination of shunting conductance effects in a low-cost capacitive-sensor interface, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **49**(3): 531–534.
- Li, X. and Meijer, G. C. M. (2002). An accurate interface for capacitive sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **51**(5): 935–939.
- Majid, H. A., Hazali, N., Sulaiman, M. S. and A'ain, A. K. (2009). A capacitive sensor interface circuit based on phase differential method, *World Academy of Science, Engineering and Technology* **55**: 630–633.
- McIntosh, R. and Casada, M. (2008). Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities, *IEEE Sensors Journal* **8**(3): 240–247.
- Meeker, D. (2010). Finite Element Method Magnetics (FEMM), Version 4.2 (25Aug2013 Build).
- Mukhopadhyay, S., Gooneratne, C. P., Sen Gupta, G. and Demidenko, S. (2006). A low-cost sensing system for quality monitoring of dairy products, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **55**(4): 1331–1338.
- Rodriguez, T. T., Teixeira, R. S., Fernandes, F., Jr, O. M. O., Beraldo, F. M., Komori, E. T. and Danziguer, D. H. (2011). Estudo da compactação de lodo de eta para uso em aterros sanitários., *VII Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental*.
- Roque, W. (2008). *Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo.*, Master's thesis, UNICAMP.
- Saxena, S. C. and Tayal, G. M. (1981). Capacitive moisture meter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation* **IECI-28**(1): 37–39.
- Shi, X., Matsumoto, H. and Murao, K. (2001). A high-accuracy digital readout technique for humidity sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **50**(5): 1277–1282.
- Sundara-Rajan, K., Byrd, L. and Mamishev, A. V. (2004). Moisture content estimation in paper pulp using fringing field impedance spectroscopy, *IEEE Sensors Journal* **4**(3): 71–78.
- Technologies, S. S. (2009). *Diviner 2000, Portable Soil Moisture Monitoring Solution*, rev 1.5 edn, Sentek Pty, Australia.
- Wu, S., Zhou, Q., Wang, G., Yang, L. and Ling, C. (2011). The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content, *Environmental Earth Sciences* **62**: 999–1011.

## UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE GRANDEZAS AGROMETEOROLÓGICAS EM REGIÕES DE CULTIVO POR MEIO DE UMA REDE BASEADA NOS PROTOCOLOS RS-485 E MODBUS

JAIME MIZUGUCHI<sup>1</sup>, HEITOR HATIZUKA YOSHIDA<sup>2</sup>, JOSÉ ALEXANDRE DE FRANÇA<sup>3</sup>,  
MARIA BERNADETE DE MORAES FRANÇA<sup>4</sup>, JULIANI CHICO PIAI<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Computação, Mestrando em Engenharia Elétrica, Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente, Depto. de Engenharia Elétrica, CTU/ UEL, Londrina – PR, Fone: (43) 3371.5892, jaime.mizu@gmail.com.

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Eletricista, Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Eletricista, Prof. Doutor, Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente, CTU/UEL, Londrina – PR.

<sup>4</sup> Eng<sup>a</sup> Eletricista, Prof<sup>a</sup> Assistente, Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente, CTU/UEL, Londrina – PR.

<sup>5</sup> Eng<sup>a</sup> Eletricista, Prof<sup>a</sup> Assistente, Departamento de Engenharia Elétrica, CTU/UEL, Londrina – PR.

Apresentado no  
XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2013  
04 a 08 de Agosto de 2013 - Fortaleza - CE, Brasil

**RESUMO:** Para que haja uma ação eficaz no manejo de uma cultura empregando recursos de agricultura de precisão, faz-se necessário o monitoramento de grandezas agrometeorológicas em vários pontos da região de cultivo. Na maioria das vezes, o grande obstáculo na implementação de soluções deste tipo é o custo. No presente trabalho, apresenta-se uma solução econômica empregando uma rede de módulos de monitoramento de tais grandezas. Com o objetivo de facilitar a manutenção, reduzir os custos e aumentar a autonomia, é implementada uma rede cabeada utilizando uma única bateria que alimenta todos os módulos de modo simultâneo. Diariamente, os dados adquiridos por cada um desses módulos são transferidos para um concentrador de dados. Então, uma vez por dia, os dados deste concentrador são transferidos via internet e disponibilizados para análise em um computador central. Para avaliar o sistema proposto, um protótipo de uma rede de monitoramento de umidade relativa do ar e temperatura foi implementado. Os resultados mostraram que o sistema pode ser facilmente expandido, tornando possível o monitoramento de uma grande região com um número maior de pontos de aquisição.

**PALAVRAS-CHAVE:** agricultura de precisão, estações agrometeorológicas, modbus.

### A SYSTEM FOR ACQUISITION OF AGROMETEOROLOGICAL MAGNITUDES IN GROWING REGIONS THROUGH A NETWORK BASED ON THE RS-485 AND MODBUS PROTOCOLS

**ABSTRACT:** To have an effective action in the cultivation management employing precision agriculture, it is necessary to monitor the meteorological quantities at various points in the cultivation area. Most often, the major obstacle in implementing such solutions is cost. In this paper, we present an economical solution employing a network of monitoring modules of such magnitudes. Aiming to facilitate maintenance, reduce costs and increase autonomy, a wired network is implemented using a single battery that powers all modules simultaneously. Daily, the data acquired by each of these modules are transferred to a data concentrator. Then, once a day, data from this hub are transferred via internet and made available for analysis in a central computer. To evaluate the proposed system, a prototype of a network of monitoring relative humidity and temperature was implemented. The results showed that the system can be easily expanded, making it possible to monitor a large area with a larger number of acquisition points.

**KEYWORDS:** precision agriculture, agrometeorological stations, modbus.

**INTRODUÇÃO:** Ações eficazes no manejo de uma cultura requerem o monitoramento de diversas grandezas agrometeorológicas. O uso de estações agrometeorológicas mostra-se eficaz na aquisição

destas grandezas de forma uniforme e precisa. Tal monitoramento auxilia em casos como controle na irrigação (QUEIROZ et al., 2008) e tomadas de ações preventivas contra doenças (MAGAREY et al., 2001). No contexto preventivo, a determinação da duração do molhamento foliar (DMF) é um parâmetro importante, que requer a aquisição de grandezas agrometeorológicas como velocidade e umidade do ar, temperatura e índice pluviométrico para determinar, de forma indireta, a DMF e, assim, estimar o desenvolvimento de doenças na lavoura (SENTELHAS et al., 2004). Estudos recentes nesta subárea da agricultura de precisão empregam soluções de comunicação sem fio através de tecnologias como Bluetooth (KIM et al., 2008) e Zigbee (GOGLIANO et al., 2011; CHASE et al., 2012). Verifica-se nestes trabalhos o emprego de muitos dispositivos comerciais que oneram o projeto, além de sua autonomia implicar em baterias, placas solares e circuitos carregadores agregados a cada estação. Também, obstáculos na área cultivada são fatores que comprometem a comunicação sem fio (FRANÇA et al., 2009). Visando minimizar custos e facilitar o gerenciamento operacional, este trabalho propõe um sistema para aquisição de grandezas agrometeorológicas através de estações ligadas numa rede cabeada, onde a energia de alimentação participa do mesmo cabeamento. Nesta rede, uma das estações é dotada das funções de distribuição de configurações e concentração dos dados adquiridos em cada estação, transmitindo os dados para um servidor conectado à Internet em períodos predefinidos e, assim, disponibilizando estes dados para os usuários.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A Figura 1 exemplifica o sistema proposto. Consiste em estações agrometeorológicas (EC e E1 a En) distribuídas ao longo da plantação e interligadas por meio de um único cabeamento, sendo uma das estações (EC) responsável por concentrar estes dados e transmití-los, através de um módulo de telefonia móvel, para um servidor conectado à Internet. Diversos usuários podem então acessar estes dados a partir do servidor para análise e tomadas de ações. Anexo à estação concentradora é colocada uma bateria com capacidade para alimentar toda a rede. Cada estação pode fazer, de forma independente, aquisições de grandezas tais como precipitação, umidade do solo e do ar e temperatura e, para melhorar a eficiência no consumo de energia, foi implementado o modo de economia de energia em cada microcontrolador, que põe cada uma das estações em estado de espera (*standby*) quando não estão coletando ou transmitindo dados.

Devido ao uso amplamente difundido em ambientes industriais, foi implementado o protocolo RS-485 para interligação física entre os dispositivos, que permite comunicações a longas distâncias (até 1200 metros) utilizando-se dois fios que tratam o sinal de comunicação de forma diferencial, oferecendo grande imunidade a ruídos. Com a finalidade de estabelecer facilidades de incorporação de equipamentos comerciais, foi adotado o padrão Modbus por ser um protocolo aberto e popular entre os sistemas de comunicação em rede, além de possuir um tratamento para erros na transmissão de dados. Adicionalmente, para alimentar cada estação a partir de uma única fonte de energia, mais dois fios para alimentação participam do cabeamento, formando uma rede distribuída de energia e controle.

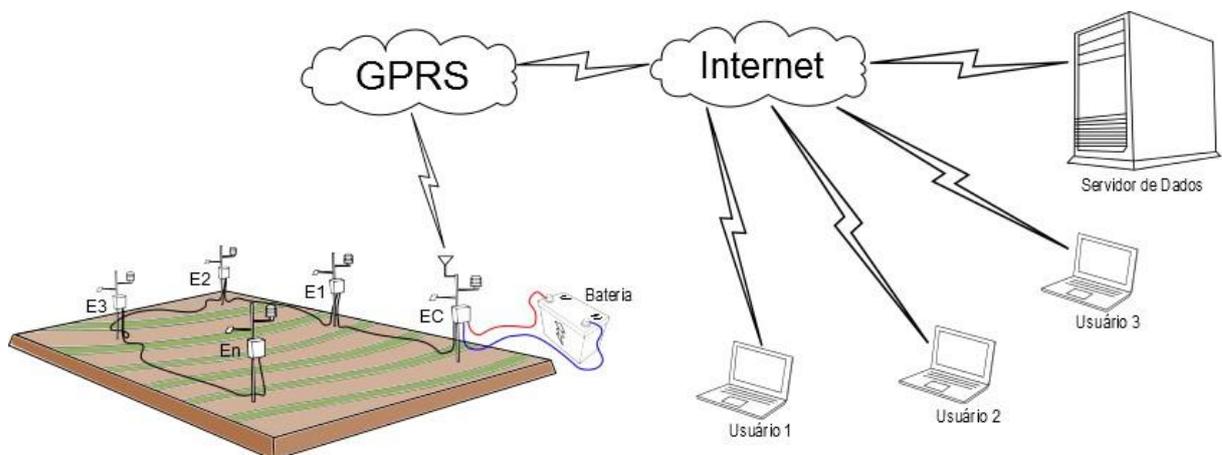


FIGURA 1. Esquema da rede cabeada e interface com o servidor de dados.

Os módulos construídos estão ilustrados nos diagramas de blocos na Figura 2. O módulo de aquisição consiste em um microcontrolador de 8 bits, um CI (circuito integrado) de memória de 128 Kb, CIs de interface para USB e RS-485 e um CI sensor de temperatura e umidade. O módulo concentrador tem

configuração semelhante, diferindo apenas num microcontrolador 8 bits com maior capacidade de memória RAM e um módulo adicional para transmissão de dados por telefonia móvel GPRS.

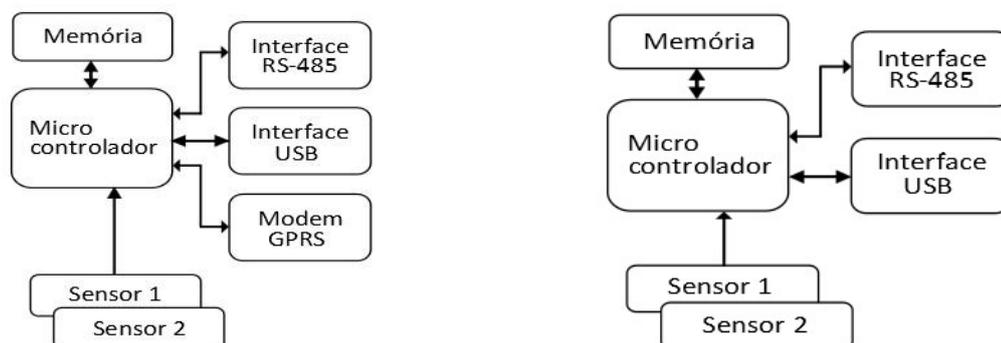


FIGURA 2. Diagramas de blocos dos módulos concentrador (esquerda) e aquisitivo (direita).

O protótipo foi construído e testado em laboratório para ser verificada a eficácia na comunicação e execução de instruções, sendo efetuadas leituras de temperatura e umidade a cada 3 minutos pelas estações de aquisição. Embora nos testes tenha sido utilizado apenas um sensor, é possível integrar aos módulos mais quantidades e tipos de sensores. Na situação atual, as configurações de aquisição e transmissão entre concentrador e demais estações são feitas diretamente no código fonte do dispositivo concentrador, porém, o endereçamento de cada estação é configurado individualmente, não sendo possível esta atribuição pelo módulo concentrador.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A construção de todo o sistema mostrou-se econômica, reduzindo os custos com equipamentos comerciais e permitindo livre adaptação da arquitetura conforme as necessidades. Levando-se em consideração os fatores agressivos ao sistema num ambiente agrícola, para testes em campo o equipamento foi montado em caixas plásticas com fator de proteção IP 65 para as estações aquisitivas e IP 67 para a estação concentradora (Figura 3).



FIGURA 3. Equipamento montado em caixas com fator de proteção IP 65 e IP 67.

O gráfico dos dados armazenados pelo sistema (Figura 4) demonstra o funcionamento correto de aquisição de dados dos módulos de aquisição e a concentração destes dados pelo módulo concentrador.

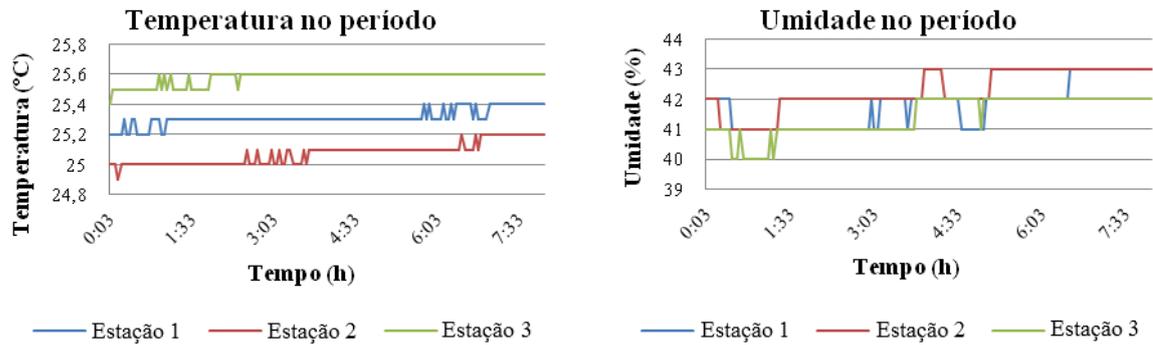


FIGURA 4. Gráficos gerados a partir dos dados coletados pelo concentrador num período de 7,5 horas.

Para melhorar a autonomia do sistema, poderá ser implementada uma placa de energia solar ou mesmo uma alimentação a partir da rede elétrica da propriedade, deixando a bateria atuar apenas em períodos de interrupção no fornecimento da rede elétrica. Ainda, a avaliação prévia de perfil do solo através de Sistema de Informação Geográfica (KIM et al., 2008) auxilia no posicionamento ideal das estações, minimizando ou mesmo dispensando remanejamentos posteriores.

**CONCLUSÕES:** Testes de distribuição de configurações e recepção de dados com o sistema proposto foram realizadas com sucesso. Os resultados mostraram que o sistema pode ser facilmente expandido tanto em número de módulos quanto em facilidades de software agregadas ao sistema, tornando-o mais amigável ao usuário e fornecendo informações de forma mais eficiente.

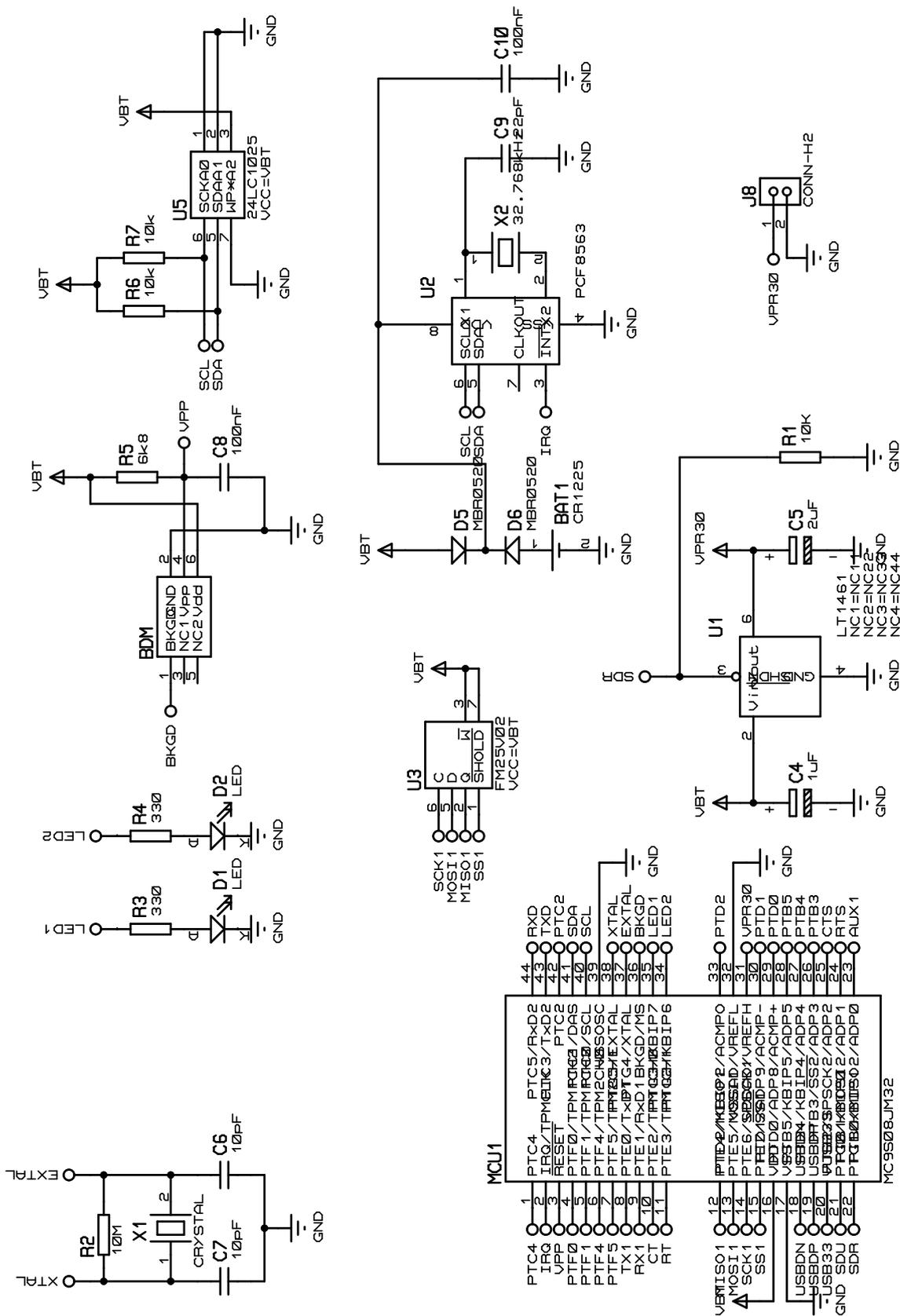
**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem à CAPES, Embrapa Café e Fundação Araucária pelo financiamento das pesquisas.

## REFERÊNCIAS

- CHASE, O. A.; SAMPAIO M. H. K.; SOUZA, J. R. B. de; ALMEIDA, J. F. S. Data acquisition systems: an approach to the amazonian enviroment. **IEEE Latin America Transactions**, v. 10, n. 2, p. 1616-1621, mar. 2012.
- FRANÇA, J. A. de; JÚNIOR, E. L. B.; KOYAMA, M. H.; PEREIRA, R. V.; CANTERI, M. G.; FRANÇA, M. B. de M. System of microstations of data acquisition for wireless monitoring of the microclimate in crop areas. **7<sup>th</sup> World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources 2009**. Reno, NV, EUA, p. 13-18, 22-24 jul. 2009.
- GOGLIANO SOBRINHO, O.; MARÊ R. M.; CUGNASCA, C. E.; LEITE, B. C. C. Monitoramento remoto de variáveis ambientais internas com o uso de redes modbus de sensores e da internet. *In*: IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010/ XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2010, 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2010.
- KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 57, n. 7, p. 1379-1387, jul. 2008.
- MAGAREY, R. D.; SEEM, R. C.; RUSSO, J. M.; ZACK, J. W.; WRIGHT, K. T.; TRAVIS, J. W.; OUDEMANS, P. V. Site-specific weather information without on-site sensors. **Plant Disease**, v. 85, n. 12, p. 1216-1226, 2001.
- QUEIROZ, T. M. de; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, mar. 2008.
- SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; GLEASON, M.L.; MONTEIRO; J.E.B.A.; HELLAND, S.T. Operational exposure of leaf wetness sensors. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 126, ed. 1-2, p. 59-72, 20 nov. 2004.

## Apêndice B - Esquemas Elétricos dos Circuitos Eletrônicos

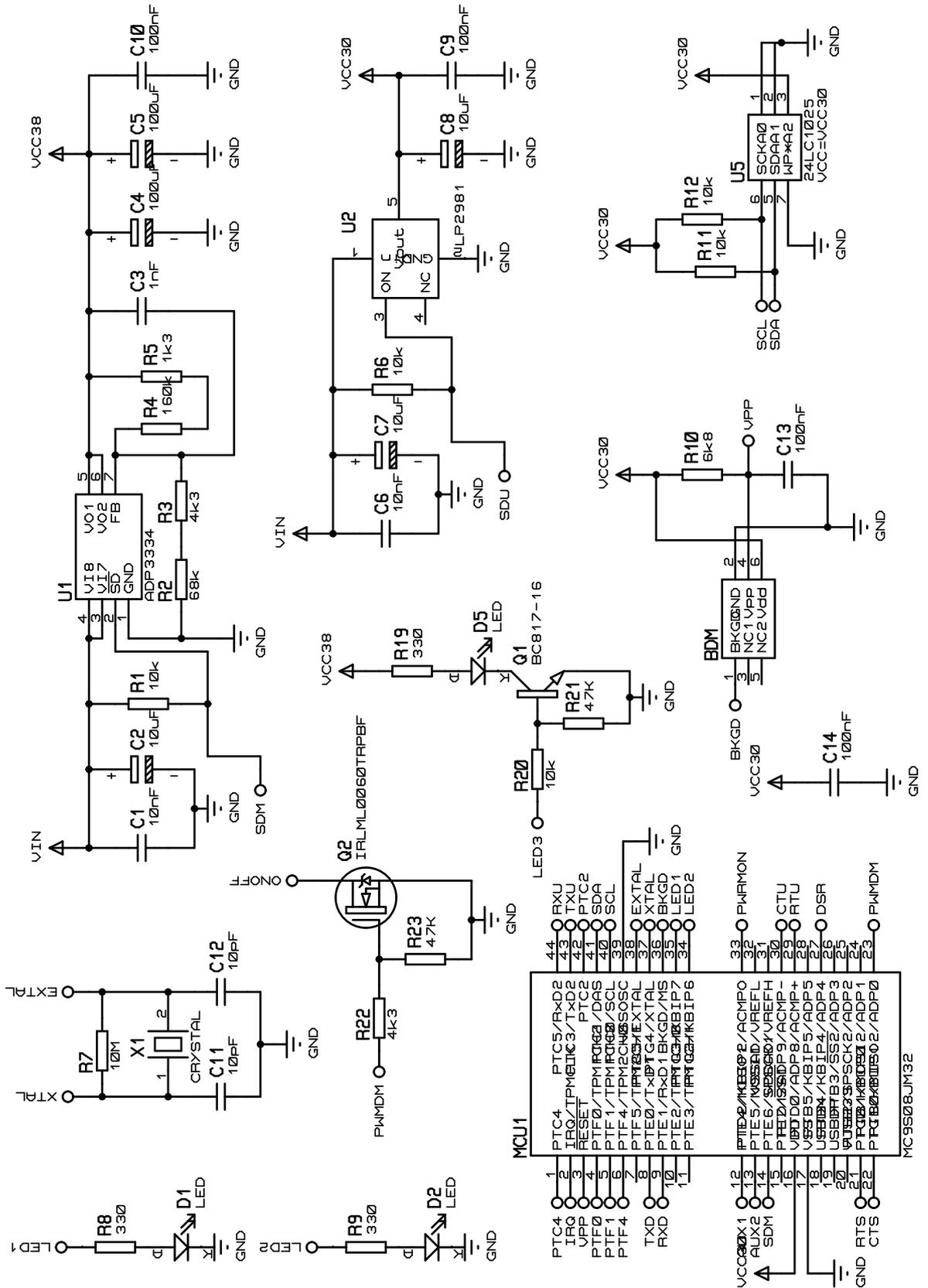
Figura B.1: Esquema elétrico do módulo Mestre, parte A.



Fonte: Autor.

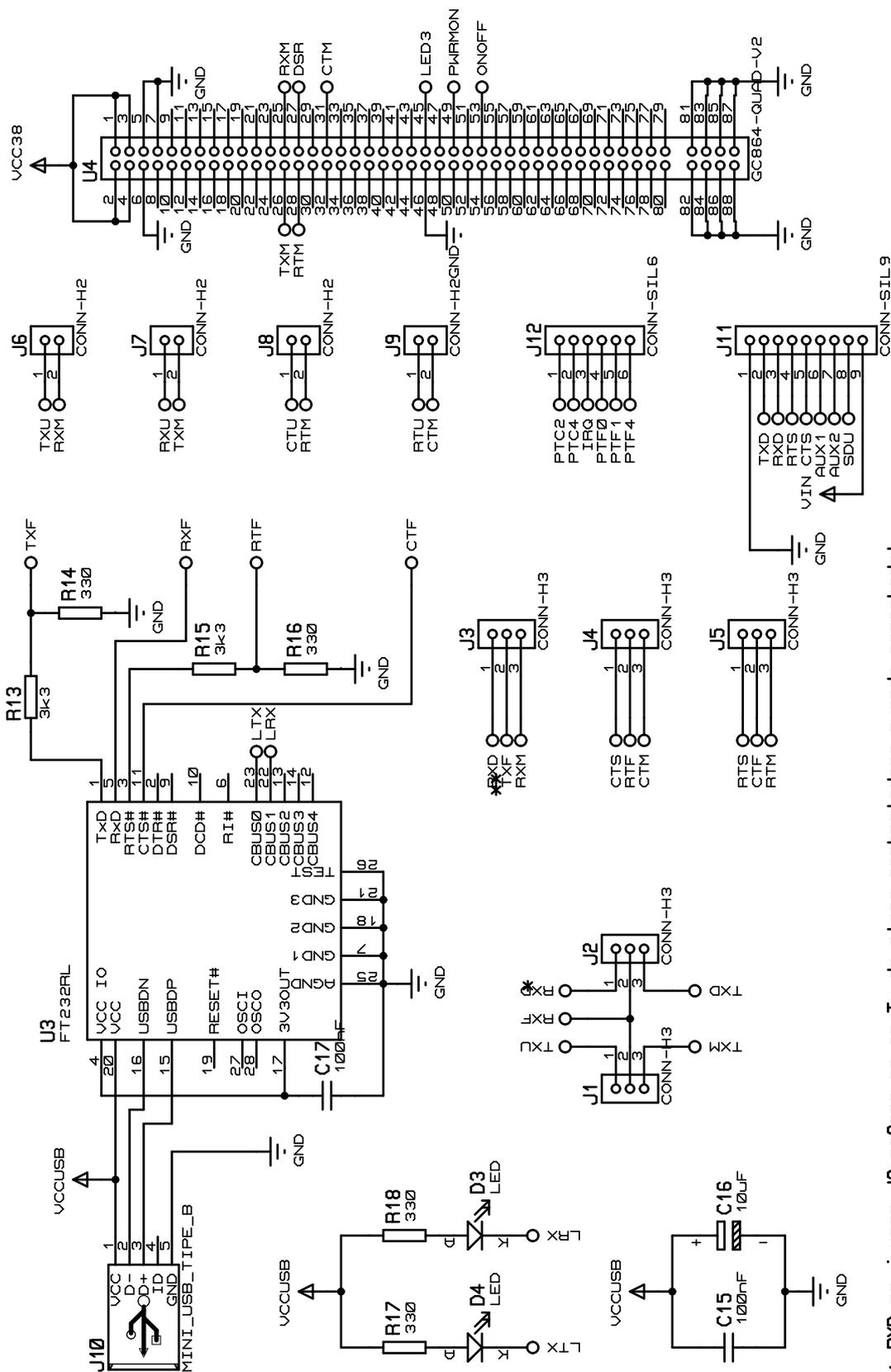


Figura B.3: Esquema elétrico do módulo Modem, parte A.



Fonte: Autor.

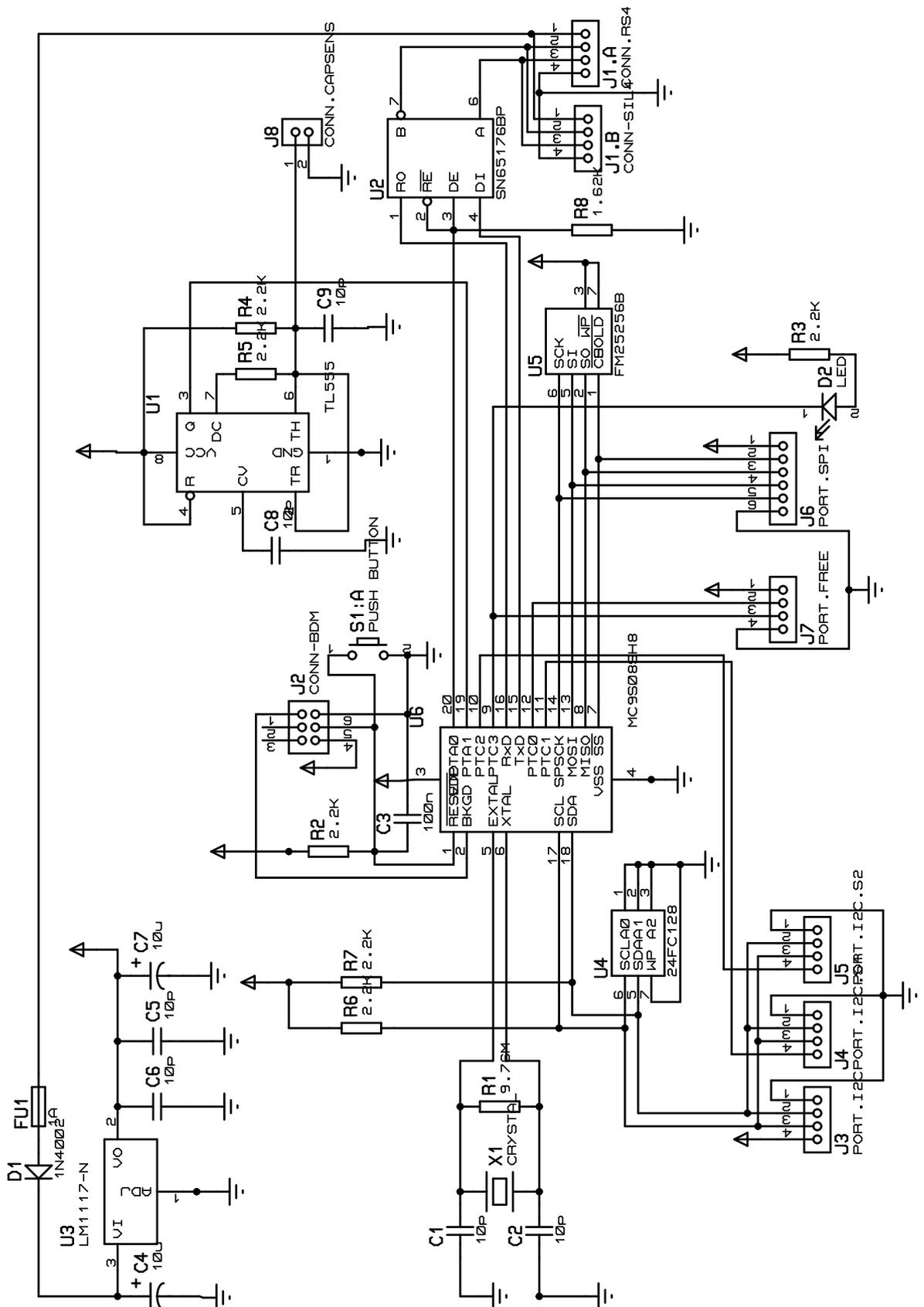
Figura B.4: Esquema elétrico do módulo Modem, parte B.



\* RXD no jumper J2 refere-se ao Tx da placa controladora quando conectado!

\*\*RXD no jumper J3 s? deve ser usado quando o Tx da placa controladora estiver desconectado!

Figura B.5: Esquema elétrico do módulo Escravo.



Fonte: Autor.

## Apêndice C – Protocolo Modbus

Numa rede de dispositivos interligados, o protocolo Modbus atende as camadas de troca de mensagens entre estes dispositivos, podendo ser implementado sobre comunicação serial ou Ethernet. Assim, o Modbus é um protocolo que suporta tanto modos de comunicação cliente-servidor como modos de comunicação mestre-escravo entre dispositivos conectados em diferentes tipos de barramentos ou redes. As camadas do modelo OSI onde o Modbus se insere são mostradas na Tabela C.1. Como neste trabalho é implementado uma rede de sensores num sistema mestre-escravo sob o padrão RS-485, o protocolo Modbus em linha serial foi eleito por atender este requisito. Adotado como um padrão serial da indústria desde 1979, o Modbus ainda hoje continua a integrar a comunicação entre milhares de dispositivos, sendo que o protocolo continua a evoluir à medida que novas tecnologias surgem.

**Tabela C.1:** Camadas no modelo OSI utilizadas pelo Modbus

Camada	Modelo ISO/OSI	Forma de utilização pelo Modbus
7	Aplicação	Protocolo de aplicação Modbus
6	Apresentação	-
5	Seção	-
4	Transporte	-
3	Rede	-
2	Enlace	Protocolo Modbus em linha serial
1	Física	RS-485, RS-232 ou Ethernet

Partindo do princípio do conceito mestre-escravo, numa rede utilizando o protocolo Modbus, ao escravo nunca é permitido transmitir dados sem antes receber uma requisição do mestre. Esta requisição pode ser realizada pelo dispositivo mestre de duas formas:

- Modo *Unicast*, onde o dispositivo mestre transmite uma mensagem endereçado para apenas um dispositivo escravo e
- Modo *Broadcast*, onde o dispositivo mestre transmite uma mensagem para vários dispositivos escravos.

## C.1 Quadros de Comunicação

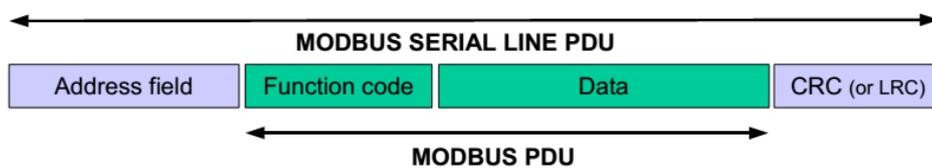
Para que o módulo mestre transmita as mensagens aos módulos escravos de forma coordenada, o protocolo define esta comunicação através de *frames*. Trata-se de quadros de transmissão organizados como descrito na Tabela C.2, e transmitidos através dos modos RTU ou ASCII, que serão descritos na subseção a seguir. Como forma de controle de integridade da informação, o Modbus utiliza um método de CRC (*Cyclical Redundancy Checking*) de 16 bits, que é calculado para cada *frame* transmitido, sendo inserido no final do *frame* no formato *big endian*, ou seja, o byte mais significativo é transmitido por último. O algoritmo deste método é apresentado na Seção 3.4.3 e também está disponibilizado na documentação do protocolo.

**Tabela C.2:** Quadro de comunicação Modbus em modo RTU

Endereço Escravo	Código da Função	Dados	CRC
1 byte	1 byte	0 a 252 bytes	2 bytes

Independente das camadas inferiores do modelo OSI, o protocolo de aplicação Modbus define um protocolo simplificado para dados denominado *Protocol Data Unit* (PDU). Trata-se da parte essencial da comunicação, composta do código de função e dados. Conforme determinado cliente inicia uma transação no Modbus, campos adicionais de endereçamento (*additional address*) e verificação de erros (*error check*) são agregados ao quadro para a comunicação apropriada do PDU. A Figura C.1 ilustra esta definição no protocolo.

**Figura C.1:** Quadro Modbus em linha serial.



Fonte: (MODBUS.ORG, 2002).

## C.2 Modos de transmissão

Existem dois modos de transmissão especificados pelo protocolo Modbus que determinam o formato no qual os pacotes de dados são enviados: o modo padrão, chamado de RTU (*Remote Terminal Unit*), e o modo opcional ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Na comunicação em modo RTU, cada byte transmitido

corresponde a dois caracteres hexadecimais, ou seja, dois pares de 4 bits. Desta forma, este modo se mostra mais vantajoso em relação ao modo ASCII, por proporcionar maior densidade de caracteres transmitidos se comparado com a mesma taxa de transmissão em ASCII.

O modo ASCII, além de ser menos eficiente, é uma implementação opcional, necessária apenas em aplicações específicas e não será analisado neste trabalho. Já o modo RTU é uma implementação mandatória, ou seja, independente da aplicação, a interoperabilidade entre dispositivos Modbus se dá através deste modo de transmissão.

A transmissão de cada byte no modo RTU consiste num formato de 11 bits:

- 1 start bit
- 8 bits de dados
- 1 bit de paridade
- 1 stop bit

A Figura C.2 ilustra como os bits são transmitidos serialmente.

**Figura C.2:** Exemplo de transmissão de um byte no modo RTU.



Fonte: (MODBUS.ORG, 2002).

É importante ressaltar que, embora o protocolo imponha o uso de paridade par e opcionalmente ímpar ou sem paridade, para garantir máxima compatibilidade de dispositivos é recomendado que o tratamento sem paridade seja implementado. Neste caso, no bit respectivo à paridade, um segundo *stop bit* é incluso para manter o quadro de 11 bits.

## C.3 Códigos de funções

O Modbus subdivide seus códigos de funções em três categorias, uma descrição resumida de cada uma destas funções é apresentada na Tabela C.3.

A categoria de funções definidas pelo usuário (*user-defined*) compreende duas pequenas faixas disponíveis para livre implementação. Portanto, este fato deve ser observado na integração de dois sistemas que possuam personalizações nesta categoria.

**Tabela C.3:** Tipos de códigos de funções definidos pelo Modbus

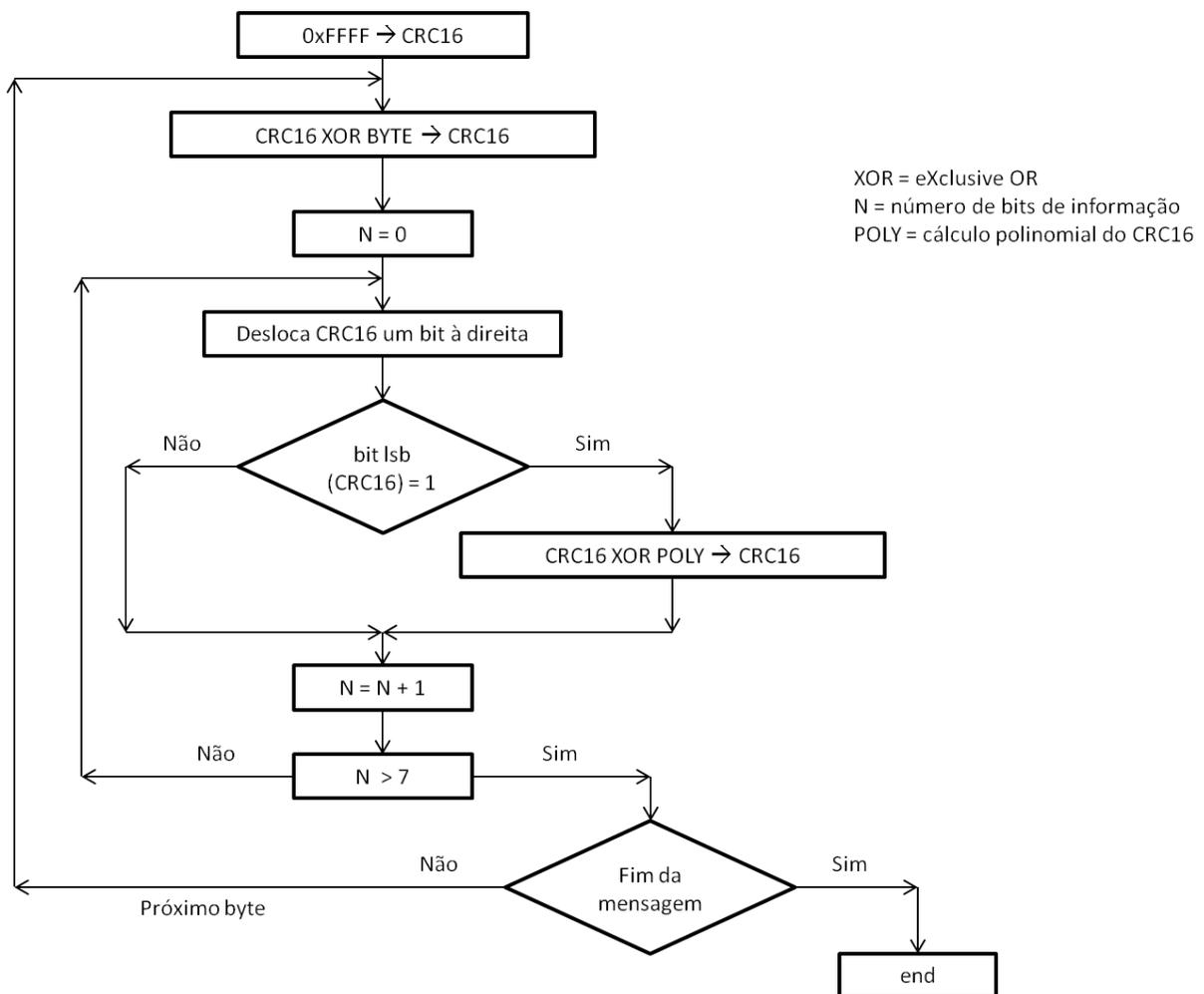
Códigos de funções	Descrição
Públicos	São funções definidas e validadas pelo próprio Modbus, garantindo a unicidade e documentação da função.
Definidos pelo usuário	São duas faixas de códigos disponibilizadas para uso geral, assim, o usuário pode implementar funções não suportadas na categoria pública. Porém, nesta categoria não é possível garantir a unicidade da função.
Reservados	São funções utilizadas por algumas empresas para produtos legados, não sendo disponibilizadas para uso público.

## C.4 Código de verificação

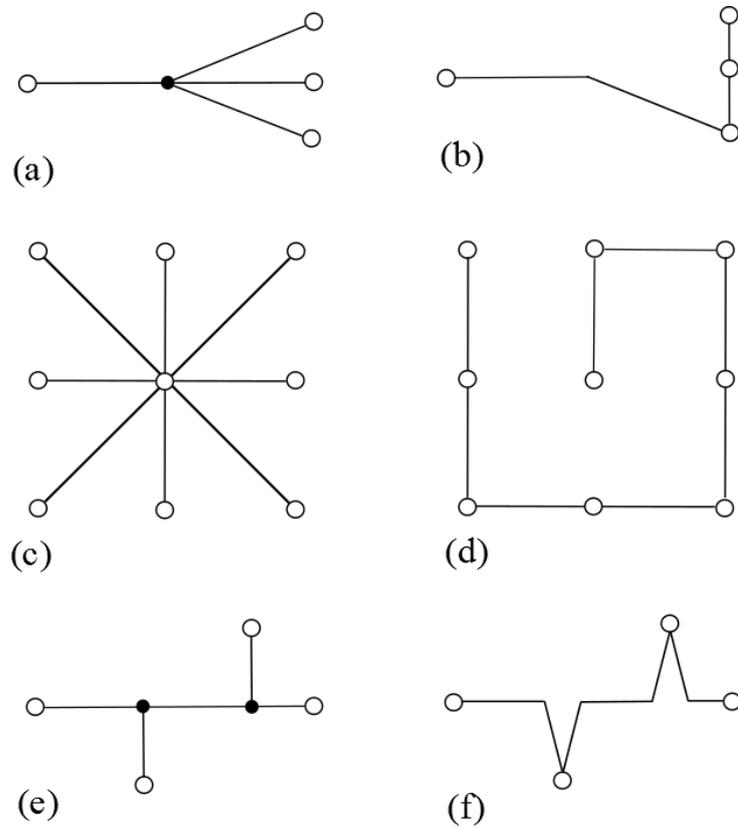
## C.5 Topologia de Rede

Com relação à topologia de rede a ser empregada, embora configurações do tipo estrela, árvore e barra com derivação (Figuras C.4(a), C.4(c), C.4(e)) sejam utilizadas em casos específicos, tem-se a topologia *daisy-chain* como ideal para a rede cabeada de sensores utilizando o padrão RS-485. Neste tipo de configuração, a derivação, ou ponta, que surge na inserção de cada nó (dispositivo conectado) é minimizado. Assim, problemas na linha de transmissão devido à configuração adotada também são minimizados. As Figuras C.4(b), C.4(d) e C.4(f) são exemplos de topologia *daisy-chain*.

**Figura C.3:** Fluxograma de cálculo do CRC.



Fonte: Adaptado de Modbus.org (2002).

**Figura C.4:** Exemplos de topologias de redes.

Fonte: Texas Instruments Inc. (1996).