

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**PATRIK BEDIN SCHETTERT**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES MICROCONTROLADOS PARA**  
**AVALIAÇÃO DA UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

PATRIK BEDIN SCHETTERT

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES MICROCONTROLADOS PARA  
AVALIAÇÃO DA UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação, do Departamento Acadêmico de Informática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti  
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin

PATO BRANCO

2018



### TERMO DE APROVAÇÃO

Às 20 horas e 30 minutos do dia 02 de julho de 2018, na sala V003, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Fabio Luiz Bertotti (orientador), Gustavo Weber Denardin (coorientador), André Macário Barros e Diogo Vargas para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Desenvolvimento de sensores microcontrolados para avaliação da umidade e temperatura do solo**, do aluno **Patrik Bedin Schettert**, matrícula 01492470, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação o candidato foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

\_\_\_\_\_  
Fabio Luiz Bertotti  
Orientador (UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Gustavo Weber Denardin  
Coorientador (UTFPR)

\_\_\_\_\_  
André Macário Barros  
(UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Diogo Vargas  
(UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Profa. Beatriz Terezinha Borsoi  
Coordenador de TCC

\_\_\_\_\_  
Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti  
Coordenador do Curso de  
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

*However difficult life may seem, there is  
always something you can do and succeed at.*

Stephen Hawking

## RESUMO

SCHETTERT, Patrik Bedin. Desenvolvimento de sensores microcontrolados para avaliação da umidade e temperatura do solo. 2018. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

A agricultura de precisão é um conceito emergente que tem como objetivo principal otimizar o gerenciamento de atividades agrícolas mediante a observação, medição e resposta às variações temporais e espaciais da plantação, por meio da implementação de tecnologias no campo como geolocalização, sensoriamento e controle. Nesse sentido este trabalho se propôs a desenvolver um sistema de medição de umidade do solo composto por três etapas: sensores inteligentes de umidade do solo, unidade concentradora e unidade de monitoramento. Esse sistema tem por objetivo auxiliar no monitoramento de propriedades rurais e na gestão segmentada de recursos hídricos. Os sensores de umidade do solo são formados por um circuito analógico, duas sondas e um sensor de temperatura. É empregado o método capacitivo de medição, no qual a umidade do solo é obtida a partir da constante dielétrica e da capacitância da matriz eletrodos-solo. O sensor desenvolvido apresentou erro menor do que 3%, com coeficiente de correlação de 0,9785. A unidade concentradora permite a conexão de múltiplos sensores e tem por função agrupar os dados referentes a umidade e temperatura de cada um. A unidade de monitoramento visa possibilitar o monitoramento remoto da unidade concentradora a partir da implementação de um enlace de comunicação sem fio de longa distância, eliminando a necessidade de acesso físico para obtenção dos dados. Nos testes do enlace foi possível alcançar uma distância de 2,41 *km* em região urbana e 5,39 *km* em região rural.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão. Sensores Capacitivos. Umidade do Solo. Sensor inteligente.

## ABSTRACT

SCHETTERT, Patrik Bedin. Development of micro-controlled sensors for soil moisture and temperature evaluation. 2018. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Precision agriculture is an emerging concept whose main objective is to optimize the management of agricultural activities by observing, measuring and responding to the temporal and spatial variations of the crops, through the implementation of technologies in the field such as geolocation, sensing and control. In this sense, this study aimed to develop a soil moisture measurement system composed of three steps: smart soil moisture sensors, concentrator unit and monitoring unit. This system aims to assist in the monitoring of rural properties and the segmented management of water resources. The soil moisture sensors consist of an analog circuit, two probes and a temperature sensor. The capacitive method of measurement is applied, in which soil moisture is obtained from the dielectric constant and the capacitance of the electrode-soil matrix. The developed sensor presented error less than 3%, with correlation coefficient of 0.9785. The concentrator unit allows the connection of multiple sensors and has the function of grouping the data referring to the humidity and temperature of each one. The monitoring unit aims to enable remote monitoring of the concentrator unit by the implementation of a long-distance wireless communication link, eliminating the need of physical access to obtain the data. Link tests were performed with a max distance of 2.41 *km* in an urban region and 5.39 *km* in a rural region.

**Keywords:** Precision Agriculture. Capacitive Sensors. Soil Moisture. Smart sensor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sensor de umidade e sistema de comunicação.....	12
Figura 2 - Diagrama representando o princípio de funcionamento da técnica GPR.....	23
Figura 3 - Modelo geral de sistemas de medição.....	29
Figura 4 - Circuito de ponte com transformador de 2 enrolamentos.....	30
Figura 5 - Circuito utilizado no método de ressonância.....	31
Figura 6 - Circuito do método de carga e descarga.....	32
Figura 7 - Metodologia simplificada de desenvolvimento de um sistema embarcado.....	33
Figura 8 - Modelo representando cada etapa do sistema de sensoriamento e comunicação....	35
Figura 9 - Circuito analógico do sensor de umidade.....	37
Figura 10 - Launchpad MSP430G2553.....	37
Figura 11 - Comunicação entre os dispositivos do sistema.....	41
Figura 12 - Kit de desenvolvimento STM32F4 – DISCOVERY.....	42
Figura 13 - Chip LoRa modelo SX1276.....	43
Figura 14 - Projeto do eletrodo de sonda.....	45
Figura 15 - Diagrama esquemático do circuito analógico de medição da unidade sensora.....	47
Figura 16 - Diagrama temporal de leitura do valor de temperatura do sensor MCP9808.....	48
Figura 17 - Estrutura do pacote ModBus RTU.....	51
Figura 18 - Unidade de monitoramento (esquerda) e unidade concentradora (direita).....	55
Figura 19 - Eletrodos de sonda confeccionados em PCI.....	56
Figura 20 - PCI do circuito analógico da unidade sensora.....	57
Figura 21 - PCI contendo sensor de temperatura e CI RS-485.....	58
Figura 22 - PCI contendo sensor de temperatura e CI RS-485.....	59
Figura 23 - Mapa com a máxima distância de comunicação alcançada no centro da cidade de Pato Branco.....	60
Figura 24 - Mapa com a máxima distância de comunicação alcançada no interior de Coronel Vivida.....	61
Figura 25 - Amostras de solo utilizadas nos testes experimentais.....	63
Figura 26 - Eletrodos de sonda inseridos no solo de uma amostra durante o teste de medição.....	64
Figura 27 - Correlação entre a umidade do solo e a tensão de saída do sensor de umidade....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Multiplicadores de <i>clock</i> do CI ICS501. Sendo 0 nível lógico baixo, 1 nível lógico alto e M desconectado.....	39
Tabela 2 - Resultados obtidos no teste do sensor de temperatura .....	65
Tabela 3 - Variação de tensão entre as amostras 1 e 7, em diferentes frequências de medição	65
Tabela 4 - Comparação entre umidade calculada pelo método gravimétrico e pela equação de correlação	67



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AP	Agricultura de Precisão
CI	Circuito Integrado
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
QUM	<i>Quantity Under Measurement</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
UC	Unidade Concentradora
UM	Unidade de Monitoramento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos .....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 Agricultura de precisão .....	16
2.1.1 Monitoramento do solo.....	17
2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO .....	18
2.2.1 Método Gravimétrico .....	18
2.2.2 Método de sonda de nêutrons .....	19
2.2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo .....	20
2.2.4 Reflectometria no Domínio da Frequência.....	21
2.2.5 Radar de penetração no solo.....	22
2.2.6 Método capacitivo .....	23
2.3 SENSORES CAPACITIVOS .....	24
2.3.1 Sensores capacitivos de umidade do solo.....	25
2.4 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA .....	27
2.4.1 Instrumentação para sensores capacitivos .....	29
2.4.1.1 Método da ponte capacitiva.....	30
2.4.1.2 Método de ressonância.....	31
2.4.1.3 Método de carga e descarga.....	31
2.5 SISTEMAS EMBARCADOS .....	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>35</b>
3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA .....	35
3.2 MATERIAIS .....	36
3.2.1 Sensores.....	36
3.2.2 Unidade Concentradora .....	40
3.2.3 Unidade de Monitoramento.....	43

3.3 MÉTODO .....	43
3.3.1 Sensores .....	44
3.3.2 Unidade Concentradora .....	52
3.3.3 Unidade de Monitoramento.....	53
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizada uma breve introdução e contextualização do assunto a ser abordado nesse trabalho. Além disso, serão definidos os objetivos geral e específicos que se pretendem alcançar no desenvolvimento desse projeto. Em sequência é apresentada a justificativa do trabalho ressaltando a importância do tema e sua relevância ao público alvo. Por fim, é realizada uma descrição e visão geral de como o trabalho foi estruturado em capítulos.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A inovação tecnológica dos últimos anos vem transformando e otimizando os processos de produção, inclusive os do setor primário, que incluem sobretudo as atividades de agricultura e pecuária. As operações agrícolas modernas já diferem bastante das realizadas há algumas décadas, buscando, por meio da integração com soluções de tecnologia da informação (TI), aumentar a produtividade, reduzir o desperdício de recursos e diminuir os impactos ambientais.

Acompanhando esses avanços, depara-se com a área de Agricultura de Precisão (AP), que consiste em um sistema de produção e gerenciamento com foco no monitoramento, controle e gestão de todos os recursos necessários no cultivo de produtos agrícolas (NUNES, 2016). Essa filosofia de gerenciamento agrícola foi impulsionada, principalmente, pelo avanço da tecnologia de posicionamento global (do original em inglês *Global Positioning System* – GPS), utilizada em máquinas guiadas por satélite e de tecnologias de sensoriamento.

Atualmente, a solução empregada em grandes plantações é considerá-las como homogêneas, isto é, a aplicação de insumos (fertilizantes, água, etc.) é realizada na mesma quantidade em toda a lavoura, levando em conta apenas as necessidades médias e ignorando as variações dos fatores edafoclimáticos em cada região. Isso resulta em uma produtividade não uniforme e uso ineficiente dos recursos hídricos (NUNES, 2016). Como a agricultura responde por cerca de 70% do consumo mundial de água, e por se tratar de um recurso finito, sua correta administração é de grande importância para a manutenção da produção agrícola e da saúde humana (WALBERT, 2013). Nesse caso, o conceito de AP pode ser utilizado com o

objetivo de modificar esse processo, permitindo que a aplicação desses insumos seja realizada de forma segmentada, eficaz e de acordo com a necessidade específica de cada região.

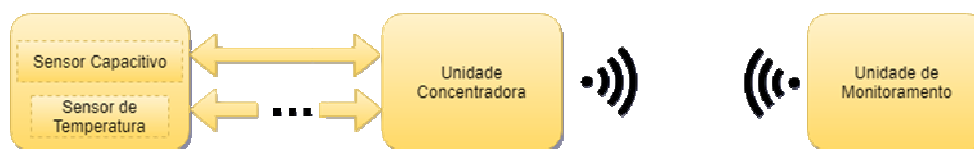
Para a implementação de um sistema agrícola automatizado e inteligente é necessário o desenvolvimento e implementação de tecnologias especiais otimizadas para a agricultura, como sensores inteligentes, protocolos de comunicação e serviços de aplicação. Nesse contexto, o presente trabalho se insere no desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sensor de umidade do solo microcontrolado associado a um sensor digital de temperatura. Esses sensores serão responsáveis por adquirir informações a respeito de características do solo e enviá-las a uma Unidade Concentradora (UC). A UC, que pode ser conectada a múltiplos sensores, envia esses dados através de comunicação sem fio para uma Unidade de Monitoramento (UM), possibilitando o monitoramento remoto dos parâmetros do solo. O desenvolvimento de um sistema como esse favorece tanto o produtor agrícola, capaz de monitorar o solo constantemente e aplicar de forma adequada a água em sua lavoura, quanto o ecossistema, ao reduzir o desperdício de um recurso tão essencial à vida.

## 1.2 OBJETIVOS

Nos tópicos a seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sensor de umidade de solo utilizando o princípio capacitivo e o interfaceamento com um sensor de temperatura, implementando um sistema de comunicação sem fio de forma a transmitir os dados obtidos por esses sensores para uma unidade de monitoramento. Uma visão geral do sistema proposto é apresentada na Figura 1.



**Figura 1 - Sensor de umidade e sistema de comunicação.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A realização do objetivo geral deste trabalho envolve o desenvolvimento de atividades específicas, tais como:

- Pesquisar sobre os atuais métodos e sensores utilizados na medição de umidade do solo;
- Implementar pelo menos dois sensores capacitivos de umidade do solo;
  - Desenvolver eletrodos de sonda para contato com o solo, a partir de uma análise de diferentes formatos.
  - Desenvolver um circuito analógico para excitação do solo e obtenção do sinal relacionado à sua umidade.
  - Implementar um sistema microcontrolado para aquisição, processamento e transmissão das informações obtidas.
  - Associar e desenvolver o interfaceamento com sensor digital de temperatura.
  - Elaborar uma Placa de Circuito Impresso (PCI) e realizar a montagem dos circuitos dos sensores.
- Desenvolver uma unidade concentradora para recebimento dos dados dos sensores.
- Desenvolver uma unidade base de monitoramento, incluindo a implementação de um enlace de comunicação sem fio de longa distância entre as unidades base e concentradora.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O solo caracteriza-se por ser um dos elementos essenciais à vida, sendo substrato principal da produção de alimentos, fornecendo um meio para o crescimento de plantas, servindo de habitat natural para várias espécies de insetos e outros organismos e atuando como um sistema de filtragem da água superficial. Acompanhando os avanços tecnológicos dos últimos anos, em conjunto com a agricultura de precisão, o solo vem sendo estudado em

busca do desenvolvimento de sistemas agrícolas capazes de produzir alimentos em quantidades e qualidade suficientes de forma sustentável, com impacto mínimo no solo e no meio ambiente e com administração eficiente de recursos hídricos. Nesse sentido, sistemas de irrigação têm sido amplamente adotados de forma a reduzir os riscos de perdas na produção em épocas de estiagem (DAMACENO, 2010). Apesar do benefício proveniente da utilização desse tipo de sistema na agricultura, sua aplicação de forma inadequada tem levado a irrigação a ser a maior consumidora de água no Brasil e no mundo, tornando necessárias soluções para a utilização eficiente e sustentável desse tipo de sistema (WALBERT, 2017).

A umidade do solo é uma das características físicas mais essenciais na agricultura, engenharia civil, engenharia de irrigação e hidrologia, já que a consistência e viabilidade do solo está intimamente ligada ao seu teor de umidade (YOU et al, 2013). Dessa forma, o monitoramento desse parâmetro tem grande importância e utilidade na implementação de sistemas automatizados de irrigação, permitindo que a água seja aplicada de forma diferente na mesma área de produção, minimizando desperdícios e maximizando o rendimento. Além disso, o conhecimento da distribuição de umidade no solo é importante no estudo e monitoramento do clima e tempo, conservação do solo, desertificação e gestão de paisagens (DOBRIYAL, 2012).

A necessidade de uma medição precisa da umidade do solo fez com que, ao longo do tempo, fossem desenvolvidos diferentes métodos para sua determinação, incluindo técnicas diretas e indiretas de medição. Apesar do conceito simples, a ausência de um método padrão para aferir essa propriedade e a grande heterogeneidade na distribuição espacial e temporal da umidade do solo dificultam a sua estimativa (DOBRIYAL, 2012).

O método mais comum e preciso de medição de umidade do solo é o gravimétrico, que se trata de um método direto, utilizado inclusive para realizar calibração de equipamentos que aplicam outras técnicas de determinação de teor de umidade do solo. Apesar do benefício de garantir medições precisas, essa técnica precisa ser realizada em laboratório, necessita de ferramentas específicas para obtenção de amostras do solo, é destrutiva e demorada (ZAZUETA, 1994). Como alternativa para uma rápida determinação e monitoramento da umidade do solo podem ser utilizados métodos indiretos que consistem, em sua maioria, em medir as propriedades elétricas do material e relacioná-las ao teor de umidade (MASOUND, 2012). Por se tratarem de métodos indiretos, esses sensores precisam ser devidamente calibrados para os solos a serem monitorados afim de oferecer boa confiabilidade e precisão.

Nesse trabalho é proposto o desenvolvimento de um sensor que utiliza um método indireto de medição, mais especificamente o método capacitivo. Esse método foi escolhido

principalmente por ser não-destrutivo, apresentar precisão relativamente alta, tempo de resposta instantâneo, baixo custo e baixa sensibilidade à salinidade do solo.

O estudo e desenvolvimento de novas técnicas de medição de umidade de solo e o aprimoramento das já existentes é uma busca constante que pesquisadores e cientistas fazem a algumas décadas, devido sobretudo a sua grande aplicabilidade e relevância em diferentes áreas. Nesse sentido, deseja-se desenvolver instrumentos de medição capazes de chegar cada vez mais perto do valor considerado ideal, apresentando exatidão, repetibilidade, rapidez, baixo consumo de energia, vida útil elevada e bom custo-benefício.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está estruturado em três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução e contextualização do tema, o que vem sendo desenvolvido nessa área, os problemas e necessidades de melhoria, a justificativa do projeto e os objetivos a serem alcançados. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico do trabalho, contendo uma breve descrição sobre Agricultura de Precisão (Seção 2.1) e uma revisão a respeito dos principais conceitos e métodos existentes para estimativa de umidade do solo (Seção 2.2) com foco na técnica capacitiva (Seção 2.3). Na sequência, é apresentada uma introdução sobre instrumentação eletrônica e sua aplicação em sensores capacitivos (Seção 2.4). No capítulo 3 são apresentados os materiais (Seção 3.2) e métodos utilizados para a modelagem e desenvolvimentos dos sistemas propostos nesse trabalho bem como uma descrição dos procedimentos experimentais (Seção 3.3).



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo são apresentadas uma introdução às práticas de agricultura de precisão e sua relação com novas tecnologias e as diferentes técnicas para avaliação da umidade do solo, com enfoque na técnica capacitiva. Em seguida, é apresentada uma visão geral sobre o desenvolvimento de instrumentação para sensores capacitivos e implementação de sistemas embarcados.

### 2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura convencional está aos poucos, por meio do desenvolvimento de novas tecnologias aplicáveis no campo, se tornando em agricultura digital, também conhecida como agricultura de precisão (MAT, KASSIM, HARUN, 2015). A AP se trata de um conceito de gerenciamento agrícola baseado em observação, monitoramento e tomada de decisão de acordo com o conhecimento das diferenças temporais e espaciais da plantação. Utilizando essas informações é possível tratar de forma adequada cada região, respeitando suas particularidades e otimizando a produtividade e eficiência na aplicação de recursos como insumos agrícolas, água, fertilizantes, *etc.* (ODARA, KHAN, USTUN, 2015).

O conceito de AP considera que o agricultor tenha acesso a parâmetros relacionados a sua plantação e seja capaz de controlar esses parâmetros manualmente, de forma agendada ou automaticamente (MAT, KASSIM, HARUN, 2015).

As implementações de tecnologias de AP começaram com as máquinas que possuíam sistemas de GPS e geração de mapas, que facilitaram principalmente o manejo de grandes propriedades, nas quais seria praticamente impossível, sem utilizar o GPS, localizar com precisão determinados pontos no meio da plantação para aplicação de um tipo específico de produto. Atualmente, máquinas aplicadoras de fertilizantes já possibilitam a aquisição de mapas georreferenciados de solo e produtividade, que quando utilizados como entrada para um *software*, são interpretados e permitem realizar a adubação de forma variável (OKUNO, 2015).

Além disso, como a AP compreende um sistema baseado na informação, o desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto foi essencial para o seu avanço, provendo indicativos importantes na tomada de decisão na lavoura, otimizando a aplicação de

insumos, diminuindo o custo e os impactos ambientais e, conseqüentemente, aumentando o retorno econômico, social e ambiental (BERNARDI et al., 2014).

### 2.1.1 Monitoramento do solo

Os objetivos principais da gestão segmentada de insumos agrícolas é aumentar a rentabilidade da produção, proteger o meio ambiente e melhorar a qualidade dos produtos. Nesse processo, o conhecimento e aquisição de diferentes características do solo é essencial na tomada de decisão. Apesar dessa importância, a dificuldade em obter características do solo de forma rápida e barata continua sendo um dos maiores desafios da AP (ADAMCHUK, 2004).

O interesse no monitoramento do solo e em manter elevados níveis de eficiência na irrigação de propriedades rurais têm se tornado cada vez mais necessário para manter altos níveis de produtividade. A irrigação excessiva pode resultar em erosão do solo e sua possível contaminação devido ao uso de produtos químicos e fertilizantes. Já a falta de irrigação prejudica a produção e qualidade de alguns cultivos, como hortaliças, que são muito sensíveis a quantidade de água e requerem precisão na irrigação (SHOCK, BARNUM, SEDDIGH, 1998).

A estimativa de produtividade do solo geralmente é realizada por meio de amostras coletadas em diferentes regiões, em diferentes profundidades e tempos. Essas amostras são enviadas para laboratórios de solo, responsáveis por realizar medições de nutrientes e outras características, que dependem diretamente da densidade com que a amostragem foi realizada. Por se tratar de uma técnica em laboratório, esse processo é lento e de custo elevado. Diversas empresas e cientistas trabalham no desenvolvimento de sensores que possam ser utilizados diretamente no campo, por meio de técnicas indiretas de medição como sensores elétricos e eletromagnéticos, ópticos e radiométricos, mecânicos, acústicos, pneumáticos e eletromecânicos (ADAMCHUK, 2004).

Nesse trabalho são utilizados sensores que se baseiam em propriedades elétricas do solo, mais especificamente a condutividade elétrica, sendo esse tipo de sensores os mais utilizados atualmente para aquisição de informações relacionadas ao solo.

De forma a facilitar o monitoramento desses dados remotamente, um enlace de comunicação sem fio é o candidato ideal. Os sensores enviam a informação para um banco de dados centralizado, que pode ser capaz de gerar gráficos, verificar histórico, monitorar e

servir como fonte de informações um sistema de controle em tempo real baseado no estado atual do sistema. O desenvolvimento de aplicações de monitoramento em AP possibilita aumentar a eficiência e produtividade por permitir ao agricultor a possibilidade de ajustar o gerenciamento de acordo às condições pontuais da lavoura.

## 2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

O conhecimento de informações a respeito do teor de umidade do solo é de interesse para muitas áreas como a hidrologia, meteorologia e agricultura (SCHMUGGE, 1979). Devido a isso, muitos equipamentos e métodos têm sido desenvolvidos para determinação da umidade do solo em campo, desde os métodos arcaicos que consistem em sentir o solo com as mãos até os que são baseados em complexos sistemas e componentes eletrônicos (JOHNSON, 1962). Basicamente, as técnicas de medição de umidade do solo podem ser divididas em duas categorias: direta e indireta.

Nas técnicas diretas, o teor de umidade do solo é determinado por meio da comparação de pesos de uma mesma amostra de solo antes e depois dela ser seca. Já na técnica indireta, são medidas as propriedades elétricas do solo por meio de instrumentos eletrônicos. Essas propriedades elétricas são alteradas de acordo com o aumento ou diminuição da umidade no meio, podendo então serem correlacionadas com o teor de umidade do solo (YOU et al, 2013). Nas subseções a seguir algumas das principais técnicas de medição de umidade do solo são explicadas.

### 2.2.1 Método Gravimétrico

O método gravimétrico é o mais antigo de todos e o único método direto existente. Consiste basicamente em coletar uma amostra úmida do solo e realizar sua pesagem antes e depois da mesma ser submetida a uma secagem em forno (JOHNSON, 1962). O tempo médio em que a amostra é mantida no forno varia de 24 a 48 horas, a uma temperatura próxima de 105° C, até que se obtenha um peso constante (DOBRIYAL et al., 2012). A quantidade de água do solo é então calculada por meio da diferença entre o peso original e peso da amostra já seca, sendo expressa por (ALBERTA..., 2016):

$$\theta = \frac{M_s + 100\%}{M_s + M_o} \quad (1)$$

em que  $\theta$  é teor percentual de umidade do solo (%),  $M_s$  é a massa da amostra de solo seca (g) e  $M_o$  é a massa da amostra original (g).

Devido à alta precisão que pode ser obtida com esse método e a facilidade no cálculo da umidade, ele ainda é um dos mais utilizados na medição de umidade do solo. Inclusive utiliza-se como parâmetro padrão de referência na calibração de dispositivos de medição baseados em outros métodos. Suas desvantagens são: a necessidade de laboratórios especializados para realização do procedimento; o tempo necessário desde a aquisição da amostra até o cálculo da umidade; a dificuldade de representar solos heterogêneos sem a necessidade de várias amostras; além de ser uma técnica destrutiva, isto é, requer a remoção de amostras do solo para determinar o teor de umidade; e que têm problemas quando aplicada em solos rochosos (ALBERTA..., 2016).

### 2.2.2 Método de sonda de nêutrons

O método de sonda de nêutrons é um método indireto de avaliação do teor de umidade do solo que se baseia na detecção de nêutrons com baixa velocidade (nêutrons térmicos). A energia dissipada quando os nêutrons colidem com partículas de baixo peso atômico é muito maior do que na colisão com átomos mais pesados. Como o átomo de hidrogênio tem seu peso tomado como sendo a unidade, ou seja, é considerado o átomo mais leve entre todos, esse átomo tem maior capacidade de reduzir a velocidade de nêutrons rápidos do que qualquer outro elemento presente no solo. Essa característica, aliada ao fato de que a água é a maior fonte de átomos de hidrogênio no solo, permite estabelecer uma relação entre nêutrons térmicos e o teor de umidade do solo (ALBERTA..., 2016).

O equipamento consiste basicamente em uma fonte de nêutrons rápidos, um detector de nêutrons térmicos e um dispositivo de contagem. A fonte de nêutrons e o detector são inseridos no solo por um tubo de acesso. Os nêutrons rápidos, assim que emitidos pela fonte, perdem energia devido as colisões elásticas com o núcleo dos átomos dos elementos presentes no solo, em sua grande maioria com os núcleos de hidrogênio, tornando-se nêutrons térmicos. Uma pequena parte dos nêutrons térmicos é espalhada na região de detecção e devidamente contada. A quantidade de nêutrons térmicos é diretamente proporcional a quantidade de

núcleos de hidrogênio presentes no solo permitindo, com a devida calibração, associar esse valor ao percentual de umidade do solo (EHLERS, REESE, ANAGNOS, 1969).

A precisão desse método pode ser maior do que 0,1% em instrumentos comerciais utilizando a curva de calibração do próprio fabricante, que em geral garante que essa curva é linear e aplicável em diferentes tipos de solo. Dessa forma, a necessidade de calibração específica para um determinado tipo de solo só é necessária em casos em que as condições diferem muito das usuais. Esse método é não-destrutivo, sendo necessária intervenção no solo apenas na introdução do tubo de acesso. As medições podem ser efetuadas em intervalos de minutos, permitindo detectar rápidas variações de umidade (ALBERTA..., 2016).

O grande problema e desvantagem desse método está nas medições que são realizadas próximas a superfície do solo, onde uma grande parte dos nêutrons térmicos acaba fugindo para a atmosfera, resultando em uma contagem incorreta e, conseqüentemente, uma avaliação errônea do teor de umidade do solo. Além disso, o custo do equipamento é elevado e, por se tratar de um método que utiliza radiação, é necessário a obtenção de licenças de operação e de operadores qualificados (ALBERTA..., 2016).

### 2.2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo

O método de reflectometria no domínio do tempo ou TDR (do inglês *Time Domain reflectometry*) é utilizado na medição de umidade do solo e de sua condutividade elétrica por meio do uso de ondas eletromagnéticas (DOBRIYAL et al., 2012).

Segundo LEDIEU *et al.* (1986), o conteúdo de água no solo pode ser determinado a partir de propriedades de ondas eletromagnéticas já que estudos de dielétricos provam que a resposta de um material submetido a esse tipo de onda pode ser considerada uma característica do material. Como a velocidade de uma onda eletromagnética depende da constante dielétrica do meio em que ela é propagada, para um determinado solo, a velocidade de propagação é uma função de sua constante dielétrica. Considerando o fato que a constante dielétrica do solo úmido é muito maior do que a do solo seco, essa característica pode ser utilizada na determinação da quantidade de umidade do solo.

O equipamento consiste basicamente em sondas metálicas, geralmente duas ou três, inseridas no solo nas quais é aplicado um pulso eletromagnético. A velocidade de propagação desse pulso é calculada por meio da diferença de tempo entre o pulso ser aplicado e refletido ao alcançar o final da sonda. Quanto menor a velocidade, mais úmido é o solo (ALBERTA...,

2016). A constante dielétrica do solo onde se encontra a sonda é uma função da velocidade de propagação, sendo expressa por (JONES, WRAITH, 2002):

$$\epsilon_d = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2, \quad (2)$$

sendo que  $c$  é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ),  $t$  é o tempo de propagação da onda eletromagnética na sonda (s) e  $L$  é o comprimento elétrico da sonda (m).

A partir dos dados da constante dielétrica é possível realizar sua correlação com a quantidade de água no solo. Como a constante dielétrica da água é muito maior do que a constante dielétrica dos outros elementos presentes no solo, esse método é pouco sensível a variações na composição do solo (JONES, WRAITH, 2002).

O método TDR é não-destrutivo, apresenta boa precisão (em média de 1%) e permite a realização de medições contínuas já que, depois de inseridas as sondas no solo, o processo de medição leva em média apenas alguns segundos. Os problemas dessa técnica são sua sensibilidade ao tamanho dos eletrodos de sonda, que influenciam a precisão da medição, e a sensibilidade ao ambiente onde espaços vazios entre a sonda e o solo podem levar a erros na medição. Além disso, por se tratar de um equipamento complexo, seu custo é elevado (DOBRIYAL et al., 2012).

#### 2.2.4 Reflectometria no Domínio da Frequência

O método de reflectometria no domínio da frequência ou FDR (do inglês *Frequency Domain Reflectometry*) é semelhante ao método de TDR, porém, ao invés de utilizar-se da variação de velocidade de um pulso de onda eletromagnética, tem como parâmetro de medição a variação de frequência de um sinal aplicado (ROBOCK et al., 2000).

As sondas, que geralmente consistem de dois ou mais eletrodos de metal paralelos, funcionam como um capacitor e são inseridas no solo por meio de um tubo de acesso. A capacitância da sonda é alterada pelo solo em torno dos eletrodos, que atua como um meio dielétrico. Conforme a quantidade de água no solo aumenta, suas propriedades dielétricas também são alteradas, fazendo com que a capacitância também aumente (PALTINEANU, STARR, 1997).

A técnica de FDR consiste em formar um circuito elétrico ao conectar esse capacitor a

um oscilador. O sinal do oscilador é variado em um intervalo de frequências limitado a fim de encontrar a frequência de ressonância (em que há maior amplitude do sinal). O teor de umidade do solo é determinado pela variação na frequência do sinal transmitido entre os eletrodos, em que a defasagem desse sinal está relacionada à quantidade de água no meio (LEIB, JABRO, MATTHEWS, 2003).

O método de FDR é não-destrutivo e, quando devidamente calibrado para um tipo de solo específico, esse método apresenta boa precisão, sendo superior ao método de TDR quando considerados altos níveis de salinidade no solo. O tempo de resposta do sensor é praticamente instantâneo, sendo possível utilizá-lo para monitoramento em tempo real. As desvantagens desse método residem nos fatos de a área sensível ser relativamente pequena (em torno de 4 cm), o mau contato entre o solo e os eletrodos, assim como no TDR, atrapalhar nas medições, ter maior sensibilidade a temperatura, densidade e teor de argila, além de necessitar de calibrações específicas para cada solo para garantir uma boa precisão (MUÑOZ-CARPENA, 2015).

#### 2.2.5 Radar de penetração no solo

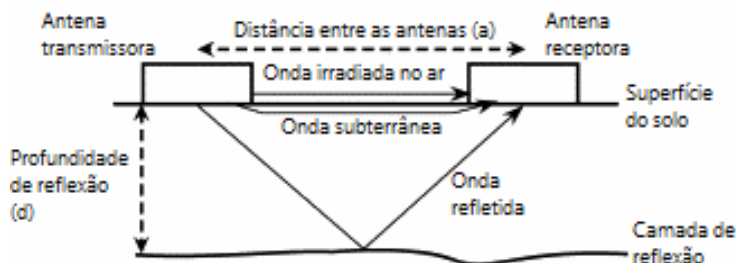
O método de radar de penetração no solo ou GPR (do inglês *Ground Penetrating Radar*) trata-se de um método indireto de medição de umidade do solo, não invasivo, que utiliza da reflexão de ondas eletromagnéticas no solo para estimar a umidade e condutividade do solo.

A técnica de GPR consiste, resumidamente, de um sistema com duas antenas, uma responsável pela transmissão e outra pela recepção de ondas eletromagnéticas. A antena transmissora emite pequenos pulsos de ondas eletromagnéticas de alta frequência (na ordem de MHz a GHz) que são irradiados esfericamente tanto para o ar quanto para dentro do solo. A antena receptora tem a função de medir os sinais emitidos pela fonte em função do tempo (HUISMAN et al., 2003).

Parte das ondas emitidas pela antena transmissora se propagam pelo ar diretamente para a antena receptora. Outra parcela é irradiada a partir da interface solo-ar até a antena receptora, e uma parte é refletida de volta a superfície devido a variações na permissividade do solo, como ilustrado na Figura 2 (LUNT, HUBBARD, RUBIN, 2005).

A permissividade do solo influencia diretamente na velocidade de propagação da onda, que pode ser estimada sabendo-se a distância entre ambas as antenas. Como a

permissividade dielétrica da água é muito maior em relação à permissividade dos outros elementos do solo, variações na sua quantidade têm a maior influência na permissividade dielétrica do solo. Essa característica permite então correlacionar variações na permissividade dielétrica do solo a variações na porcentagem de volume de água no solo (LUNT, HUBBARD, RUBIN, 2005).



**Figura 2 - Diagrama representando o princípio de funcionamento da técnica GPR**  
**Fonte: Adaptado de Lunt, Hubbard, Rubin (2005, p. 256).**

Em geral, as técnicas de medição de umidade do solo, como a técnica de TDR, são capazes de cobrir apenas áreas pontuais de baixa escala, sendo necessária a disposição de vários sensores pela área de interesse quando o local de medição é consideravelmente grande. Nesse sentido, a grande vantagem da técnica GPR é a capacidade de fornecer dados densos e precisos em média escala, além do fato de se tratar de um método não invasivo (não é necessária introdução de equipamentos no solo), fácil de usar e rápido (HUISMAN et al., 2003).

Em contrapartida, o método GPR enfrenta problemas quando aplicado em solos com alta condutividade elétrica, devido a essa característica torná-los opacos ao radar e dissipar a energia transmitida. Além disso, o equipamento é caro e a necessidade do uso e movimentação de antenas relativamente grandes dificulta o manuseio em regiões rochosas ou de relevo íngreme (DOBRIYAL et al., 2012).

#### 2.2.6 Método capacitivo

O método capacitivo é uma técnica não-destrutiva de medição de quantidade de água no solo que se baseia na medição da capacitância entre eletrodos aplicados no solo.

Os métodos de medição de umidade do solo que utilizam de ondas eletromagnéticas têm sido bastante estudados nos últimos anos, de maneira que diversos sistemas de medição



foram desenvolvidos. Apesar de se tratarem de circuitos e formas de medições diferentes, todos os sistemas que se utilizam de ondas eletromagnéticas se baseiam em um conceito em comum: a dependência da constante dielétrica do solo de acordo com sua quantidade de água. Isso se deve, principalmente, ao fato de que a permissividade elétrica relativa (ou constante dielétrica) da água, que é de aproximadamente 80 a uma temperatura de 20 °C, é muito maior do que a permissividade dos minerais do solo e do ar, que são de aproximadamente 4 e 1, respectivamente (JONES et al., 2005).

De acordo com ZAZUETA et al. (1994), a quantidade de umidade do solo pode ser determinada por meio de seu efeito na constante dielétrica do solo pela medição da capacitância entre dois eletrodos aplicados no solo. Esses eletrodos formam um capacitor que, quando inseridos no solo, esse atua como um dielétrico. Como a maior parte da água do solo está na forma gravitacional (aquela que não consegue mais ser retida pelos grãos sólido do solo), é possível estabelecer uma relação direta entre a umidade do solo e sua constante dielétrica, sendo possível, então, determiná-la a partir desse parâmetro.

O método capacitivo possui a vantagem de permitir a obtenção da quantidade absoluta de umidade do solo em qualquer profundidade (ZAZUETA, 1994). Além disso, seu tempo de resposta é instantâneo, permitindo o monitoramento de variações em tempo real. A precisão é relativamente alta quando considerados solos com baixa concentração iônica e os sensores não necessitam de manutenção depois de instalados (DOBRIYAL et al., 2012). Porém, esse método sofre variações com diferentes temperaturas e tipos de solo, sendo necessárias calibrações específicas.

### 2.3 SENSORES CAPACITIVOS

Os sensores capacitivos, aplicados em diversos segmentos, funcionam medindo eletricamente a capacitância entre dois ou mais condutores em um meio dielétrico, em geral o ar ou a água.

De acordo com Dean, Bell e Baty (1987), sensores capacitivos podem ser aplicados em qualquer medição que envolva variações na distância de separação dos eletrodos, na área de sobreposição dos eletrodos ou na relação de permissividade do dielétrico entre eles. Esse monitoramento é feito pela medição de alterações no valor da capacitância dessa estrutura.

As áreas de aplicação desses sensores capacitivos são diversas. Sensores capacitivos são utilizados, por exemplo, na medição de níveis de água de reservatórios, na detecção de gelo em asas de aviões, na medição de massa, gravidade ou aceleração, na medição de pressão

de gases ou sólidos compressíveis, na detecção do toque em telas e em sensores biológicos. Esses sensores também são utilizados para dar identidade de características aos materiais, já que esses possuem diferentes valores de constantes dielétricas (BAXTER, 2000).

Dada a gama de aplicações e a importância do monitoramento de características físicas/químicas por esse tipo de sensor, é de interesse que apresentem resultados precisos e coerentes, sendo minimamente afetados por parâmetros que não sejam os de interesse da medição. Nesse sentido, sensores inteligentes se tornam essenciais, pois são capazes de realizar automaticamente tarefas como calibração, auto teste e compensação de fatores ambientais (BAXTER, 2000).

Se comparados a outros tipos de sensores, como os ópticos, indutivos e transdutores, os sensores capacitores apresentam vantagens de estabilidade, baixo custo e consumo de energia. Ao considerar sua aplicação em medição de umidade do solo, possui a vantagem de não utilizar radiação (sonda de nêutrons), não ser sensível a salinidade do solo (TDR) e não ser uma técnica destrutiva (gravimétrico).

### 2.3.1 Sensores capacitivos de umidade do solo

Os sensores capacitivos de umidade do solo geralmente consistem de uma sonda formada por dois eletrodos metálicos paralelos, separados por uma distância fixa e conectados a uma estrutura comum. Esses eletrodos são responsáveis por receber o estímulo de um sinal de alta frequência de forma a caracterizar a constante dielétrica do meio ao qual estão inseridos.

Quando esse sinal é aplicado, o capacitor formado pelo sistema eletrodos-solo é carregado e descarregado rapidamente, gerando um campo eletromagnético em que o tempo de carregamento está relacionado a capacitância do solo sendo expressado por (KIZITO et al., 2008):

$$t = R * C * \ln \left( \frac{V_t - V_f}{V_i - V_f} \right) \quad t = R * C * \ln \left( \frac{V_t - V_f}{V_i - V_f} \right), \quad (3)$$

sendo  $R$  a resistência em série ( $\Omega$ ),  $V_t$  a tensão no tempo  $t$  (V),  $V_i$  a tensão inicial (V),  $V_f$  a tensão de alimentação (V) e  $C$  a capacitância do solo (F).

O valor da capacitância de um dado capacitor é determinado basicamente por três

fatores relacionados exclusivamente a sua construção. Considerando que, para cada fator os outros dois permaneçam constantes, seus efeitos na capacitância são:

**Área das placas** – Quanto maior a área das placas maior o fluxo elétrico entre elas para uma determinada tensão aplicada. Portanto, a capacitância é diretamente proporcional a área das placas do capacitor, isto é, quanto maior a área maior será a capacitância.

**Distância entre as placas** – a relação da distância entre as placas e o valor da capacitância é inversamente proporcional, ou seja, quanto mais distante, menor será esse valor.

**Material dielétrico** – alguns materiais oferecem menor resistência quando aplicados a um campo elétrico de acordo com sua característica de permissividade. Quanto maior a permissividade do material entre as placas, maior é o valor da capacitância

Como no caso da sonda capacitiva a área dos eletrodos e a distância entre eles permanece constante, o único desses fatores que exerce influência no valor da capacitância é o material dielétrico, nesse caso o solo. A relação entre a capacitância de um capacitor e a permissividade dielétrica do material entre seus eletrodos é expressa por (HALLIDAY, 2000):

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon * g , \quad (4)$$

sendo que  $\varepsilon_0$  é a permissividade no vácuo ( $8,85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N}^2 \cdot \text{m}^2$ ),  $\varepsilon$  a permissividade do material dielétrico e  $g$  os fatores geométricos do capacitor.

A partir do cálculo do valor da capacitância pelo tempo de carga  $t$  em (3), é possível determinar a permissividade do solo substituindo esse mesmo valor em (4), resultando em (KIZITO et al., 2008) :

$$\varepsilon = \frac{t}{R * g} * \frac{1}{\ln\left(\frac{V_t - V_f}{V_i - V_f}\right)} . \quad (5)$$

Dessa forma, considerando a predominância da permissividade dielétrica da água comentada anteriormente, é possível correlacionar o tempo de carga  $t$  com o teor de umidade do solo (KIZITO et al., 2008).

Assim como os sensores capacitivos utilizados para medição de outros parâmetros, os sensores de umidade do solo apresentam variações indesejáveis em seus resultados de acordo com as condições do ambiente, como a temperatura, e a frequência do sinal aplicado nos

eletrodos.

A dependência de temperatura pode ser atribuída a alterações dos fatores geométricos do eletrodo e a própria dependência da permissividade da água a sua temperatura (DEAN, BELL, BATY, 1987). Além disso, segundo Seyfried e Murdock (2001), os efeitos de temperatura na resposta do sensor são específicos de cada tipo de solo e não podem ser corrigidos com um fator empírico universal. Portanto, para que as medições representem propriedades específicas do solo, e não erros provenientes do instrumento, é necessária a obtenção empírica do fator de conversão específico para o solo de aplicação. A informação de temperatura pode ser adquirida com o acoplamento de um sensor de temperatura na própria sonda, podendo aplicar a correção do valor de umidade do solo no mesmo ponto de aplicação do sensor.

A frequência de medição é um dos fatores que tem maior influência na sensibilidade de sensores capacitivos com a textura do solo, condutividade elétrica e temperatura (KIZITO et al., 2008). Eller e Denoth (1996) realizaram medidas das constantes dielétricas de diferentes tipos de solo num intervalo de frequência de 500 kHz até 95 MHz. Foi observada em frequências menores que, além da influência da água, existem efeitos provenientes da textura do solo, de sua estrutura e composição química. Ainda, segundo esses autores, no intervalo de frequência específica de 30 MHz até aproximadamente 200 MHz, a parte real da permissividade dielétrica é independente do valor da frequência, mas sim do tipo de solo. De acordo com Kizito et al. (2008), levando em consideração os diversos estudos na busca pela frequência de medição ideal, alguns inclusive se contradizendo, conclui-se que a utilização de altas frequências é necessária para uma medição precisa da quantidade de umidade do solo, minimizando a influência da condutividade e temperatura.

Os sensores capacitivos, capazes de prover resultados praticamente instantâneos, podem ser utilizados como forma de monitorar em tempo real a quantidade de água presente em cada região da propriedade e aplicar os recursos hídricos conforme a demanda e características de cada cultivo e, conseqüentemente, aumentando a produtividade.

## 2.4 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

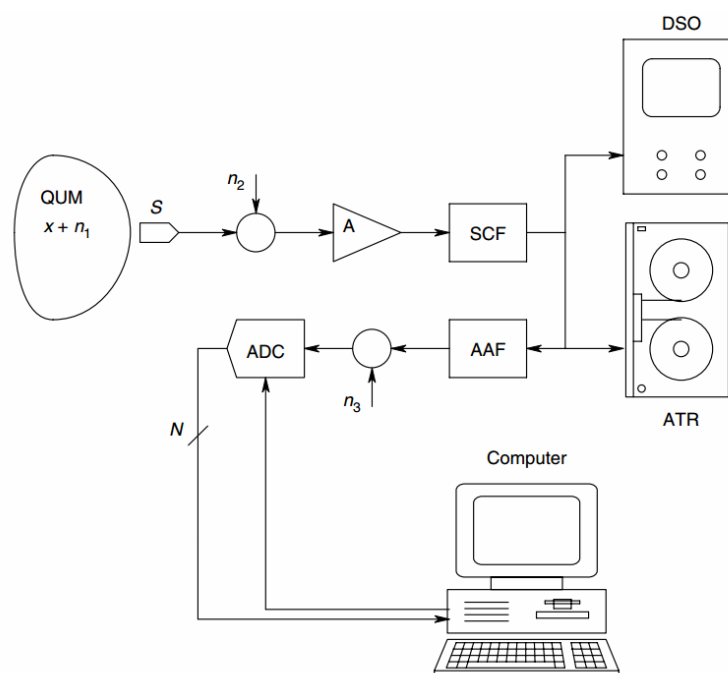
A instrumentação eletrônica é a área responsável pelo desenvolvimento e estudo de técnicas e instrumentos de medição utilizados na quantificação de valores físicos. Essa quantificação envolve a determinação do tamanho desse parâmetro físico em termos de

unidades padrão de magnitude (BERLIN, GETZ, 1988).

Sistemas de medição são aplicados em diversos ramos da engenharia como em sistemas de controle, onde decisões são geralmente tomadas com base nas características físicas (massa, temperatura, pressão) ou elétricas (corrente, tensão, capacitância), na localização de objetos ou eventos como o epicentro de terremotos, na discriminação e contagem de objetos como glóbulos vermelhos no sangue, na medição de concentração de substâncias químicas, entre outros (NORTHROP, 2005).

Devido aos avanços tecnológicos dos últimos anos, sobretudo nas áreas de informática e eletrônica, os instrumentos têm se tornado cada vez mais complexos e precisos, fazendo da instrumentação eletrônica uma área multidisciplinar que aborda vários campos dentro da engenharia e ciência (BALBINOT, 2010). Instrumentos utilizados em medições de características elétricas podem variar desde o uso de tecnologias já bastante exploradas na indústria elétrica e que são relativamente simples, até circuitos eletrônicos complexos e sofisticados controlados por computadores (BERLIN, GETZ, 1988).

Segundo Northrop (2005), os sistemas de medição podem ser genericamente representados pelo diagrama de blocos da Figura 3. O sistema consiste basicamente de uma grandeza física a ser quantificada, nesse caso chamada de quantidade a ser medida ou QUM (do inglês *Quantity Under Measurement*). Essa grandeza é convertida, por meio de um transdutor, em uma grandeza elétrica, como resistência, capacitância ou indutância, ou por um sensor (S) em um sinal elétrico (tensão ou corrente).



**Figura 3 - Modelo geral de sistemas de medição**  
**Fonte: Northrop (2005, p.2).**

O sinal proveniente do sensor geralmente é amplificado e filtrado por um sistema de condicionamento de sinal. A amplificação é necessária porque muitas vezes o sinal resultante do sensor é de baixa magnitude. O objetivo do condicionamento do sinal é permitir o aumento da relação sinal-ruído ou SNR (do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) do sinal analógico do sensor e diminuir a impedância de saída do circuito. O sinal condicionado pode ser distribuído para outros dispositivos como dispositivos de gravação e *displays*, ou ser filtrado e convertido para um sinal digital por meio de um conversor analógico digital ou ADC (do inglês *Analog to Digital Converter*). Quando convertido em palavras digitais, esse sinal pode ser processado, filtrado e armazenado em computadores digitais. A precisão e resolução desses sensores geralmente é limitada pelos principais fatores de ruído, como ruído proveniente do ambiente, ruído associado ao tratamento do sinal e ruído gerado no processo de conversão do sinal analógico para digital (NORTHROP,2005).

#### 2.4.1 Instrumentação para sensores capacitivos

A capacitância pode ser definida como uma propriedade elétrica que existe entre dois condutores quando separados por um material não-condutor. Quando um capacitor é submetido a uma tensão entre seus terminais ele se carrega proporcionalmente ao valor dessa tensão. Essa constante de proporcionalidade é chamada de capacitância. A capacitância de um capacitor depende de sua geometria e propriedades do dielétrico entre as placas (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010). Para um capacitor de placas paralelas, a capacitância é expressa por:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot A}{d}, \quad (6)$$

sendo  $\epsilon_0$  a permissividade no vácuo ( $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}^2 \cdot \text{m}^2$ ),  $\epsilon$  a permissividade do material dielétrico,  $A$  a área do capacitor ( $\text{m}^2$ ) e  $d$  a distância entre as placas

Como pode ser observado em (6), a capacitância aumenta quando um material dielétrico se encontra entre as placas. Esse princípio é utilizado na medição de umidade de solo por sensores capacitivos comentado na seção 2.3.1.

Quando os terminais do capacitor são submetidos a um sinal de corrente alternada ou AC (do inglês *Alternating Current*), as placas são carregadas e descarregadas constantemente, fazendo com que uma corrente circule pelo circuito. Essa corrente é dada por (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010):

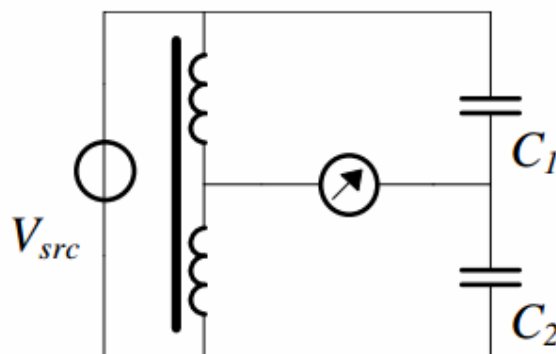
$$i_{AC} = \frac{C \cdot dV}{dt}, \quad (7)$$

em que  $C$  é a capacitância (F) e  $dV/dt$  é a taxa de variação da tensão aplicada dos terminais (V/s).

Os métodos para medição da capacitância podem ser divididos em categorias: métodos de ponte capacitiva, método de ressonância e métodos de carga e descarga, os quais são descritos nas subseções a seguir.

#### 2.4.1.1 Método da ponte capacitiva

Trata-se de um método antigo de medição de capacitância, utilizado principalmente para medir valores baixos de capacitância, baseado em circuitos de ponte. O circuito da ponte com transformador de dois enrolamentos pode ser visualizado na Figura 4.

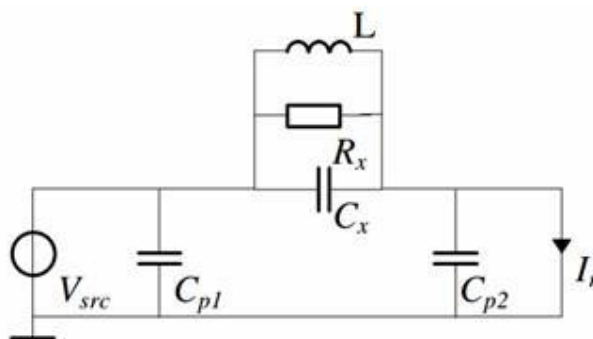


**Figura 4 - Circuito de ponte com transformador de 2 enrolamentos**  
**Fonte: Toth (1997, p.66).**

O método consiste em encontrar o valor de equilíbrio da ponte que, nesse circuito, ocorre quando a razão entre os capacitores é igual a razão dos transformadores. Para isso, um dos capacitores ou a razão dos transformadores deve ser variável (TOTH, 1997).

### 2.4.1.2 Método de ressonância

A diferença nesse método está na adição de um indutor em paralelo ao capacitor a ser medido, sendo indicado para medições de propriedades dielétricas de materiais. O circuito utilizado nesse método é apresentado na Figura 5.



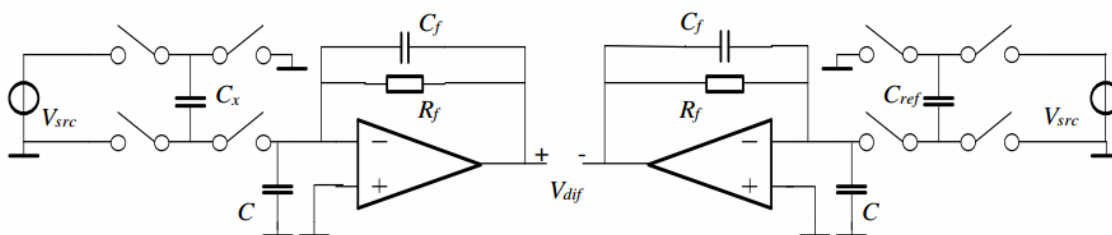
**Figura 5 - Circuito utilizado no método de ressonância**  
**Fonte: Toth (1997, p.69).**

Nesse método, o circuito ressonante formado pelo capacitor desconhecido  $C_x$  e o indutor  $L$  adicionado ao circuito é excitado por uma tensão variável  $V_{src}$ . A frequência desse sinal é alterada até que a frequência de ressonância do circuito ( $f_r$ ) seja encontrada (TOTH,1997). A valor de  $C_x$  é dado por:

$$C_x = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_r)^2 \cdot L} \quad (8)$$

### 2.4.1.3 Método de carga e descarga

O método de carga e descarga trata-se de um método baseado na carga e descarga de um capacitor. Como exibido no circuito da Figura 6, o capacitor é carregado por uma fonte de tensão  $V_{src}$  e descarregando por meio de um amplificador de carga, por meio do chaveamento do circuito a uma frequência  $f$ . Utilizando dois estágios de medição semelhantes, porém um deles com um capacitor de referência, é possível calcular o valor da capacitância desconhecida por meio de (TOTH,1997):





$$V_{dif} = f * R_f * V_{src} * (C_x - C_{ref}) . \quad (9)$$

**Figura 6 - Circuito do método de carga e descarga**

Fonte: Tooth (1997, p.69).

## 2.5 SISTEMAS EMBARCADOS

Ao longo dos últimos anos têm-se vivenciado, por meio do avanço das tecnologias de produção de *hardware* e pela miniaturização dos sistemas computacionais. As tarefas realizadas por computadores que, há alguns anos, eram tão grandes a ponto de precisarem do espaço de uma sala, nos dias de hoje são realizadas em equipamentos com igual ou maior capacidade computacional e que cabem no bolso. Essa miniaturização vem permitindo a integração de unidades de processamento de dados nos mais variados dispositivos como TVs, carros, *smartphones*, aviões, sistemas de sensoriamento, sistemas de controle, etc. nos quais a presença de um sistema computacional traz inúmeras funcionalidades.

A presença desses sistemas em cada vez mais dispositivos reflete o conceito de computação ubíqua ou computação persuasiva, que significa a inserção de sistemas computacionais no cotidiano das pessoas, permitindo o acesso a informação em qualquer instante e a qualquer momento. A implementação desse tipo de sistemas se sustenta basicamente no desenvolvimento de duas tecnologias principais: sistemas embarcados e tecnologias de comunicação (MARWEDEL, 2010).

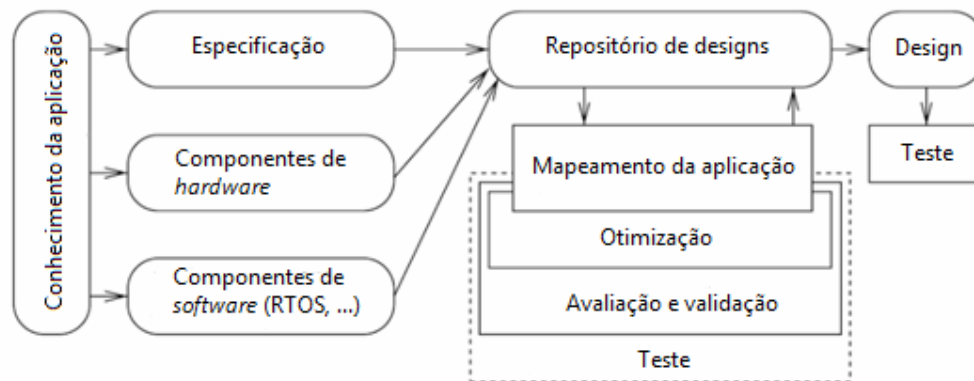
Sistemas embarcados são uma classe de sistemas computacionais dedicados, formados por microcontroladores ou microprocessadores, tendo *hardware* e *software* altamente integrados e desenvolvidos para desempenhar funções específicas. A palavra embarcado vem do fato de que esses sistemas geralmente fazem parte de um sistema maior, representando a existência de um computador “não-visível” nesse sistema (LI, YAO, 2003).

Em geral, os sistemas embarcados devem satisfazer as seguintes características (GODSE, MULANI, 2009):

- função específica – diferente dos computadores pessoais, que possuem processadores poderosos e desenvolvidos para o processamento de aplicações em geral, os sistemas embarcados são concebidos de forma a desempenhas tarefas específicas;
- altamente limitado – as limitações no desenvolvimento de sistemas embarcados, como recursos de *hardware*, geralmente são maiores do que em outros sistemas computacionais;

- reativo e tempo real – um sistema embarcado é sensível ao ambiente e deve continuamente reagir a alterações, inclusive em algumas aplicações garantindo a computação de resultados em tempo real sem latência;
- programabilidade de dispositivos – a funcionalidade dos dispositivos de *hardware* específicos, como periféricos, pode ser alterada a partir de modificações no *software*;
- multi-tarefas - sistemas embarcados devem gerenciar várias tarefas executando ao mesmo tempo;
- baixo consumo de energia;
- baixo custo de produção.

Uma metodologia simplificada e geral de desenvolvimento de um sistema embarcado é apresentada na Figura 7.



**Figura 7 - Metodologia simplificada de desenvolvimento de um sistema embarcado**  
 Fonte: Traduzido de Marwedel (2009, p. 13).

Essa metodologia considera a tarefa de desenvolvimento do sistema dividida em várias subtarefas (MARWEDEL, 2010):

- conhecimento da aplicação – fase em que é iniciado o desenvolvimento, tendo como ponto de partida o levantamento de ideias da aplicação e qual o seu propósito;
- especificação – levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais necessários para que o sistema possa desempenhar as funções definidas na etapa de conhecimento da aplicação;
- componentes de *hardware* – definição dos equipamentos de *hardware*

necessários para a aplicação como processador, conversores analógico-digital, *timers*, comunicação serial, etc.

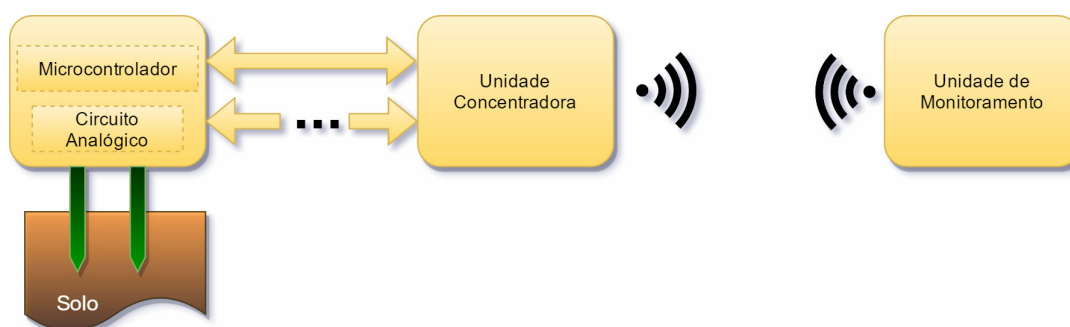
- componentes de *software* – definição dos recursos de *software* que serão utilizados, como sistemas operacionais de tempo real ou RTOS (do inglês *Real Time Operating System*), tarefas principais e suas operações;
- repositório de *designs* – ambiente de desenvolvimento integrado ou IDE (do inglês *Integrated Development Environment*) e repositório utilizado para gerenciamento da aplicação, suas diferentes versões e controle de revisão;
- mapeamento da aplicação – consiste em, durante as várias iterações de *design*, mapear as operações de tarefas concorrentes e operações de escalonamento e compilação;
- avaliação e validação – análise do sistema em relação aos requisitos desejáveis em sistemas embarcados como desempenho, consumo de energia, custo de produção, etc. Além disso, inclui a validação dos requisitos definidos nas etapas iniciais de desenvolvimento;
- otimização – buscar aumentar a eficiência do sistema e de questões relacionadas ao consumo de energia;
- teste – verificação do comportamento do sistema já integrado e em execução para descoberta de erros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Nesse capítulo será apresentada uma previsão dos componentes a serem utilizados no desenvolvimento dos sensores, unidades concentradora e de monitoramento e das tecnologias aplicadas na implementação e integração do sistema como um todo.

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema proposto nesse trabalho consiste basicamente do desenvolvimento de dois sensores inteligentes de umidade do solo associados a um sensor digital de temperatura cada e de outras duas unidades responsáveis pela aquisição, processamento e distribuição de dados dos dados desses sensores. Uma visão geral do sistema é exibida na Figura 8.



**Figura 8 - Modelo representando cada etapa do sistema de sensoriamento e comunicação**  
**Fonte: Autoria Própria**

Os sensores são formados por um microcontrolador, um circuito analógico de medição, um sensor de temperatura e dois eletrodos sondas. Aplicando a técnica capacitiva, esses sensores são os responsáveis por responder, mediante a um sinal analógico, às variações de umidade do solo. O sensor de temperatura terá a função de permitir monitorar as variações da temperatura no solo no local de medição.

A unidade concentradora, como o próprio nome sugere, têm por objetivo atuar com concentradora de dados de medição oriundos de diferentes sensores. Isso permite, por exemplo, que vários sensores sejam distribuídos em uma área em torno de uma UC ou até mesmo implementados em um mesmo local, porém em diferentes profundidades, todos conectados à mesma unidade.

Por último, de forma a possibilitar o monitoramento da UC à distância, será implementado uma unidade de monitoramento. A UM têm por objetivo facilitar o acesso aos dados dos sensores e eliminar a necessidade de instalação de fios para comunicação - uma tarefa difícil, principalmente em grandes propriedades ou nos casos em que os sensores estão implementados a grandes distâncias. A troca de informações entre a UM e UC se dará por meio da utilização de comunicação sem fio de longo alcance possibilitando o monitoramento remoto de cada UC e dispensando a necessidade de acesso físico direto para a coleta dos dados dos sensores.

## 3.2 MATERIAIS

Nas sub-seções a seguir são listados os materiais utilizados em cada uma das etapas do sistema proposto nesse trabalho.

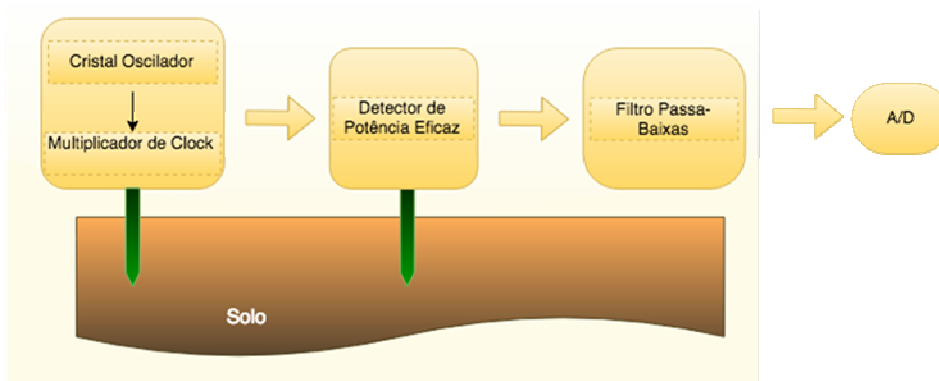
### 3.2.1 Sensores

Os sensores inteligentes de medição são compostos de um cristal oscilador, um multiplicador de *clock*, um detector de potências eficaz e um filtro passa-baixas, como apresentado na Figura 9.

O sinal proveniente da excitação do cristal oscilador é aplicado na entrada de um multiplicador de *clock*, permitindo que sejam geradas múltiplas frequências a partir da frequência base do cristal. O sinal do multiplicador de *clock* é, então, aplicado em um dos eletrodos de sonda inserido no solo. O segundo eletrodo de sonda, que não possui nenhuma ligação elétrica direta com o primeiro, recebe esse sinal atenuado ou intensificado de acordo com as características elétricas do solo, sendo a tensão eficaz desse sinal identificada por um detector de potência eficaz.

Por último, o sinal de saída do detector de potência é aplicado em um filtro passa-baixas, de maneira a remover possíveis ruídos ou sinais de alta frequência indesejados provenientes de variações elétricas no circuito. Com o sinal já filtrado, este é convertido em palavras digitais pelo conversor A/D do microcontrolador.

O desenvolvimento dos dois sensores inteligentes de medição contemplou a utilização de vários materiais os quais são descritos nas subseções a seguir.

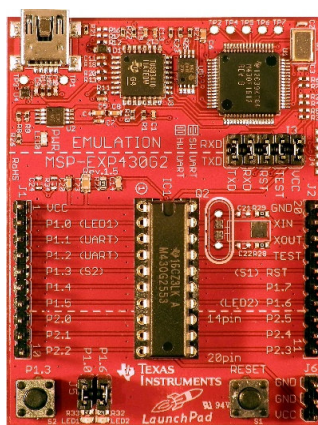


**Figura 9 - Circuito analógico do sensor de umidade.**  
**Fonte: Aatoria Própria**

### 3.2.1.1 Microcontrolador

O microcontrolador foi utilizado para aquisição e processamento de sinais. Como o processamento realizado diretamente no microcontrolador de cada sensor não se trata de tarefas complexas e considerando a possível implantação desses sensores para monitoramento em um longo período de tempo, é de interesse que esses microcontroladores possuam baixo consumo de energia.

Levando isso em consideração, foram utilizados dois kits LaunchPad MSP430G2553, da empresa Texas Instruments, o qual é apresentado na Figura 10.



**Figura 10 - Launchpad MSP430G2553**  
**Fonte: Texas Instruments**

Entre as principais características desse kit estão (TEXAS, 2015):

- Microcontrolador MSP430G2553;
  - CPU 16 *bits*;
  - 16 kB de memória FLASH;
  - 512 B de memória RAM;
  - *Timers* de 16 *bits*;
  - ADC de 10 *bits*, 8 canais;
- Interface I2C, SPI e UART;
- Portas de entrada e saída com interrupções;
- Conectividade USB;

### 3.2.1.2 Cristal Oscilador

O cristal oscilador é um material piezoelétrico, bastante utilizado em circuitos osciladores que utilizam da ressonância desse cristal em vibração para gerar um sinal elétrico repetitivo de determinada frequência.

Nesse trabalho o sinal gerado por um cristal oscilador de 25 *MHz* servirá de entrada para o multiplicador de *clock* que, por sua vez, transmitirá esse sinal para os eletrodos inseridos no solo.

### 3.2.1.3 Multiplicador de *Clock*

O multiplicador de *clock* terá a função de gerar, a partir da frequência base do cristal, o sinal de alta frequência que será aplicado em um dos eletrodos-sonda do sensor. Foi utilizado o modelo ICS501 da fabricante IDT, que suporta frequências de saída de até 200 *MHz*.

Esse CI permite a seleção do multiplicador desejado por meio de duas portas tri-level (S0 e S1). A Tabela 1 apresenta os multiplicadores disponíveis no ICS501 e as respectivas frequências mínimas de entrada.

**Tabela 1 - Multiplicadores de *clock* do CI ICS501. Sendo 0 nível lógico baixo, 1 nível lógico alto e M desconectado.**

S1	S0	CLK	Entrada mínima (MHz)
0	0	4x entrada	15
0	M	5.333x entrada	12
0	1	5x entrada	12
M	0	10x entrada	6
M	M	2x entrada	30
M	1	12x entrada	5
1	0	6x entrada	10
1	M	3x entrada	20
1	1	8x entrada	10

#### 3.2.1.4 Detector de potência eficaz

O detector de potência eficaz terá função de converter o sinal identificado em um dos eletrodos de sonda em sua tensão eficaz equivalente. O modelo utilizado foi o AD8361 da Analog Devices, que suporta frequências de entrada de até 2.5 GHz (ANALOG, 2018).

O AD8361 é destinado a medições de potência eficaz desde sinais com formato de onda simples até os mais complexos. O circuito integrado é alimentado por uma tensão de 2,7 a 5,5 V, e possui em sua saída uma resposta linear em tensão CC equivalente a potência eficaz do sinal de entrada, sendo essa conversão da ordem de  $7,5V / V_{RMS}$  (ANALOG, 2018).

#### 3.2.1.5 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura será utilizado para aquisição da temperatura do solo no local de medição. O modelo utilizado, MCP9808 da Microchip, possui um elevado grau de precisão (0.25 °C) se tratando de medições de temperatura, e converte temperaturas no intervalo de -20 °C a 100 °C em palavras digitais. Além disso, possui uma série de registradores de configuração, nos quais podem ser definidas a precisão das medidas, as temperaturas limite, o modo de economia de energia e o acionamento e desligamento do sensor (MICROCHIP, 2011).



### 3.2.1.6 Transceiver RS-485

Transceiver ISL8490 da Renesas, responsável pela implementação da camada física RS-485 na comunicação entre unidade sensora e unidade concentradora. Esse circuito permite a transmissão de dados full-duplex (4 fios) a uma taxa de transferência de até 5Mbps, com no máximo 32 dispositivos conectados ao barramento. (RENESAS, 2016).

### 3.2.1.7 Placas de circuito impresso

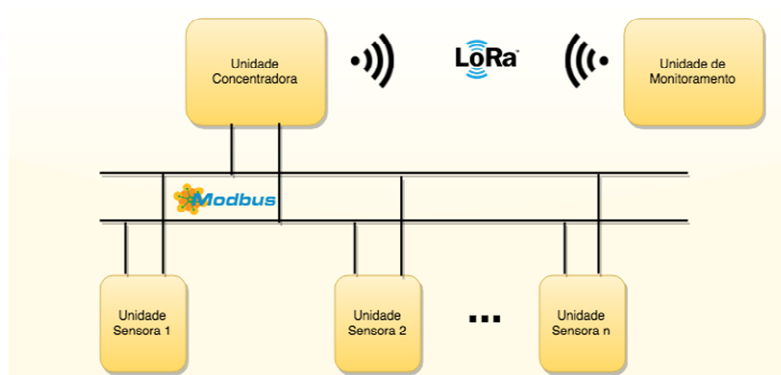
Placas de circuito impresso tem a função de sustentar os componentes em suas posições de funcionamento e fornecer os percursos de corrente para o funcionamento do sistema como um todo. Essa placa foi utilizada na confecção da sonda e do circuito analógico de medição.

## 3.2.2 Unidade Concentradora

A unidade concentradora atua como um agregador de dados dos sensores aos quais ela está fisicamente conectada. A comunicação com esses sensores para a aquisição dos dados é realizada de forma serial, por meio de um barramento RS-485 em conjunto com o protocolo ModBus, permitindo a conexão simultânea de até 32 dispositivos.

Os dados obtidos pela unidade concentradora são disponibilizados para a unidade de monitoramento, sendo que a comunicação entre elas é realizada por meio de radiofrequência, utilizando a camada física e de enlace LoRa. Uma visão geral da organização e dos protocolos utilizados na comunicação entre os dispositivos do sistema é apresentada na figura 11.

O desenvolvimento da unidade concentradora compreendeu a utilização do mesmo *transceiver* RS-485 do sensor, além dos materiais adicionais descritos nas subseções a seguir.

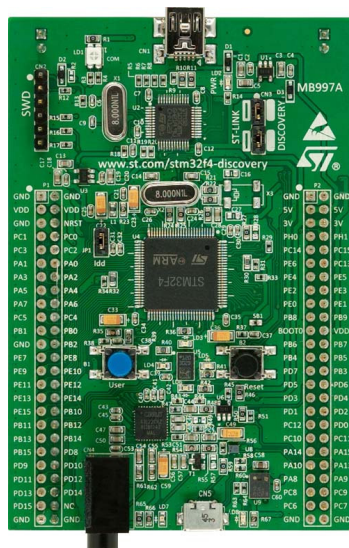


**Figura 11 - Comunicação entre os dispositivos do sistema**  
**Fonte: Autoria Própria.**

### 3.2.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador da unidade concentradora tem a função de realizar o processamento de dados provenientes de vários sensores e onde será implementado o protocolo de comunicação sem fio utilizado na transmissão de dados para a unidade de monitoramento. Para viabilizar o funcionamento da unidade concentradora com bateria, é de interesse que esse microcontrolador apresente baixo consumo de energia e, ao mesmo tempo, tenha capacidade de processamento suficiente para realizar as tarefas inerentes ao protocolo de comunicação e processamento de dados dos sensores.

O microcontrolador utilizado, e que atende a esses requisitos, foi o STM32F407VG, da empresa *STMicroelectronics*, presente no *kit* STM32F4-Discovery, que pode ser visualizado na Figura 12.



**Figura 12 - Kit de desenvolvimento STM32F4 – DISCOVERY**  
**Fonte: STMicroelectronics**

As principais características desse kit são (STMICROELECTRONICS, 2016):

- Microcontrolador STM32F407VGT6;
  - CPU ARM 32-bit Cortex M4 168 MHz;
  - 1 MB de memória FLASH;
  - 192 kB de memória RAM;
- Conexão USB;
- 2 push-buttons;
- Alimentação para aplicações externas;
- Interface de comunicação UART, LIN, Irda, I2C, SPI e CAN;

### 3.2.2.2 Módulo de rádio LoRA

O módulo de rádio implementa a camada física do sistema de comunicação sendo escolhido o *chip* SX1276, exibido na Figura 13, que utiliza a tecnologia LoRA (do inglês Long-Range) da Semtech.



**Figura 13 - Chip LoRa modelo SX1276**  
**Fonte: Modtronix**

O LoRa é uma tecnologia de modulação proprietária da Semtech, a qual é baseada na modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que aumenta de forma significativa o alcance da comunicação se comparada a tecnologia de modulação *Frequency Shift Keying* (FSK) amplamente utilizada em dispositivos sem fio de baixo consumo (SEMTECH, 2016).

A alta sensibilidade desse rádio o torna ideal para utilização em aplicações que exigem robustez e grande alcance. O modelo SX1276 permite utilizar as modulações FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa e OOK, tendo o *bitrate* configurável até um máximo de 300 kbps (SEMTECH, 2016).

### 3.2.3 Unidade de Monitoramento

A unidade de monitoramento permite que os dados da unidade concentradora sejam solicitados e visualizados à distância, trocando pacotes de dados por meio de comunicação sem fio. Para a implementação dessa unidade foram utilizados o mesmo microcontrolador e módulo de rádio usados na Unidade Concentradora, tendo como adicional apenas um Display LCD 16x2, usado para facilitar a visualização dos dados recebidos da unidade concentradora.

## 3.3 MÉTODO

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de forma a reunir trabalhos e estudos já existentes sobre as diferentes técnicas de medição de umidade do solo. Como esse trabalho tem foco no desenvolvimento de sensores aplicando a técnica capacitiva, a pesquisa

foi direcionada principalmente a estudos que envolvam essa técnica de medição. Nesse processo foi identificado que o modelo proposto por Zhen et al. (2014) possui resultados consistentes e apresenta estabilidade e precisão relativamente alta, satisfazendo as necessidades de uma possível aplicação prática no campo. Além disso, os materiais utilizados na implementação do circuito proposto por esse modelo apresentam relativa facilidade de aquisição e não envolvem o uso de equipamentos muito complexos e/ou que não estejam disponíveis para utilização nos laboratórios da universidade. Esses foram os principais motivos que influenciaram na decisão de tomar esse modelo como base no desenvolvimento do sensor de umidade apresentado nesse trabalho.

O desenvolvimento do sistema proposto foi separado em 3 etapas: sensores, unidade concentradora e unidade de monitoramento. A metodologia de desenvolvimento de cada etapa do sistema é descrita nas seções a seguir.

### 3.3.1 Sensores

Os sensores de umidade de solo são formados de um circuito analógico de medição, um microcontrolador e dois eletrodos-sonda, sendo os eletrodos inseridos no solo durante o processo de medição. Um oscilador será responsável por gerar um sinal de alta frequência a ser aplicado em um dos eletrodos sonda e a umidade do solo será determinada por meio da análise do sinal presente no segundo eletrodo. Como a matriz eletrodos-solo forma um capacitor, em que o solo atua como dielétrico, variações na quantidade de água tendem a modificar a capacitância equivalente, alterando as propriedades do sinal identificado no segundo eletrodo e permitindo correlacionar essas alterações com a umidade do solo.

Além disso, será associado a cada sensor de umidade um sensor de temperatura, responsável por compensar erros de medição que sejam ocasionados por eventuais variações na temperatura do solo. Essa característica de compensação automática à variação de fatores ambientes permite classificar esse sensor como inteligente.

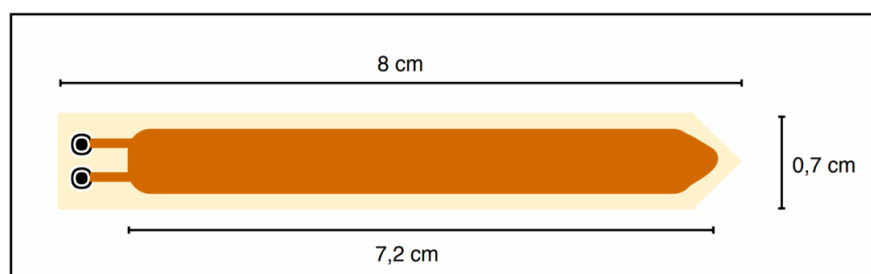
O tratamento do sinal do circuito analógico de medição e do sensor de temperatura será executado a partir de um microcontrolador. Inicialmente, o sinal analógico adquirido pelo circuito analógico será transformado em palavras digitais a partir do conversor AD de um microcontrolador acoplado ao sensor. Os dados resultantes dessa conversão serão processados e, dependendo da resposta do sensor de temperatura, devidamente compensados. Além disso, devido as variações das características de diferentes tipos de solo, as quais também têm

influência em suas propriedades elétricas, o microcontrolador terá a função de calibrar o sinal do sensor de umidade para um tipo de solo em específico. Essa calibração será efetuada a partir de testes em laboratório, utilizando como base o método gravimétrico.

O detalhamento do projeto de cada uma das partes integrantes do sensor é apresentado nas subseções a seguir.

### 3.3.1.1 Eletrodos de Sonda

O projeto das sondas utilizadas nesse trabalho foi realizado no *software* de design de esquemáticos *Eagle*, e baseado na geometria proposta em Zhen et al.(2014). Os eletrodos possuem geometria retangular, com exceção de uma das extremidades, que possui formato triangular para facilitar a sua inserção no solo. Na Figura 14 é apresentado o esquemático do projeto do eletrodo, possuindo 8 cm de comprimento, 0,7 cm de largura e 0,02 cm de espessura.



**Figura 14 - Projeto do eletrodo de sonda**  
**Fonte: Autoria Própria**

Como é possível observar na imagem, o cobre não está presente em toda a extensão dos eletrodos, sendo sua área efetiva de  $4,23 \text{ cm}^2$ . Além disso, na extremidade esquerda foram projetadas duas perfurações para realizar a solda de pinos conectores do tipo macho. Esses conectores são usados para acoplar a ponteira ao restante do circuito da unidade sensora durante o processo de medição.

### 3.3.1.2 Circuito Analógico

O sensor de umidade utiliza-se da variação de tensão eficaz (RMS do inglês *root mean square*) em um dos eletrodos para correlaciona-la com a variação de umidade do solo. A determinação dessa variação de tensão RMS entre os eletrodos-sonda quando o solo, atuando como dielétrico, apresenta variação de umidade, é realizada por um circuito analógico de medição.

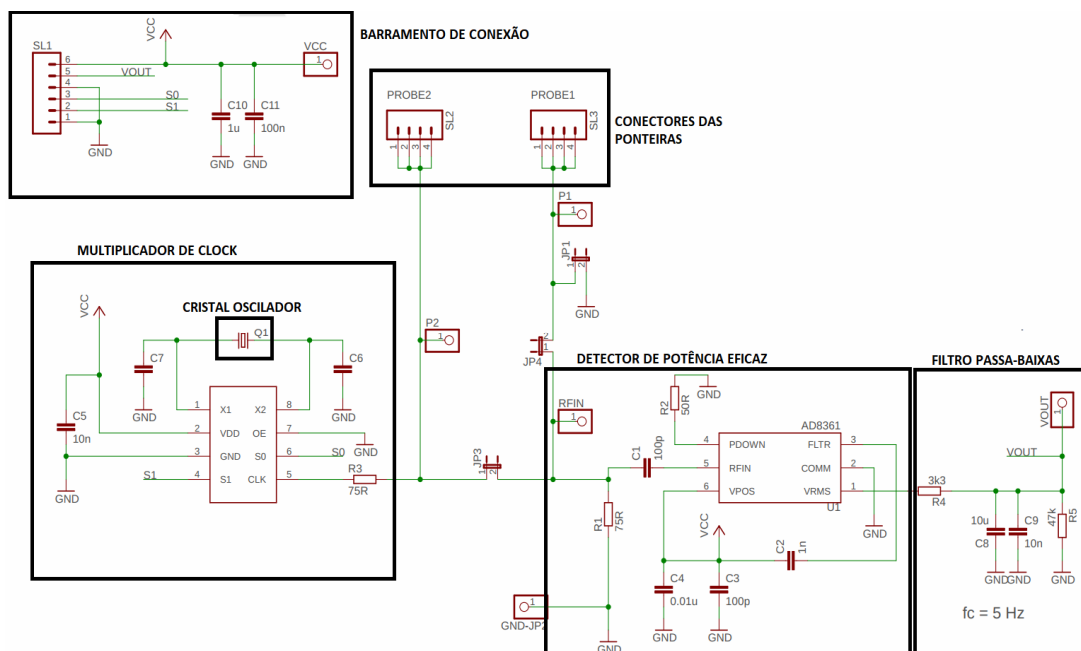
O circuito analógico consiste de um cristal oscilador, um multiplicador de *clock* e um detector de potência eficaz, como mostrado na Figura 15. O cristal oscilador foi utilizado como fonte de *clock* base para o multiplicador de *clock*. A frequência do cristal escolhido é de  $25\text{MHz}$ , uma vez que essa frequência se encaixa nos requisitos mínimos do multiplicador de *clock*, levando em consideração o intervalo de frequências desejadas nas medições.

Tomando por base a Tabela 1, associado ao fato de a frequência máxima de saída do ICS501 ser de  $200\text{MHz}$ , o cristal de  $25\text{MHz}$  permite que sejam geradas as frequências  $75\text{MHz}$ ,  $100\text{MHz}$ ,  $125\text{MHz}$ ,  $133,3\text{MHz}$ ,  $150\text{MHz}$  e  $200\text{MHz}$ . Essas frequências se encontram dentro do intervalo de  $30\text{MHz}$  a  $200\text{MHz}$ , as quais, segundo Eller e Denoth (1996), apresentam melhores resultados por terem menor influência da condutividade e temperatura do solo.

Definidos os intervalos de sinais de entrada, a última etapa do circuito analógico compreende o detector de potência eficaz AD8361, que terá a função de converter o sinal de um dos eletrodos de sonda, em seu valor de tensão eficaz equivalente.

O sinal de entrada do AD8361 estará conectado no eletrodo-sonda que não recebe diretamente o sinal do multiplicador de *clock*. O sinal de saída, por sua vez, será uma tensão CC, variando linearmente conforme o sinal de entrada, a um ganho de  $7,5\text{ V/V}_{RMS}$ . Dessa forma, é possível identificar o valor de tensão eficaz do sinal de um dos eletrodos independente do formato desse sinal.

Os componentes (resistores e capacitores) necessários para o correto funcionamento do AD8361 foram escolhidos de acordo com o modelo de referência apresentado no *datasheet* do componente. Tratam-se de capacitores e resistores responsáveis pelo acoplamento/desacoplamento e casamento de impedâncias. Além disso, na saída do circuito ( $V_{out}$ ) foi adicionado um filtro passivo passa-baixas de primeira ordem, com frequência de corte de  $5\text{Hz}$ , com o objetivo de eliminar possíveis ruídos e sinais de alta frequência que pudessem estar presentes no sinal de saída.



**Figura 15 - Diagrama esquemático do circuito analógico de medição da unidade sensora**  
**Fonte: Autoria Própria**

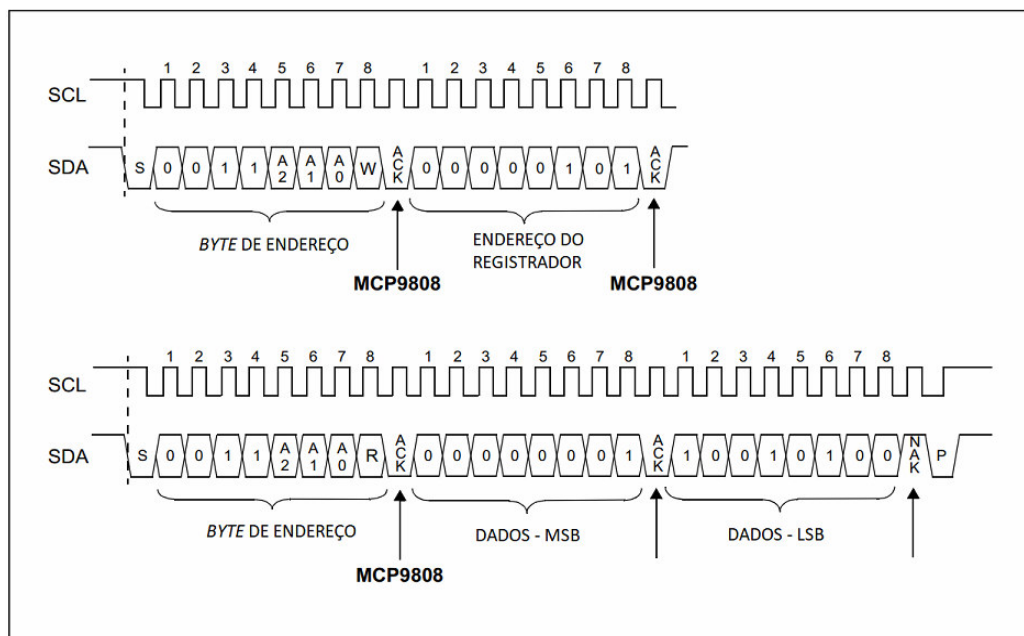
### 3.3.1.3 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura, além de permitir verificar a temperatura do solo, tem o objetivo de, com essa informação, possibilitar ao microcontrolador da unidade sensora compensar possíveis variações no aferimento da umidade do solo ocasionadas por variações de temperatura.

A comunicação com o sensor de temperatura é realizada por meio do protocolo de comunicação serial I2C, 400 kHz, sendo que o mesmo atua como escravo, permitindo o endereçamento de até 8 sensores de temperatura no mesmo barramento.

O processo de leitura e escrita dos registradores do MCP9808 consiste basicamente em o mestre do barramento iniciar a comunicação, endereçando ao sensor de interesse (escravo), enviar o endereço do registrador no qual se deseja efetuar a leitura ou escrita e por fim realizar a transmissão ou leitura dos dados do registrador selecionado.





**Figura 16 - Diagrama temporal de leitura do valor de temperatura do sensor MCP9808**  
**Fonte: Adaptado do datasheet do componente.**

O processo de leitura de temperatura do sensor é apresentado na Figura 16. O microcontrolador da unidade sensora inicia a comunicação com um *bit* de *START*, seguidos dos 7 *bits* referentes ao endereço do sensor de temperatura (4 *bits* mais significativos são ‘0011’ por padrão) e o *bit* que sinaliza a operação (leitura ou escrita). O sensor MCP9808 responde, então, com um *bit* de *acknowledgment*, seguido dos 16 *bits* do registrador de temperatura.

#### 3.3.1.4 Microcontrolador

O microcontrolador da unidade sensora tem a função de executar o tratamento dos dados de ambos os sensores, além de tornar esses dados disponíveis para leitura pela UC. Esse processo é realizado utilizando-se de alguns dos componentes do MSP430G2553, como o conversor analógico-digital (A/D), a interface I2C e a interface UART. A configuração e funcionamento desses componentes é detalhada nas subseções a seguir.

Como a PCI do circuito analógico não incluiu o CI do microcontrolador, o desenvolvimento do projeto foi realizado utilizando-se do *kit* LaunchPad MSP430.

#### 3.3.1.4.1 Conversor Analógico – Digital

Como abordado anteriormente, o circuito analógico de medição da unidade sensora tem como saída um sinal de tensão CC linearmente proporcional a potência eficaz identificada no eletrodo de sonda. Esse sinal de tensão analógico precisa ser convertido em palavras digitais para utilização no microcontrolador, processo esse que é realizado por um conversor A/D.

O conversor A/D presente no MSP430G2553 apresenta resolução de 10 *bits*, taxa de conversão de 200 *kbps* e tensões de referência ajustáveis. O sinal de saída do circuito analógico da unidade sensora foi conectado ao pino referente a um dos canais do A/D, onde esse último foi configurado para operar no modo de conversão contínua simples, com tensão de referência de 3,3V.

Após o sinal de início de conversão, são realizadas 32 amostras sequenciais do canal do conversor A/D, sendo essas amostras salvas em um vetor de dados, sob o qual é efetuado o cálculo da média dos valores. Finalizada a conversão das 32 amostras, o módulo A/D é desativado, aguardando uma nova solicitação de início de conversão por parte da UC.

#### 3.3.1.4.2 I2C

O microcontrolador MSP430G2553 possui um módulo I2C configurável, podendo assumir o papel de mestre ou escravo no barramento de dados. Na unidade sensora o microcontrolador é utilizado como mestre, sendo o responsável por iniciar a comunicação com o sensor de temperatura MCP9808.

Ao receber uma requisição de medição de temperatura da UC, o microcontrolador gera um sinal de *START* no barramento de dados, e realiza o endereçamento e troca de informações com o sensor de temperatura de acordo com o especificado na Figura 16. Após obtidos os 16 *bits* referentes a medição de temperatura, os mesmos são salvos em um vetor e disponibilizados para leitura pela UC.

#### 3.3.1.4.3 UART/ModBus

A comunicação entre o microcontrolador da unidade sensora e a UC é essencial para o funcionamento do sistema, pois é a UC quem realizará a leitura dos dados dos sensores e a requisição de novas medições. O módulo UART do microcontrolador é utilizado para realizar essa troca de informações, onde os dados são transmitidos de forma serial por meio de um canal de comunicação.

A camada física desse canal de comunicação foi definida pelo padrão RS-485, utilizado em diversos sistemas de automação, no qual são definidas especificações como as características elétricas do barramento, número máximo de dispositivos e distância máxima de operação. Esse padrão foi escolhido por já ser consolidado e por usar o princípio de diferença de tensão entre dois canais de comunicação para transmitir os dados, aumentando sua resistência à interferências eletromagnéticas.

Definidas as especificações do meio físico, foi necessário escolher um protocolo para a camada de aplicação. Um dos protocolos mais utilizados devido a facilidade de uso, a licença livre e a confiabilidade é o protocolo ModBus, baseado na arquitetura Mestre/Escravo.

O ModBus se trata de um protocolo no formato requisição/resposta, no qual os serviços são especificados por códigos de função. Ao iniciar uma transação, o mestre deve informar o código da função, o qual indicará ao escravo que tipo de ação deve ser executada (leitura/escrita).

O protocolo ModBus *serial line* dispõe de dois métodos de transmissão, RTU e ASCII, que definem o formato em que as mensagens são codificadas. A diferença entre eles é que em ASCII as mensagens podem ser lidas, por se tratarem de caracteres, enquanto que em RTU as mensagens são codificadas em binário (RTA AUTOMATION, 2018). Nesse trabalho optou-se pela utilização do método RTU por possuir mensagens de tamanho menor, possibilitando maior transferência de dados em um mesmo intervalo de tempo se comparado ao ASCII.

O pacote de mensagem RTU é exibido na Figura 17. O primeiro *byte* da mensagem é referente ao endereço do escravo ao qual ela se destina. Em sequência, outro *byte* indica o código da função a ser executada no escravo. Os próximos *n bytes* referem-se ao campo de dados, que pode ter tamanho variável, dependendo do código da função e dos dados transmitidos. Os dois últimos *bytes* do pacote são reservados para checagem de erros pelo método CRC-16.

Endereço	Função	Dado	CRC Check
8 bits	8 bits	N x 8 bits	16 bits

**Figura 17 - Estrutura do pacote ModBus RTU**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Definido o protocolo da camada de aplicação, o mesmo foi implementado no MSP430G2553 com o auxílio da API FreeModBus, uma implementação gratuita do protocolo para dispositivos escravos, desenvolvida com foco em sistemas embarcados.

A API FreeModBus é implementada como máquina de estados, onde os eventos são acionados pela camada de abstração de *hardware*. Como a camada de abstração de *hardware* é específica de cada dispositivo, foi utilizado um porte da mesma para o microcontrolador MSP430G2553.

Inicialmente, dados como formato de mensagens, endereço do escravo, *baud rate* e paridade são informados para a função de inicialização da pilha de protocolos. Para a utilização nesse trabalho foram configurados o método RTU, o endereço definido manualmente no código da aplicação, o *baud-rate* configurado em 9600 *bps* e não foi utilizado paridade.

Após definidos esses parâmetros, o funcionamento da API consiste em chamar periodicamente uma função responsável por verificar a ocorrência de um evento de transmissão ou recepção. Quando um evento é identificado e o pacote recebido, a *call-back* referente ao código de função desse pacote é executada.

No contexto do trabalho, apenas foram utilizadas as funções de escrita e leitura nos registradores do tipo *holding*. Foram definidos macros de leitura de temperatura e umidade, sendo que, assim que um evento de escrita é identificado no escravo, é realizada uma verificação se os dados do pacote recebido são equivalentes a uma dessas macros. Se for identificada a equivalência, a função relacionada ao respectivo macro é executada, o que nesse caso significa a leitura de dados atualizados do sensor de temperatura ou uma nova sequência de conversões no A/D. Essa espécie de gatilho de conversão, quando a UC escreve o valor de uma macro no registrador *holding* do escravo, é utilizada para que não seja necessário o sensor efetuar as medições constantemente, e sim apenas quando solicitado pela UC.

Os dados referentes aos sensores são sempre armazenados nos mesmos 4 registradores

*holding* do ModBus, sendo que a UC deve solicitar a leitura desses registradores para obter os valores de umidade e temperatura da última medição.

### 3.3.2 Unidade Concentradora

A unidade concentradora foi desenvolvida de forma a centralizar os dados de medição de múltiplos sensores, provendo um barramento padrão RS-485 para conexão desses dispositivos. Como nesse trabalho foram desenvolvidos dois sensores de umidade, esses são conectados à unidade concentradora fisicamente por meio de fios e a comunicação é realizada de forma serial, utilizando o protocolo *ModBus*. A UC poderá ser configurada para realizar a aquisição periódica dos dados dos sensores conectados, mantendo um histórico das últimas medições de cada sensor e enviando esses dados para a unidade de monitoramento caso conectada.

Na implementação do ModBus na UC, que atuará como mestre, não foi possível utilizar a API FreeModBus, devido a mesma estar disponível apenas para dispositivos escravos. Para contornar esse problema, foi utilizada uma adaptação da API ModBus do Arduino, portada para dispositivos da família STM32.

Para que uma nova medição seja efetuada na unidade sensora, a UC deve enviar um pacote de escrita em um registrador *holding* específico, sendo que os dados desse pacote se referem ao código da função a ser executada (leitura de temperatura ou umidade). Já para efetuar a leitura dos dados da última medição dos sensores é necessário ler uma sequência de registradores *holding* específicos.

A UC também estabelecerá conexão com a UM por meio da implementação de um enlace de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia. A transmissão dos dados referentes a seus sensores será efetuada quando solicitado pela UM.

A comunicação sem fio entre a UC e a UM foi implementada utilizando a camada física e de enlace do LoRa, a qual será apresentada em maiores detalhes na Seção 4.5. A UC permanecerá com o rádio em modo de recepção contínua, aguardando por solicitações da UM, transmitindo os dados solicitados, e retornando para o modo de recepção.

Ao receber, por exemplo, um pacote de requisição dos dados dos sensores por parte da UM, a UC se comunicará via ModBus com todos os seus sensores, obterá os dados relativos a cada um deles e os transmitirá, utilizando LoRa, para a UM.

Para facilitar a implementação e sincronização de todos esses processos de comunicação foi adicionado ao projeto um sistema operacional de tempo real preemptivo, o FreeRTOS.

Isso permitiu o uso de semáforos e mutexes na sincronização das tarefas e garantia de acesso exclusivo aos meios de comunicação.

Foram então criadas duas tarefas: a tarefa 1 responsável pela comunicação via ModBus com as unidades sensoras e a tarefa 2 responsável pelo gerenciamento da comunicação LoRa com a UM. A tarefa 1 permanece em constante execução, enquanto a tarefa 2 aguarda a notificação da tarefa 1 para liberar sua execução.

### 3.3.3 Unidade de Monitoramento

A unidade de monitoramento trabalha como uma facilitadora no acesso as informações dos sensores. Como a implementação de comunicação por meio de fios em propriedades rurais é uma tarefa difícil, e praticamente inviável quando consideradas propriedades de grande porte, a implementação de uma comunicação sem fio é ideal quando se deseja realizar o monitoramento de sensores distribuídos nesse meio.

A UM estabelecerá conexão com a UC por meio da utilização de um enlace de comunicação sem fio de longo alcance. Esta primeira unidade será alimentada constantemente com dados provenientes da UC e poderá enviar pacotes de requisição de dados atualizados e pacotes de configuração com intuito de modificar parâmetros da UC. Dessa forma não é necessário o acesso físico para aquisição dos dados ou configuração da unidade concentradora.

A implementação da UM foi realizada utilizando o *kit* STM32F4-DISCOVERY. O módulo de rádio, também utilizado na UC, se trata do *transceiver* LoRa, conectado a uma antena com ganho de 9 *dBi*. Os *tranceivers* LoRa são encarregados de implementar a camada física da rede. O modelo utilizado é o SX1276 da Semtech, escolhido por permitir a operação nas frequências de 868 *MHz* e 915 *MHz*. A potência máxima de transmissão desse módulo de rádio é de 14 *dbM*.

Os parâmetros de comunicação desse rádio podem ser configurados por meio da escrita em registradores específicos, os quais são acessados por meio de comunicação serial SPI onde o microcontrolador atua como mestre e o módulo de rádio como escravo.

Como a topologia de rede do sistema é ponto a ponto, não foi necessário a utilização de um dispositivo *gateway*, que possui *hardware* específico e de custo elevado.

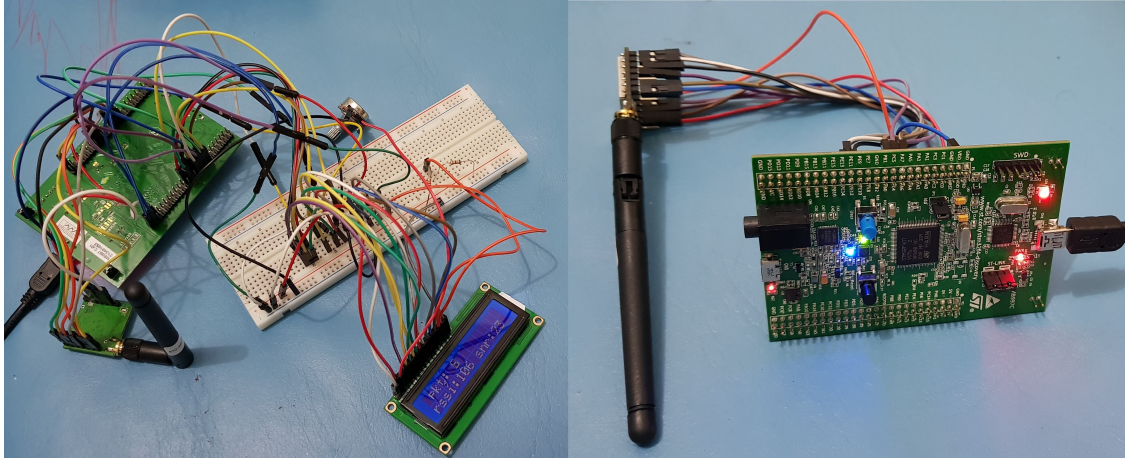
O *driver* do rádio foi derivado da implementação LMIC (LoRaWAN in C), desenvolvido pela IBM, sendo realizado o porte para o microcontrolador utilizado. Esse processo basicamente compreendeu a implementação e configuração do módulo SPI, dos *timers*, portas e pinos de interrupção. Além disso, foi implementado o driver de um *display* LCD 16x2, para que os dados recebidos da UC pudessem ser facilmente visualizados durante os testes.

Assim como na UC, o sistema operacional FreeRTOS foi utilizado, trazendo benefícios como melhor gerenciamento de recursos, diminuição de complexidade do código e pseudo paralelismo. Semáforos de recepção e transmissão foram criados com o objetivo de sincronizar as tarefas de transmissão e recepção, isto é, enquanto uma tarefa espera o término de uma operação do rádio, como receber um novo pacote, outras tarefas continuam a ser executadas. Já os *mutexes* foram utilizados para garantir acesso exclusivo ao rádio, não permitindo que mais de uma tarefa obtenha esse acesso ao mesmo tempo, evitando assim a corrupção de dados.

Os pacotes de dados seguem uma estrutura definida, possuindo até 51 *bytes* de dados e 36 bits de cabeçalho, sendo esse último composto de 2 bytes de endereço de origem, 2 bytes de endereço de destino e 4 bits referentes ao tipo do pacote. Já que o enlace contempla apenas dois dispositivos, o endereçamento dos mesmos foi definido diretamente no código.

Como o *driver* não implementava por padrão pacotes de confirmação de recebimento (ACK), foi criado um novo tipo de pacote sem o campo de *payload* para realizar essa função. Foram então efetuadas modificações no *driver* do rádio para que um pacote de ACK sempre seja transmitido após um pacote recebido.

Definidas as configurações do rádio e efetuadas as modificações no *driver*, foi criado uma tarefa no microcontrolador responsável por solicitar periodicamente os dados dos sensores à UC e exibi-los no *display* LCD. Na próxima seção são demonstrados os resultados dos testes referentes ao alcance da comunicação. A Figura 18 apresenta os microcontroladores da UC e UM e seus respectivos rádios.



**Figura 18 - Unidade de monitoramento (esquerda) e unidade concentradora (direita)**  
**Fonte: Autoria Própria**



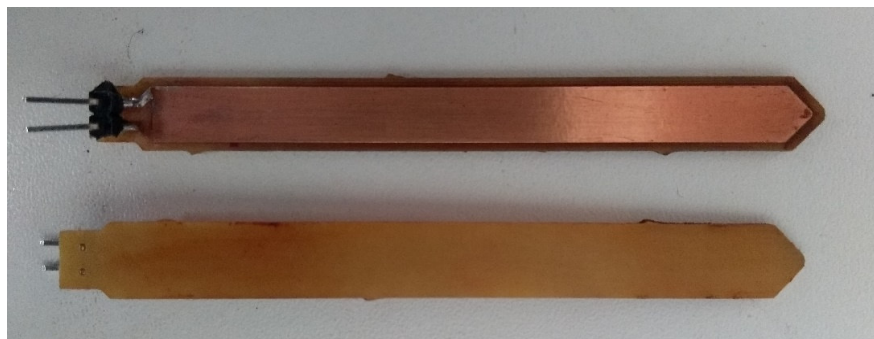
## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os processos de desenvolvimento de *hardware* e *firmware* dos sensores, unidade concentradora e unidade de monitoramento. Além disso serão apresentados os resultados obtidos nos testes em laboratório e testes em campo e suas respectivas avaliações.

### 4.1 ELETRODOS DE SONDA

Os eletrodos de sonda são a parte do sensor de umidade que entra em contato direto com o solo, já que são introduzidos no mesmo durante o processo de medição. Como na matriz-eletrodos-solo os eletrodos formam os terminais do capacitor, seu formato, distância entre os terminais e material utilizado influenciam diretamente na variação de capacitância.

Como cada sensor utiliza-se de dois eletrodos, e o projeto compreende o desenvolvimento de dois sensores, foram produzidas ao todo 4 eletrodos de sonda. Esses eletrodos foram impressos em uma PCI, que foi posteriormente cortada no formato desejado, com o auxílio de uma gravadora de placas de circuito impresso. Por fim foi aplicado nos eletrodos uma camada de esmalte transparente incolor com o objetivo aumentar sua resistência, devido a possibilidade de existirem objetos cortantes no solo, além de prevenir que a área de cobre entre em contato direto com a umidade do solo, causando oxidação. O resultado final dos eletrodos de sonda é mostrado na Figura 19.



**Figura 19 - Eletrodos de sonda confeccionados em PCI**  
**Fonte: Autoria Própria**

## 4.2 UNIDADES SENSORAS

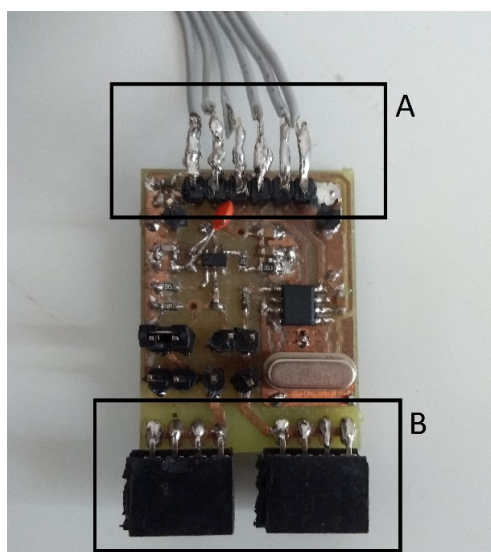
As unidades sensoras são as responsáveis por adquirir, processar e disponibilizar para as UC's informações de umidade e temperatura do solo. A etapa de aquisição dos dados é realizada de forma diferente para a umidade e temperatura. Se tratando da umidade do solo, o processo de aquisição consiste de um circuito analógico de medição, o qual excita os eletrodos-sonda com sinais de diferentes frequências. Já os dados referentes a temperatura do solo são obtidos pelo sensor de temperatura comercial MCP9808.

A etapa de processamento e disponibilização dos dados às UC's é realizada no microcontrolador MSP430G2553, presente em cada unidade sensora.

O desenvolvimento dessas etapas foi realizado de maneira modular, sendo apresentado o projeto e processo de desenvolvimento de cada uma delas nas subseções a seguir.

### 4.2.1 Circuito Analógico

O esquemático do circuito analógico integrando o cristal, multiplicador de *clock* e detector RMS foi desenvolvido no *software Eagle* e, posteriormente, impresso em uma PCI, a qual pode ser visualizada na Figura 20.



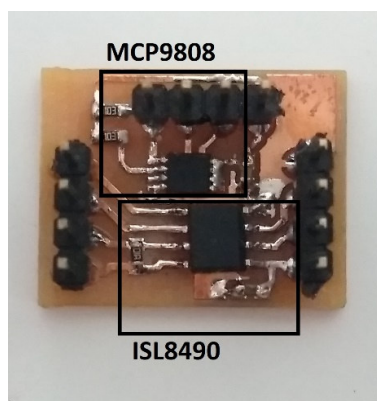
**Figura 20 - PCI do circuito analógico da unidade sensora**  
**Fonte: Autoria Própria**

Os sensores são acoplados na barra de pinos fêmea, como mostrado em “B” na Figura 20, de forma que sua distância possa ser alterada sem grandes dificuldades. A barra de pinos macho (“A” na Figura 20) é conectada ao microcontrolador e contempla os pinos de controle do multiplicador de *clock*, saída do detector de potência eficaz, além dos pinos de alimentação do sistema.

Alguns pinos adicionais foram soldados em pontos específicos da placa de modo a permitir a análise de determinados sinais do sistema (*clock* do multiplicador, tensão de saída, *clock* do oscilador) durante os testes experimentais.

#### 4.2.2 Sensor de Temperatura

Uma PCI foi projetada para o acoplamento do sensor de temperatura, nela foi adicionado o circuito integrado (CI) ISL8490 (RS-485), que é usado para comunicação serial entre o microcontrolador da unidade sensora e a UC. Esse CI foi adicionado com o intuito de evitar a confecção de outra placa, pois a placa do circuito analógico já havia sido confeccionada. A placa de circuito impresso já confeccionada pode ser visualizada na Figura 21.

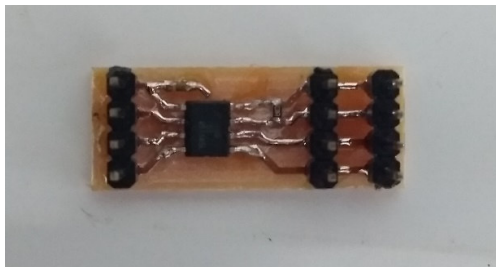


**Figura 21 - PCI contendo sensor de temperatura e CI RS-485**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 4.3 UNIDADE CONCENTRADORA

A unidade concentradora é conectada fisicamente às unidades sensoras por meio de um canal de comunicação RS-485 de 4 fios, como detalhado na seção anterior. Na UC foi

utilizado o *kit* STM32F4-DISCOVERY, que contempla o microcontrolador STM32F407VG. Como o mesmo não possui módulo RS485, foi confeccionada uma PCI com o *transceiver* ISL8490, possibilitando a conexão dos dois sensores produzidos nesse trabalho. Essa PCI pode ser visualizada na Figura 22.



**Figura 22 - PCI contendo sensor de temperatura e CI RS-485**  
**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA UNIDADE DE MONITORAMENTO

Para verificar o desempenho da camada física do LoRa se tratando de alcance de comunicação, foram realizados testes de campo utilizando dados aleatórios, simulando os dados que seriam enviados pela UC, em regiões urbanas e rurais.

Os rádios LoRA possuem 4 parâmetros de configuração que determinam o consumo de energia, o alcance da comunicação e a resistência do sinal ao ruído:

- *carrier frequency* (CF): frequência do sinal base o qual será modulado para transmissão dos dados. O modelo utilizado no projeto (SX1276) permite o ajuste de frequência no intervalo de 137 MHz a 1020 MHz;

- *bandwidth*: pode assumir os valores de 125, 250 ou 500 kHz e é diretamente proporcional ao número de informações transmitidas em uma unidade de tempo;

- *spreading factor* (SF): têm influência no alcance da comunicação e no *on-air time* do pacote. Diferentes SFs são ortogonais, permitindo transmissões simultâneas no mesmo canal de frequência utilizando diferentes SFs;

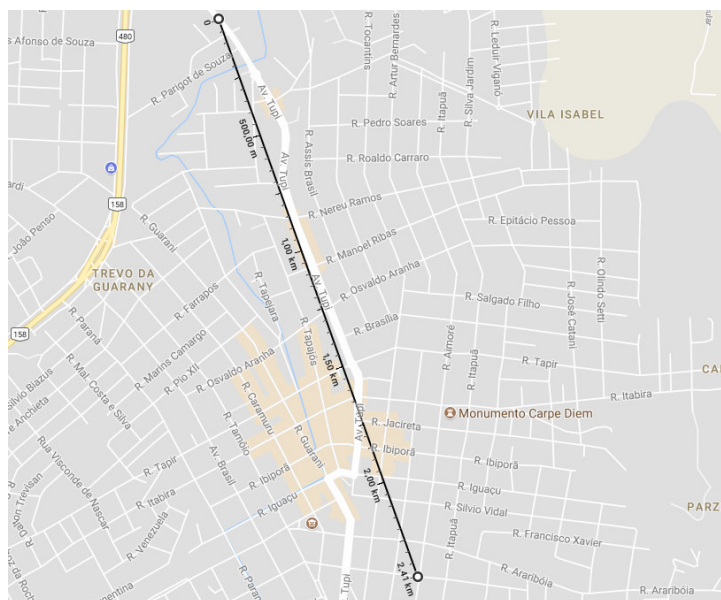
- *coding rate* (CR): taxa de correção de erros, utilizado para proteção contra interferência. Quanto maior o CR, maior a proteção, porém isso também aumenta o *on-air time* do pacote.

Para a realização dos testes o rádio foi configurado para frequência de 915 MHz, SF 7, BW 125 kHz, CR 4/5, potência de saída máxima de 14 dBm e *payload* de 1 byte. O SF7 garante uma taxa de transferência maior, menor consumo de energia, e menor chance de

interferência, já que o *on air time* do pacote é menor. Em troca disso, o alcance é reduzido se comparado a uma transmissão com SF12.

Os testes em região urbana foram realizados no centro da cidade de Pato Branco, com o rádio responsável pela transmissão se mantendo fixo em um ponto elevado da cidade e o rádio receptor sendo afastado de modo a aumentar a distância entre eles. O recebimento dos pacotes era verificado por meio de LEDs e pelas informações do pacote exibidas no *display* LCD do rádio receptor.

Na Figura 23 é possível verificar a máxima distância alcançada (2,41 km), em que a perda de pacotes foi menor que 10%.



**Figura 23 - Mapa com a máxima distância de comunicação alcançada no centro da cidade de Pato Branco.**

**Fonte: Autoria Própria**

Utilizando a mesma abordagem, os testes em região rural foram realizados no interior da cidade de Coronel Vivida. O rádio transmissor foi fixado em um ponto elevado de uma propriedade rural, e o rádio receptor sendo afastado até o ponto onde a perda de pacotes fosse maior que 10%. Na Figura 24 é possível visualizar o mapa com a máxima distância alcançada (5,39 km).



**Figura 24 - Mapa com a máxima distância de comunicação alcançada no interior de Coronel Vivida**

**Fonte: Autoria Própria**

Esses resultados se mostraram bastante satisfatórios visto que mesmo em regiões urbanas, sem visada direta, e sujeito a grande interferência de outros sinais, o alcance máximo atingido foi relativamente grande se comparado a outras tecnologias de mesmo fim. Os resultados dos testes em região rural, que se enquadram melhor em um possível cenário de aplicação prática desse trabalho, apesar de não alcançarem os 15 km anunciados pela tecnologia, apresentaram um bom alcance. Se considerássemos uma rede de UC's, e a possibilidade da realização de saltos entre os nós, a região de cobertura pode ser ainda maior, sendo a utilização dessa tecnologia bastante viável para o monitoramento de umidade e temperatura do solo de propriedades rurais.

#### 4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De forma a validar a relação entre capacitância e umidade do solo e o correto funcionamento da unidade sensora, foi realizada uma sequência de testes experimentais utilizando equipamentos dos laboratórios de química e elétrica da UTFPR.

A realização dos testes compreendeu a utilização de uma balança, com precisão de

0,001 g, para realizar a pesagem das amostras de solo, de um osciloscópio digital para medições de valores de tensão no circuito analógico da unidade sensora e de um micro-ondas para secagem das amostras.

Foram colhidas ao todo 10 amostras de solo em um mesmo local e armazenadas em copos plásticos de 500 ml, sendo que durante a coleta do material foi tentado remover o máximo de detritos possível como pedras, pedaços de vidros e raízes.

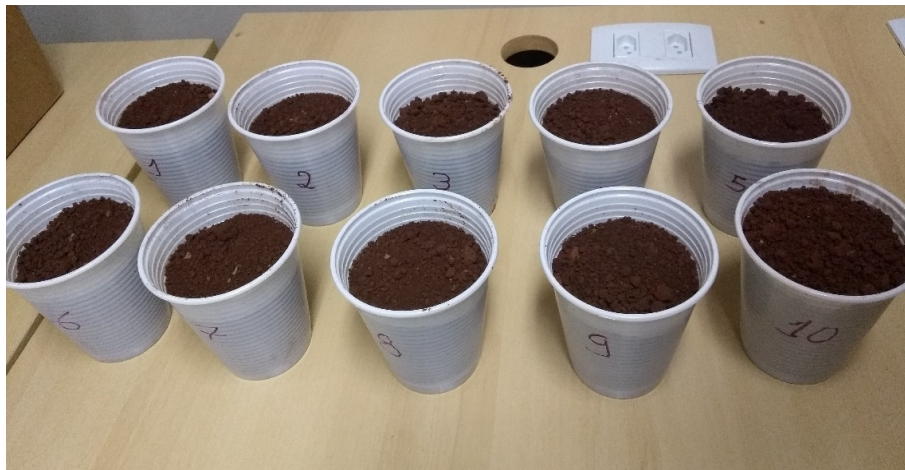
Essas amostras encontravam-se bastante úmidas, devido às chuvas que ocorreram nos dias anteriores à coleta, e foi necessário realizar um processo de secagem. Por padrão, a aplicação do método gravimétrico para medição de umidade do solo é realizada em uma estufa, submetendo as amostras à temperatura de 105 °C por um período de 24 a 48 horas. Devido à não disponibilidade da estufa do laboratório de solos da universidade no período em que foram realizados os testes, foi necessário buscar uma solução alternativa para realizar a secagem das amostras.

De acordo com o estudo realizado por Oliveira et al. (2016), o uso de micro-ondas é um método rápido, de fácil uso e eficiente na determinação de umidade do solo. No estudo é demonstrado que em amostras de 100g de solo, um total de 7 minutos no micro-ondas equivale a mesma umidade do solo que seria obtida em uma estufa. Dessa forma, a utilização do micro-ondas é uma alternativa confiável, e muito mais rápida se comparada com o método padrão da estufa.

Levando isso em consideração, as 10 amostras foram submetidas a um tempo total de 14 minutos, divididos em duas sessões de 7 minutos cada, em um micro-ondas configurado para potência máxima.

Após serem secas, foi realizada a identificação de cada amostra com um número, e efetuada a pesagem de cada uma delas de forma a uniformizar seu peso, reduzindo excessos ou adicionando mais terra quando necessário. Os copos plásticos tiveram o fundo perfurado para que o excesso de água pudesse escoar se o solo saturasse. As amostras podem ser visualizadas na Figura 25.





**Figura 25 - Amostras de solo utilizadas nos testes experimentais**  
**Fonte: Autoria Própria**

Em sequência foram adicionados sucessivamente, iniciando da amostra número 1, uma variação de 20 ml de água em cada uma das amostras, medidos com o auxílio de uma proveta. Para que a água fosse distribuída uniformemente na superfície do solo foi utilizado um borrifador.

Após finalizado o processo de umidificação do solo, foi aguardado um período de 3 horas para garantir sua estabilização. Como nesse meio tempo ocorre o processo natural de evapotranspiração, o horário final da umidificação de cada amostra foi anotado, garantindo que todas tivessem o mesmo tempo de estabilização de 3 horas antes de ser realizada a próxima etapa dos testes.

Quando consideradas estabilizadas, cada uma das amostras foi submetida a uma nova pesagem, para que sua umidade fosse calculada utilizando o método gravimétrico. Logo após a pesagem de uma amostra, os eletrodos de sonda da unidade sensora eram inseridos no solo (Figura 26) e o valor de tensão de saída do sistema, convertido em palavras digitais pelo A/D do microcontrolador, eram anotados.





**Figura 26 - Eletrodos de sonda inseridos no solo de uma amostra durante o teste de medição**  
**Fonte: Autoria Própria**

O processo de medição foi realizado em 6 frequências diferentes, alterando os valores de S0 e S1 do multiplicador de *clock*, e os resultados são apresentados na Tabela 2.

Analisando a Tabela 2 é possível observar que, a partir da amostra 7, os valores de umidade pararam de aumentar de forma regular. Isso aconteceu porque essas amostras tiveram o solo saturado, isto é, o solo chegou ao seu limite de retenção de água, sendo a água em excesso escoada pelos furos do recipiente. Além disso, foi verificado que essas amostras possuíam um número maior de pedras e outros resíduos que podem influenciar no processo de medição, alterando as propriedades elétricas da matriz eletrodo-solo ou até mesmo alterando a distância entre os eletrodos quando os mesmos são inseridos no solo.

Examinando os dados referentes a tensão verifica na unidade sensora para cada uma das amostras, é possível validar a influência da umidade do solo em sua capacitância equivalente, visto que a tensão de saída do sistema apresenta uma variação positiva quando o percentual de umidade é aumentado.

**Tabela 2 - Resultados obtidos no teste do sensor de temperatura**

Amostra	Massa do solo seco (g)	Massa do solo úmido (g)	Umidade (%)	Frequência de Medição (MHz)					
				75	100	125	133,3	150	200
				Tensão(V)					
1	407,874	425,13	4,23	1,0538	1,3729	1,5340	1,5469	1,6629	1,9336
2	408,223	444,233	8,82	1,1666	1,5694	1,8853	1,9304	2,0818	2,2978
3	407,988	463,255	13,55	1,2375	1,7757	2,1495	2,2140	2,3203	2,4105
4	407,954	481,051	17,92	1,4438	1,9755	2,3783	2,4267	2,4911	2,4299
5	407,692	502,242	23,19	1,7080	2,3558	2,6039	2,6265	2,6200	2,3396
6	408,277	519,131	27,15	1,7338	2,3751	2,6232	2,6426	2,6329	2,3525
7	408,37	535,62	31,16	1,9497	2,5008	2,6845	2,6941	2,6813	2,3171
8	408,208	524,61	28,52	1,9336	2,5104	2,6877	2,6909	2,6329	2,2978
9	408,198	501,677	22,90	2,1656	2,4976	2,6619	2,6909	2,6941	2,2559
10	408,168	591,572	44,93	1,6983	2,1366	2,4202	2,4589	2,4653	2,2526

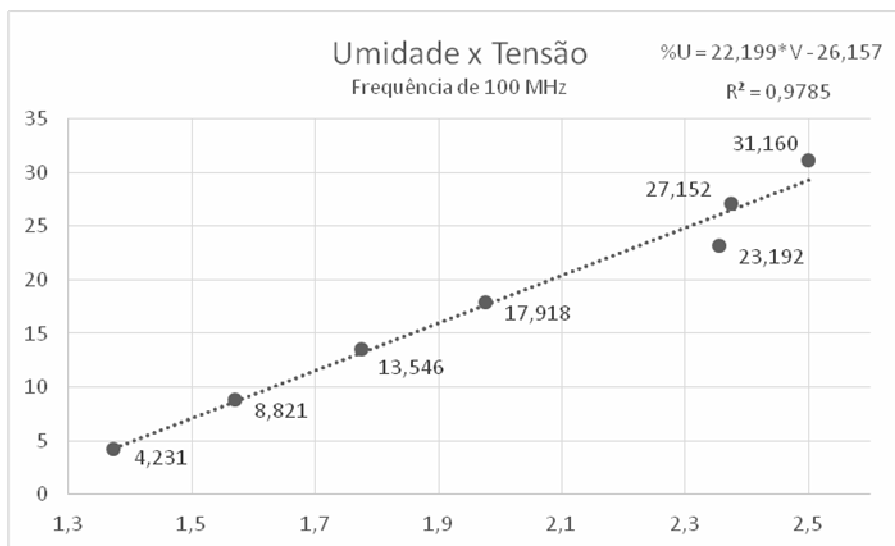
Em relação às frequências de medição, foi observado que as que apresentam melhor resposta à quantidade de água no solo foram as de 100 MHz, 125 MHz e 133,3 MHz. A comparação entre as frequências de medição considerando a variação de tensão entre as amostras 1 e 7 é apresentada na tabela 3.

**Tabela 3 - Variação de tensão entre as amostras 1 e 7, em diferentes frequências de medição**

Frequência(MHz)	Variação de tensão (V)
75	0,8959
100	1,1279
125	1,1505
133,3	1,1473
150	1,0184
200	0,3835

Levando em consideração os dados da Tabela 3, a frequência que apresentou melhor resposta às variações de umidade foi a de 125 MHz, porém, durante os cálculos do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) verificou-se que a frequência de 100MHz apresentou melhor resultado.

Sendo assim, o gráfico da Figura 27 apresenta uma correlação dos resultados de umidade do solo, obtidos por meio da pesagem das amostras, com os respectivos valores de tensão de saída obtidos nas medições com frequência de 100MHz.



**Figura 27 - Correlação entre a umidade do solo e a tensão de saída do sensor de umidade**  
**Fonte: Autoria Própria**

A partir da regressão linear apresentada na Figura 27, foi possível obter a equação que correlaciona a umidade do solo (%U) com a tensão de saída do sensor (V):

$$\%U = 22,199 * V - 26,157 . \quad (10)$$

O coeficiente de correlação dos dados foi de 0,9785, o que deixa claro a influência que a umidade do solo tem sobre sua capacitância equivalente. Esse coeficiente poderia ser ainda maior visto que, até a amostra 5, os valores de tensão cresciam praticamente de forma linear, podendo indicar alguma peculiaridade no solo dessa amostra. Na Tabela 4 é exibido um comparativo entre a umidade do solo calculada pelo método gravimétrico com a calculada utilizando a Equação 10 para as 7 primeiras amostras.

Como pode se observar pela Tabela 4, o erro máximo do sensor nas 7 primeiras amostras foi de aproximadamente 3%. Se as amostras 5 e 7 fossem desconsideradas, esse erro reduziria quase que à metade, sendo de aproximadamente 0,6%, o que significa uma boa precisão para esse tipo de medida.

**Tabela 4 - Comparação entre umidade calculada pelo método gravimétrico e pela equação de correlação**

<b>Amostra</b>	<b>Tensão micro</b>	<b>Umidade(%)</b>	<b>Umidade calculada</b>	<b>Erro (%)</b>
1	1,3729	4,231	4,318932	-0,088
2	1,5694	8,821	8,682856	0,138
3	1,7757	13,546	13,2614	0,285
4	1,9755	17,918	17,69686	0,221
5	2,3558	23,192	26,13855	-2,947
6	2,3751	27,152	26,56779	0,584
7	2,5008	31,160	29,35784	1,803

A Equação 10 foi então implementada no microcontrolador da unidade de monitoramento, para que seja efetuado o cálculo da umidade equivalente com os dados de tensão recebidos da unidade concentradora.

Os testes referentes a influência da temperatura nas medições de umidade não foram realizados pela dificuldade em simular um ambiente desse tipo e a falta de equipamentos (estufa) para a realização do processo. Dessa forma, o sensor de temperatura atua no sistema apenas como mais um dado informativo do solo.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e integração de um sistema de medição de umidade do solo. Esse sistema compreendeu desde a fase de aquisição dos dados, por meio do desenvolvimento de um sensor de umidade do solo, até a fase de tratamento, distribuição e monitoramento desses dados por meio da implementação de unidades concentradora e de monitoramento.

A conclusão do levantamento de pesquisas e estudos na elaboração do referencial teórico é a de que, apesar da existência de várias técnicas de medição de umidade do solo, nenhuma delas é perfeita, sendo possível identificar grandes disparidades entre seus resultados apenas se considerados cenários muito específicos. Esse fato contribui para que não exista ainda um método padronizado para esse tipo de medição, sendo necessária a ponderação das características desejáveis na aplicação na hora de defini-lo.

Levando isso em consideração, esse trabalho propôs a aplicação específica do método capacitivo. Capacitores já são utilizados como sensores em diversas áreas como controle, detecção de nível, detecção de objetos, etc. e sua aplicação na determinação de umidade do solo já vem sendo estudada e desenvolvida há algum tempo, tendo se mostrado satisfatória como evidenciado nos estudos referenciados por esse trabalho.

Os resultados experimentais obtidos durante os testes do sensor de umidade evidenciaram a relação entre a capacitância do solo e sua umidade. Dessa forma, a partir da análise dos resultados foi possível encontrar uma equação que correlaciona o valor de tensão de saída da unidade sensora com seu valor percentual de umidade equivalente. Sendo assim, foi comprovado que é possível avaliar de umidade do solo aplicando-se sinais de alta frequência em eletrodos de sonda inseridos no solo, onde os resultados apresentaram erro menor que 3% e  $R^2$  de 0,9785.

O enlace de comunicação LoRa entre a unidade concentradora e a unidade de monitoramento conseguiu alcançar a distância de 5,39 *km* nos testes realizados em região rural e 2,41 *km* em região urbana. Visto que a aplicação do projeto é focada em áreas rurais, onde pode ser necessário cobrir áreas extensas, um maior alcance pode significar a necessidade de menos dispositivos e conseqüentemente menor custo.

As dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto foram a integração de diferentes tipos de comunicação, com diferentes tecnologias e protocolos, de forma possibilitar a troca de informações no sistema como um todo. Além disso, a falta de

equipamentos e um laboratório especializado em solos dificultou a aquisição dos resultados experimentais, que poderiam ter uma análise mais profunda caso esse tipo de recurso estivesse disponível.

As disciplinas do curso que demonstraram maior relevância no desenvolvimento do projeto foram sistemas embarcados, sistemas microcontrolados e instrumentação eletroeletrônica.

Como trabalhos futuros, sugerem-se a realização de testes com o sensor em diferentes tipos de solo, a integração do microcontrolador na mesma placa que circuito analógico, a inclusão do sensor de temperatura na compensação dos dados referentes ao sensor de umidade e a implementação de uma rede de sensores sem fio que permita o monitoramento de várias unidades concentradoras e, conseqüentemente, o monitoramento de uma região muito maior.

## REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, Viacheslav I., et al. On-the-Go soil sensors for precision agriculture. In: Computers and Electronics in Agriculture 44, p. 71-91, mar. 2004.
- ALBERTA FARM MACHINERY RESEARCH CENTRE. Soil moisture meters. 2016. Disponível em: < [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/eng8291](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/eng8291) >. Acesso em: 01 jun. 2017.
- ANALOG DEVICES. LF to 2.5 GHz TruPwr Detector AD8361. Disponível em:< <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/rf-power-detectors/rms-responding-power-detectors/ad8361.html> >. Acesso em: 20 jun. 2018.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. Instrumentação e fundamentos de medidas. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010.
- BAXTER, Larry K. Capacitive sensors. Ann Arbor, v. 1001, p. 48109, 2000.
- BERLIN, Howard M.; GETZ, Frank C. Principles of electronic instrumentation and measurement. Prentice Hall, 1988.
- BERNARDI, Alberto C. C., et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. 596p.Embrapa: Brasília, 2014.
- EHLERS, Clarence J.; REESE, Lymon C.; ANAGNOS, James N. The Nuclear Method of Soil-moisture Determination at Depth. Center for Highway Research, University of Texas, Austin, jun. 1969.
- DAMACENO, João Marcos Ferreira. Sistema para avaliação da umidade relativa do solo utilizando a análise de impedância e técnicas de ultrassom. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. Journal of Hydrology, v. 93, n. 1-2, p. 67-78, 1987.
- DOBRIYAL, Pariva et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. Journal of Hydrology, p. 110-117, ago. 2012.
- ELLER, H.; DENOTH, A. A capacitive soil moisture sensor. Journal of Hydrology, v. 185, n. 1-4, p. 137-146, 1996.
- GODSE, A. P.; MULANI, A. O. Embedded Systems. Technical Publications, 2009.

- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. Física. Vol. 3 . Grupo Gen-LTC, 2000.
- HUISMAN, J. A. et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar. *Vadose zone journal*, v. 2, n. 4, p. 476-491, 2003.
- JOHNSON, A. I. Methods of measuring soil moisture in the field. Geological survey water-supply paper 1619, 25 p., 1962.
- JONES, Scott B.; WRAITH, Jon M.; OR, Dani. Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological processes*, v. 16, n. 1, p. 141-153, 2002.
- JONES, Scott B. et al. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors. *Vadose Zone Journal*, v. 4, n. 4, p. 1048-1058, 2005.
- KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, v. 352, n. 3, p. 367-378, 2008.
- LEDIEU, J. et al. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, v. 88, n. 3-4, p. 319-328, 1986.
- LEIB, Brian G.; JABRO, Jay D.; MATTHEWS, Gary R. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Science*, v. 168, n. 6, p. 396-408, 2003.
- LI, Qing; YAO, Caroline. Real-time concepts for embedded systems. CRC Press, 2003.
- LUNT, I. A.; HUBBARD, S. S.; RUBIN, Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, v. 307, n. 1, p. 254-269, 2005.
- MARWEDEL, Peter. Embedded system design: Embedded systems foundations of cyber-physical systems. Springer Science & Business Media, 2010.
- MASOUND, Rezaei; EMAD, Emad; SASAN, Naseh; MEHDI, Mmehdi. A New 1.4-GHz Soil Moisture Sensor. *Journal of the International Measurement Confederation*, p. 1723-1728, ago. 2012.
- MAT, Ibrahim; KASSIN, Mohamed R. M.; HARUN, Ahmad N. Precision Agriculture Applications using Wireless Moisture Sensor Network. In: 2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications, Kuching, p. 18-23, nov. 2015.
- MICROCHIP. MCP9808 Maximum Accuracy Digital Temperature Sensor. Disponível em: <<https://www.microchip.com/wwwproducts/MCP9808>>. Acesso em: 20 jun. 2018.
- MUÑOZ-CARPENA, Rafael. Field Devices for Monitoring Soil Water Content. EDIS Publication BUL343, p. 1-15, jan. 2015.



NORTHROP, Robert B. Introduction to instrumentation and measurements. CRC Press, 2005.

NUNES, José Luis da Silva. Agrolink, 12 set. 2016. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao\\_361504.html](https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

ODARA, Stephen; KHAN, Zain; Ustun, Taha Selim. Integration of Precision Agriculture and SmartGrid technologies for Sustainable Development. In: IEEE International Conference of Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development, Chennai, India, p. 84-89, jul. 2015.

OKUNO, Marcos. Afinal, o que é agricultura de precisão? InteliAgro, 2 jan. 2015. Disponível em: < <http://inteliagro.com.br/afinal-o-que-e-agricultura-de-precisao> >. Acesso em: 30 mai. 2017.

OLIVEIRA, L. F. C.; ROQUE; C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado. Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS, v. 3, n. 4, p. 60-64, out./dez. 2016

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal, v. 61, n. 6, p. 1576-1585, 1997.

RESESAS. 5V, Low Power, High Speed or Slew Rate Limited, RS-485/RS-422 Transceivers. Disponível em: <https://www.intersil.com/en/products/interface/serial-interface/rs-485-rs-422/ISL8490.html> >. Acesso em: 20 jun. 2018.

ROBOCK, Alan et al. The global soil moisture data bank. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 81, n. 6, p. 1281-1299, 2000.

RTA AUTOMATION. Modbus RTU. Disponível em: <<https://www.rtaautomation.com/Technologies/modbus-rtu/> >. Acesso em: 20 jun. 2018.

SCHMUGGE, T. J.; JACKSON, T. J.; MCKIM, H. L. Survey of methods for soil moisture determination. NASA Technical Memorandum 80658, Estados Unidos, nov. 1979.

SEMTECH. SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/SX1276>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature. Soil Science Society of America Journal, v. 65, n. 1, p. 28-34, 2001.

SHOCK, Clinton C.; BARNUM, J. Michael; SEDDIGH, Majid. Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. 1998.

STMICROELECTRONICS. Discovery kit with STM32F407VG MCU. Disponível em: <<https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP-EXP430G2 LaunchPad Evaluation Kit User's Guide. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/msp-exp430g2>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

TOTH, Ferencz Nandor. A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors. 1997.

WALBERT, Allan. Agricultura é quem mais gasta água no Brasil e no mundo. Disponível em <<http://www.ebc.com.br/noticias/internacional/2013/03/agricultura-e-quem-mais-gasta-agua-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

YOU, Kok Yeow et al. Precise Moisture Monitoring for Various Soil Types Using Handheld Microwave-Sensor Meter. In: IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 7, p. 2563-2570, jul. 2013.

ZAZUETA, Fedro S.; XIN Jiannong. Soil Moisture Sensors. Florida; v. 292, abr. 1994.

ZHEN, Xing et al. Research and Design of Soil Water Content Sensor Based on High-frequency Capacitive. Sensors & Transducers, v. 26, p. 56, 2014.