

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

ISABELLE CORDOVA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DIGITAL DE UMIDADE DO
SOLO E UNIDADE REMOTA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO
COMUNICAÇÃO SEM FIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

ISABELLE CORDOVA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DIGITAL DE UMIDADE DO
SOLO E UNIDADE REMOTA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO
COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia de Computação do Departamento de Informática – DAINF – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti
Co-orientadores: Prof. Dr. Ricardo Hernandez Hernandez e Prof. Me. Fábio Brignol de Moraes.

PATO BRANCO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

Às 13 horas e 30 minutos do dia 04 de julho de 2016, na sala V109, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Fábio Luiz Bertotti (orientador), Ricardo Hernandez Hernandez (coorientador), Fernando José Avancini Schenatto e Vinicius Pegorini para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Desenvolvimento de um sensor digital de umidade do solo e unidade de monitoramento utilizando comunicação sem fio**, da aluna **Isabelle Cordova Gomes**, matrícula 1065092, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação a candidata foi arguida pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

Fábio Luiz Bertotti
Orientador (UTFPR)

Ricardo Hernandez Hernandez
Coorientador (UTFPR)

Fernando José Avancini Schenatto
(UTFPR)

Vinicius Pegorini
(UTFPR)

Beatriz Terezinha Borsoi
Coordenador de TCC

Pablo Gauterio Cavalcanti
Coordenador do Curso de
Engenharia de Computação

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio e incentivo durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Agradeço ao professor orientador Fábio Luiz Bertotti que com sabedoria soube dirigir-me os passos e auxiliar-me para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor co-orientador Ricardo Hernandez Hernandez que com paciência transmitiu seus conhecimentos na área de irrigação e drenagem dos solos.

A professora Beatriz Borsoi, pelo convívio, pelo apoio e compreensão durante todo o curso.

Aos professores que integram a banca de defesa pela disponibilidade e acréscimo ao trabalho.

Aos colegas de laboratório pelas dicas no dia-a-dia e principalmente ao Julio Cesar Leme, que não mediu esforços em ajudar.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

GOMES, Isabelle Cordova. Desenvolvimento de um sensor digital de umidade do solo e unidade remota de monitoramento utilizando comunicação sem fio. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

As soluções de engenharia são cada vez mais empregadas na agricultura, principalmente, na automação de processos e na melhoria das técnicas existentes. Neste sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor digital de umidade do solo com monitoramento remoto. Esse sensor é constituído por uma sonda composta por placa de circuito impresso que emitirá ondas eletromagnéticas de alta frequência para obter respostas a partir da condutividade elétrica e da capacitância medida no solo. Essas respostas são enviadas via módulo de rádio frequência até uma distância de 100 metros para uma unidade de controle e monitoramento. Com os resultados obtidos pelos sensores é possível identificar o momento de irrigação, possibilitando diferentes tratamentos ao longo da mesma área de produção. Os resultados mostraram que a tensão de saída do sensor possui uma correlação com o teor de umidade do solo, apresentando um coeficiente de 0,988. A coerência e estabilidade do sensor de umidade do solo atendeu às necessidades de acompanhamento da umidade a distância. Espera-se que o monitoramento constante das propriedades do solo proporcione um controle mais efetivo na utilização da água, visando reduzir o seu consumo, mas sem prejudicar o crescimento das plantas.

Palavras-chave: Umidade do solo. Sensor capacitivo. Monitoramento remoto. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

GOMES, Isabelle Cordova. Development of a digital soil moisture sensor and a wireless communication monitoring unit. 2016. 57 p. Monograph of Completion of Course Work – Computer Engineering, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2016.

Engineering solutions are increasingly employed in agriculture, especially in process automation and improvement of existing techniques. Thus, this work presents the development of a digital sensor soil moisture with remote monitoring. This sensor comprises a probe composed of printed circuit board that emit electromagnetic waves of high frequency to obtain responses from the electrical conductivity and capacitance to ground. These responses are sent via radio module up to a distance of 100 meters to a drive control and monitoring. With the results obtained by the sensors can identify the time of irrigation, allowing different treatments over the same production area. The results showed that the sensor output voltage has a correlation with the soil moisture content, presenting a coefficient of 0.988. The consistency and stability of soil moisture sensor has met the monitoring requirements of the moisture away. It is expected that the constant monitoring of soil properties provide a more effective control on the use of water, to reduce their consumption, but without harming the growth of plants.

Keywords: Soil moisture. Capacitive Sensor. Remote Monitoring. Precision Agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Blocos do Sistema para Medição de Umidade do Solo.....	22
Figura 2 - MSP - EXP430G2 - LaunchPad	23
Figura 3 – Módulo de RF XBee (Série 1).....	24
Figura 4 - Esquemático Interno do circuito integrado AD8307.....	26
Figura 5 - Real Time Clock DS1307	27
Figura 6 - Projeto da Sonda A	28
Figura 7 - Projeto da Sonda B	28
Figura 8 - Converso USB/ Serial - CP2102.....	29
Figura 9 - Diagrama do sistema de medição proposto	30
Figura 10 - Diagrama de Blocos do Sensor.....	31
Figura 11 – Sondas tipo A e B desenvolvidas para aquisição da umidade do solo	34
Figura 12 - Sensor em PCI.....	35
Figura 13 - Avaliação da resposta do cristal oscilador.....	36
Figura 14 - Sistema de filtragem do solo	37
Figura 15 - Variação da massa no processo de perda da umidade.....	40
Figura 16 - Variação da tensão no processo de perda da umidade.....	40
Figura 17 - Variação da tensão e da massa no processo de ganho de umidade.....	41
Figura 18 - Correlação da Tensão e Umidade obtida no teste de pesagem do solo.....	42
Figura 19 - Correlação da umidade medida com o método gravimétrico com a umidade calculada.	43
Figura 20- Comparação entre umidade gravimétrica e umidade calculada do Solo A....	45
Figura 21- Comparação entre umidade gravimétrica e umidade calculada do Solo B....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo dos métodos de medição de umidade do solo.....	20
Quadro 2 - Materiais Utilizados e suas especificações.....	22
Quadro 3 - Pesagem do material utilizado nos testes.....	38
Quadro 4 - Resultados Obtidos no Teste 1.....	39
Quadro 5 - Resultados obtidos através do método gravimétrico	42
Quadro 6 - Comparativo do percentual de umidade do solo entre o método gravimétrico e a umidade calcula pelo sistema	43
Quadro 7 – Resultados obtidos no teste em campo com o Solo A	44
Quadro 8 - Resultados obtidos no teste em campo com o Solo B.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
CCS	<i>Code Composer Studio</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DSD	<i>Data Set Ready</i>
DTR	<i>Data Terminal Ready</i>
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
FDR	<i>Frequency-Domain Reflectometry</i>
GND	<i>Ground</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LAPA	Laboratório Automação e Controle de Processos Agroindustriais
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RXD	<i>Read Data</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface (SP)</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
TDR	<i>Time-Domain Reflectometry</i>
TXD	<i>Write Data</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	<i>Tensão em Corrente Contínua</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 UMIDADE DO SOLO.....	16
2.2 MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO.....	16
2.2.1 Método Gravimétrico.....	17
2.2.2 Método utilizando Sonda de Nêutrons.....	17
2.2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo.....	18
2.2.4 Reflectometria no Domínio da Frequência.....	18
2.2.5 Método Capacitivo.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 MATERIAIS.....	22
3.1.1 Cristal Oscilador.....	22
3.1.2 Microcontrolador.....	23
3.1.3 Módulos de Comunicação por Rádio Frequência.....	24
3.1.4 Amplificador Logarítmico.....	25
3.1.5 Relógio de Tempo Real.....	26
3.1.6 Placa de Circuito Impresso.....	27
3.1.7 Conversor UBS para UART.....	28
3.1.8 Ferramenta de Desenvolvimento.....	29
3.2 METODOLOGIA.....	30
3.2.1 Unidade Sensora.....	30
3.2.2 Unidade de Monitoramento.....	32
3.2.3 Comunicação sem Fio.....	32
4 RESULTADOS	34
4.1 SONDA.....	34

4.2 AVALIAÇÃO DO CRISTAL OSCILADOR	35
4.3 SISTEMA DE DRENAGEM.....	36
4.4 TESTES EM LABORATÓRIO	37
4.4.1 Variação da tensão com relação a umidade do solo	38
4.4.2 Teste Comparativo com o Método Gravimétrico.....	41
4.4.3 Teste em Campo	44
5 CONCLUSÕES.....	47
REFERENCIAS.....	49
APÊNDICES.....	53

1 INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gerenciamento agrícola que está em amplo crescimento no País e trata-se de um sistema de manejo integrado de informações e tecnologias. As tecnologias da AP monitoram e orientam o produtor para melhorar a produtividade, a renda e a preservação do meio ambiente.

Um sensor de umidade do solo está diretamente relacionado com Agricultura de Precisão. Ao conhecer a quantidade de água disponível no solo o produtor pode irrigar quando for necessário, além de poder ter um estudo diferenciado de diferentes áreas dentro da propriedade.

Ter conhecimento real sobre a área de seu cultivo, seja em relação às características do solo ou climáticas, é um bom modo do agricultor manejar seu plantio. Desta forma, é possível tomar decisões mais adequadas, evitando desperdício de água, fertilizantes ou mesmo a perda do plantio.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Organização das Nações Unidas (ONU) revela que a agricultura brasileira utiliza em torno de 72% da água consumida no país (IDOETA, 2015), sendo que a agricultura é responsável por cerca de 60% do desperdício total da água (WALBERT, 2013). A principal causa desse desperdício está no uso inadequado da água na irrigação das plantações. As maiores perdas estão na evaporação, no vento ou mesmo pelo excesso de água regado nas plantas (IDOETA, 2015).

Atualmente, as pesquisas na área de irrigação buscam o desenvolvimento de sistemas automatizados para um melhor manejo dos recursos hídricos (PAZ et al., 2000). Com a escassez da água da chuva, produtores estão procurando novos meios para a irrigação. Um produtor não orientado irriga como e quando pode, porém, fazendo coletas diariamente e ao longo prazo, é possível saber a quantidade de água que o plantio necessita naquele momento (IDOETA, 2015).

Para auxiliar na dosagem adequada de água, novas tecnologias têm sido desenvolvidas, como sensores mais precisos e mais eficientes para o

monitoramento do solo (ARVUS, s.d.). A instrumentação tradicional empregada na medição da umidade do solo é baseada no recolhimento de amostras que são levadas a um laboratório para análise. Esse método é inconveniente para um sistema de controle de irrigação, pois só permite conhecer os resultados, no mínimo, após 24 horas da coleta das amostras. Essas dificuldades para obtenção de resultados imediatos tornam este método inviável, especialmente para sistemas de controle no campo e em grandes áreas. Além disso, esse processo envolve mão de obra especializada e custos laboratoriais (DURSUN; OZDEN, 2011).

A utilização de sensores precisos, apresentando resultados contínuos e imediatos, leva a uma tomada de decisão mais correta, pois a irrigação em excesso pode deixar a raiz da planta sem oxigênio, ou se a irrigação for insuficiente pode deixar a água retida fortemente no solo e inibir o crescimento da planta, trazendo prejuízos ao produtor (SILVA, 2015).

1.2 OBJETIVOS

A seguir os objetivos gerais e específicos do trabalho proposto.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um sensor digital de umidade do solo e de uma unidade de monitoramento utilizando comunicação sem fio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar e analisar as técnicas de medição de umidade no solo e sensores existentes para esta finalidade;
- 2) Definir a técnica de medição de umidade a ser utilizada;
- 3) Desenvolver os circuitos analógicos de medição;
- 4) Definir um módulo de rádio frequência para comunicação entre o sensor remoto e uma unidade de monitoramento.
- 5) Desenvolver o hardware e o firmware do sistema microcontrolado do sensor;

- 6) Desenvolver o hardware e o firmware do sistema microcontrolado para compor a unidade de monitoramento;
- 7) Avaliar o funcionamento do sensor em campo.

1.3 JUSTIFICATIVA

A água é um componente importante do solo, pois é um dos fatores que mais influenciam o crescimento e a produtividade das plantas. A quantidade de água depende da cultura, do tipo de solo, do clima e da eficiência do sistema de irrigação adotado. Com o monitoramento em tempo real, pode-se obter informações sobre a umidade do solo, que é a base para a implementação de um sistema de controle de irrigação na agricultura (ZHEN et al., 2014).

O monitoramento constante das propriedades do solo proporciona um melhor controle na utilização da água, visando reduzir o seu consumo sem prejudicar o crescimento das plantas. Com o intuito de facilitar a coleta de informações a qualquer momento, sob qualquer condição climática, sensores foram criados para tornar a medição da umidade do solo um trabalho mais rápido, preciso e seguro (GANSELLI; BRANQUINHO, 2009).

Com os resultados instantâneos obtidos pelos sensores, é possível identificar quais cuidados os cultivos necessitam logo após a medição, possibilitando diferentes tratamentos ao longo da mesma área de produção, visando obter máximo rendimento (GANSELLI; BRANQUINHO, 2009).

Os métodos comuns para determinação do teor de umidade do solo realizados em laboratórios são métodos diretos. Apesar de esses métodos apresentarem uma boa exatidão, são demorados, invasivos e realizados *in vitro*. Para uma determinação rápida da umidade do solo, podem ser utilizados métodos indiretos. A maior parte das técnicas não destrutivas para determinar a umidade do solo consiste em medir as propriedades elétricas do material e relacioná-las com o teor de umidade (MASOUND et al., 2012).

Os métodos de medição da quantidade de água no solo vêm sendo estudados, desenvolvidos e aperfeiçoados visando obter recursos de instrumentação capazes de monitorar a umidade do solo com algumas características desejáveis, tais como: baixo custo, tratamento das informações

através de sistemas automatizados, exatidão das medições com adequação aos propósitos da aplicação, repetibilidade, vida útil elevada e rapidez na obtenção dos resultados (MENDES, 2009).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho divide-se da seguinte forma:

- O Capítulo 1 contém a Introdução, no qual é apresentada a motivação do trabalho com uma visão geral do conteúdo proposto, os seus objetivos e a justificativa.
- O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica envolvendo os métodos de medição do teor da umidade do solo.
- O Capítulo 3 refere-se à metodologia utilizada para a construção do sensor digital de monitoramento da umidade do solo e da unidade de monitoramento.
- No Capítulo 4 estão os procedimentos e os testes de verificação realizados.
- O Capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho e propostas para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados a correlação do solo com a umidade e os métodos para medição do teor de umidade do solo, tais como: gravimétrico, sonda de nêutrons, reflexão no domínio do tempo (TDR), reflexão no domínio da frequência (FDR) e capacitivo.

2.1 UMIDADE DO SOLO

Para caracterizar as condições hídricas do solo é de suma importância o conhecimento do teor de umidade presente no solo. Pois com ela é possível determinar a quantidade de água a ser aplicada no momento da irrigação.

As aplicabilidades da irrigação dos solos podem ser divididas em dois segmentos: disponibilidade da água a fim de suprir as necessidades hídricas do cultivo possibilitando seu desenvolvimento e produção e fornecer a diluição do excesso de sais em áreas com problemas referentes ao clima seco e sem umidade (MONTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007).

As etapas da técnica de irrigação consistem em, como irrigar caracterizando os métodos de irrigação e, quando e quanto há necessidade de irrigação ao plantio. Para a análise dessas duas últimas etapas deve-se levar em consideração algumas características do solo, água, planta, clima e sistema de irrigação (MONTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007).

Existem diversos meios para determinar a umidade do solo onde a principal diferença dentre eles é a sua operação em campo além da forma de medição, local de medição, equipamentos necessários, preço e tempo de resposta.

2.2 MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

Os métodos de medição da umidade do solo são classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a água é extraída de uma amostra de solo e quantificada. Nos métodos indiretos, são obtidas as propriedades físicas do solo,

como resistência elétrica, pressão, capacitância, reflexão de um pulso elétrico, entre outros, que variam com o conteúdo de água no solo.

2.2.1 Método Gravimétrico

Este método é amplamente utilizado para a determinação do teor da umidade do solo. Consiste em recolher uma amostra do solo úmido, pesar a amostra recolhida e em seguida deixá-la em uma estufa com uma temperatura de 105°C por no mínimo 24h. Esse tempo na estufa fará com que a água na amostra seja evaporada, é um método de elevada precisão e serve como referência para calibração de outros métodos (PARIVA et al., 2012). Após isso, uma nova pesagem é feita e com isso é possível determinar o teor de umidade do solo a partir da Equação 1.

$$\%Umidade = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: Mu é a massa da amostra úmida e Ms é a massa da amostra seca (EMBRAPA, 1997).

Um dos problemas do método direto gravimétrico é o tempo de resposta e necessidade de equipamentos específicos para a determinação da umidade do solo além da dificuldade de controlar grandes áreas.

2.2.2 Método utilizando Sonda de Nêutrons

No método que utiliza uma sonda de nêutrons, uma sonda emite nêutrons rápidos a partir de uma fonte radioativa e, quando estes colidem com partículas com a mesma massa que um nêutron, sofrem uma redução drástica em sua velocidade, formando uma nuvem de nêutrons. Uma vez que a água é a principal fonte de hidrogênio na maioria dos solos, a densidade da nuvem de nêutrons formada em torno da sonda é quase proporcional ao volume de água presente no solo (CARPENA, 2005). A medição é relacionada com propriedades físico-químicas do solo. A instrumentação requer um operador qualificado, devido à utilização da fonte radioativa, e é potencialmente perigoso para a saúde e para o ambiente (PARIVA et al., 2012).

2.2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo

A técnica de reflectometria no domínio no tempo ou *Time-Domain Reflectometry* (TDR), empregando ondas eletromagnéticas, foi o primeiro método aplicado para a determinação da umidade do solo (MASOUND et al., 2012). A constante dielétrica aparente do solo é determinada a partir do tempo de propagação de um pulso (onda) eletromagnético ao longo de um meio de transmissão que, neste caso, é o próprio solo (CARPENA, 2005)

Nesta aplicação, pulsos elétricos muito curtos são enviados através de uma sonda formada por duas ou três sondas metálicas (PARIVA et al., 2012). A velocidade de um pulso é medida e correlacionada com a umidade do solo. Por exemplo, quanto mais baixa é a velocidade da onda, mais úmido está o solo. Esta técnica permite medições confiáveis da umidade do solo e pode ser feita dentro de um curto intervalo de tempo (PARIVA et al., 2012).

A salinidade do solo ou teores de argila são altamente condutores e, com isso, pode afetar as medições feitas pelo equipamento, uma vez que contribui para a atenuação dos pulsos refletidos. Em solos nessas condições, pode ser utilizada uma sonda com hastes revestidas com epóxi¹, porém, isto implica na perda de sensibilidade e na alteração da calibração do equipamento (CARPENA, 2005).

É interessante notar que, além do tempo de reflexão da onda, pode haver uma alteração no tamanho ou na atenuação do pulso, que pode estar relacionada com a condutividade elétrica do solo. Esta aplicação permite que alguns dispositivos comerciais efetuem a medição teor de água e da salinidade do solo simultaneamente (CARPENA, 2005).

2.2.4 Reflectometria no Domínio da Frequência

A reflectometria no domínio da frequência ou *Frequency-Domain Reflectometry* (FDR) é uma técnica semelhante ao TDR, porém a FDR fornece uma estimativa de teor de umidade do solo com base na variação da frequência de um sinal propagado no meio em função das propriedades dielétricas do solo (PARIVA et

¹ Plástico termofixo que endurece quando se mistura com um agente catalisador (PINHAL, 2009).

al., 2012). O solo é um componente capacitor de um circuito de ressonância, que é atenuada pela permissividade dielétrica do conteúdo do solo (AWE, 2010).

A mudança de fase e a atenuação da amplitude de um sinal elétrico que se propaga no solo são semelhantes ao que ocorre em um capacitor com dielétrico condutivo. A medição da capacitância pode ser feita em uma única frequência gerada por um oscilador (CARPENA, 2005).

Sistemas de medição baseados em FDR funcionam em solo com alto teor de salinidade sem interferência nos resultados. Além disso, a resolução dos equipamentos do tipo FDR é melhor que aqueles do tipo TDR, pois o nível de interferência do sinal é menor (CARPENA, 2005).

2.2.5 Método Capacitivo

Na agricultura e na geologia a verificação da umidade do solo é uma prática muito importante, alguns monitores de umidade do solo operam no princípio da condutividade elétrica.

Água pura não é um bom condutor de eletricidade. Uma vez que a corrente elétrica é transportada por íons numa solução, a condutividade aumenta conforme a concentração de íons é elevada. Portanto, a condutividade aumenta à medida que a água é dissolvida em espécies iônicas (FRADEN, 2010).

O solo é composto por uma grande variedade de minerais e materiais orgânicos existentes no estado sólido, gasoso e aquoso. Os componentes aquosos, que é água dissolvida, são os principais contribuintes para a condutividade elétrica do solo. Para monitorar a água contida no solo são empregados alguns métodos. No método capacitivo, a concentração de água no solo é calculada a partir da condutividade elétrica e da capacitância medida. Onde a resistividade elétrica é medida pelo monitoramento de tensão e o fluxo de corrente entre os eletrodos inseridos na amostra do solo (FRADEN, 2010).

Para realizar essas medições, longos pares de eletrodos em forma de haste são colocados no solo. Utilizando altas frequências, o teor de água no solo é diretamente proporcional a condutividade elétrica, ou seja, quanto mais água mais condutividade elétrica. (CHANG, et al., 2007).

Este tipo de sensor se baseia na variação da capacitância de acordo com a variação da quantidade de água presente no solo. O valor da capacitância pode ser definido por (MENDES, 2009):

$$C = \frac{E \cdot S}{d} \quad (2)$$

Onde, E corresponde a permissividade elétrica, S a área das placas e d a distância entre as placas.

A partir da Equação 2, percebe-se que o valor da capacitância dependerá do meio dielétrico e também da distância entre as placas e que a resposta do sensor pode estar diretamente relacionada com a as variações de umidade do solo, uma vez que as características dielétricas do meio são alteradas (Silveira; Brusamararello, 2010).

COMPARATIVO DOS MÉTODOS			
CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS		
	CAPACITIVO	FDR	TDR
Necessidade de calibração para diferentes tipos de solo	Sim, para todos os tipos de solo	Sim, para todos os tipos de solo	Sim, para solo mais úmidos
Tempo de resposta	Rápido	Rápido	Lento
Precisão	Alta	Alta	Média
Sensibilidade ao sal	Pouco	Pouco	Muito
Custo	Baixo	Médio	Alto
Frequência	Baixa / Média	Baixa / Média	Alta
Flexibilidade no projeto da sonda	Alta	Alta	Baixa

Quadro 1 - Comparativo dos métodos de medição de umidade do solo
Fonte: Obtido a partir de Carpena (2005).

Na análise comparativa dos métodos apresentada no Quadro 1, é possível concluir algumas vantagens dos sensores capacitivos dentre eles estão rapidez no tempo de resposta, precisão nos dados obtidos, pouca sensibilidade ao sal, baixo custo, opera em baixa e média frequência e uma flexibilidade no projeto das sondas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento do protótipo do sensor digital de umidade do solo e da unidade de monitoramento utilizando comunicação sem fio.

Na primeira fase, foram realizadas revisões de literatura sobre os métodos de medição da umidade do solo e suas aplicações. A análise destes métodos serviu de base para identificar qual método se adaptava aos pré-requisitos que são: tempo de resposta e funcionamento em vários os tipos de solo. Em seguida, foi realizada uma revisão de literatura contextualizando aplicações na agricultura utilizando sensores de umidade, resultando na decisão de desenvolver um sensor digital sem fio devido à dificuldade de uso de cabos em longas distâncias. Por fim, fez-se uma revisão de literatura em sensores já projetados que obtiveram resultado satisfatório, para ser utilizado como base deste trabalho. A partir dessa revisão, foi escolhido o método capacitivo utilizado pelo Zhen et al. (2014) como método de medição da umidade do solo. Essa escolha deu-se por esse método permitir o desenvolvimento de um sensor com os equipamentos presentes nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Pato Branco e, ainda, conforme o Quadro 1.

O método utilizado por Zhen et al. (2014) foi desenvolvido a partir de um sensor para medição de umidade do solo de alta frequência e baixa capacitância (na ordem de pico farads). Esse sensor possui um gerador de sinal ajustável, um atenuador de sinal, um sistema para detecção da potência RMS (*Root Mean Square*), um circuito de carga e descarga, e dois eletrodos para a sonda. O eletrodo da sonda é formado por uma placa de circuito impresso (PCI). Com este método, concluiu-se na análise preliminar que, devido à utilização de uma sonda com circuitos integrados, o consumo de energia para um sensor de medição da umidade do solo, com sonda de alta frequência, foi consideravelmente baixo.

Experiências de calibração e aplicação em campo mostraram que a estabilidade do sensor pode satisfazer os requisitos de medição do solo (ZHEN et al., 2014).

O sensor desenvolvido neste trabalho está ligado diretamente ao solo, enviando e recebendo sinais. A comunicação entre a unidade sensora e a unidade de monitoramento será operacionalizada com o uso de módulos de rádio frequência, como mostra o diagrama de blocos da Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de Blocos do Sistema para Medição de Umidade do Solo
Fonte: Autoria Própria.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a realização deste projeto estão listados no Quadro 2, assim como a sua especificação e a sua utilidade. Os critérios adotados para a escolha dos mesmos foram: disponibilidade e características do sistema.

MATERIAL	ESPECIFICAÇÃO	USO NO PROJETO
Cristal Oscilador	100 MHz	Entrada do sensor
Microcontrolador	MSP430G2553	Controle do sistema
Módulos de Rádio Frequência	XBee S1	Comunicação entre a Unidade Sensora e a Unidade de Monitoramento
Amplificador Logaritmo	AD8307	Tratamento dos dados
Relógio de Tempo Real	RTC DS1307	Calendário e Relógio do sistema
Placa de Circuito Impresso	Simplex Face	Confecção das sondas
Conversor USB/ Serial	CP2102	Comunicação entra a Unidade de Monitoramento e o Servidor
Ferramenta de Desenvolvimento	Code Composer Studio	Integração e configuração do material utilizado

Quadro 2 - Materiais Utilizados e suas especificações
Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 Cristal Oscilador

Um oscilador é um circuito eletrônico que produz um sinal elétrico repetitivo, de uma determinada frequência (WJR, 1997). Uma das características mais importantes de qualquer oscilador é a sua estabilidade de frequência, ou em outras palavras, a sua capacidade de fornecer uma saída de frequência sob diferentes condições de carga.

Os cristais ressonadores possuem propriedades piezoelétricas, ou seja, a geração interna de tensão elétrica resultante de uma força mecânica

(ELECTRONICS, 2016). Para este trabalho, o cristal oscilador será a entrada da unidade sensora, que através da sonda enviará os sinais para o solo.

3.1.2 Microcontrolador

Microcontrolador é um pequeno computador em um único circuito integrado que contém um núcleo de processador, periféricos programáveis de entrada e saída e memória, geralmente utilizados em automação e controle de produtos e periféricos (PEREIRA, 2005).

Foram utilizados dois kits MSP-EXP430G2 LaunchPad MSP430G2553 desenvolvido pela Texas Instruments®, com a finalidade controlar o sistema como um todo. A aquisição de dados será efetuada pela sonda junto ao microcontrolador 1 que fará a interpretação dos dados e enviará os resultados para o microcontrolador 2, através dos módulos de rádio frequência conectado a estes. O microcontrolador 2 estará ligado a um computador para visualização da resposta, armazenamento dos dados para futuras pesquisas e utilização do histórico. O kit MSP-EXP430G2 é apresentado na Figura 2.

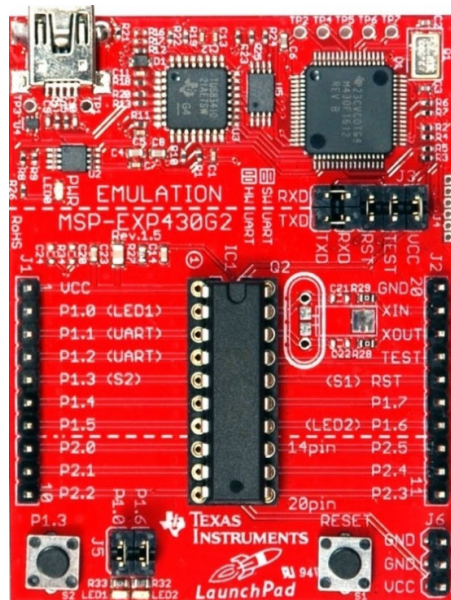


Figura 2 - MSP - EXP430G2 - LaunchPad
Fonte: Autoria Própria

Algumas das principais características deste kit são (TEXAS, 2015):

- Microcontrolador MSP430G2553

- CPU de 16 bits;
- 8 canais de 10 bits para conversão analógica para digital;
- Comparador de sinal analógico;
- Pinos de entrada e saída;
- 16 kB de memória *flash*;
- 512 *bytes* de memória RAM.
- Interfaces UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*);
- 24 pinos de entrada e saída;
- 2 temporizadores de 16 bits;
- 2 LEDs (*Light Emitting Diode*), de uso geral conectados a pinos de entrada e saída;
- Conectividade USB (*Universal Serial Bus*);
- Botão de reset;
- 2 *push-buttons*;

3.1.3 Módulos de Comunicação por Rádio Frequência

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os módulos de comunicação por rádio frequência XBee Série 1 desenvolvido pela empresa Digi Internacional Inc. Esse módulo é exibido na Figura 3.



Figura 3 – Módulo de RF XBee (Série 1)
Fonte: Digi Internacional Inc. (2015).

Algumas características deste módulo de RF são (DIGI,2015):

- Frequência de operação de 2.4 Ghz;
- Taxa de dados máxima de 250 Kbps;

- Alcance máximo em ambientes externos de, aproximadamente, 100 m;
- Alcance máximo em ambientes internos, aproximadamente, 30 m;
- Potência de transmissão máxima de 2 mW;
- Sensibilidade do receptor de -96 dBm;
- Antena acoplada;
- Tensão de alimentação de 2,8 V a 3,4 V;
- Corrente de transmissão de 45mA quando alimentado com 3,3V;
- Corrente de recepção de 50mA quando alimentado com 3,3V.

Os módulos XBee são módulos de Rádio Frequência (RF) que fazem comunicações no padrão IEEE 802.15.4. O protocolo XBee permite comunicações robustas e opera na frequência 2,4 GHz e não requer licença para funcionamento para potências de até 100mW. Os módulos de RF foram criados para economizar o máximo de energia possível. Com isso, é possível criar aplicações de baixo consumo, utilizando pilhas ou baterias comuns, como por exemplo, realizar leituras de sensores em campo, remotamente.

Quando os módulos não estão operando, eles entram no modo “*Sleep*”, no momento que o módulo está programado no modo transmissor, consome 45 mA, logo quando está operando no modo receptor consome 50 mA. (DIGI, 2015).

Como este trabalho trata de um sensor de umidade no meio agrícola, a utilização de cabos e fios no campo torna-se inviável devido à extensão de plantio e, conseqüentemente, podendo haver rupturas em conseqüência da utilização do maquinário agrícola, por exemplo.

3.1.4 Amplificador Logarítmico

Foi utilizado o circuito integrado AD8307 desenvolvido pela Analog Devices[®]. Seu esquemático interno é exibido na Figura 4.

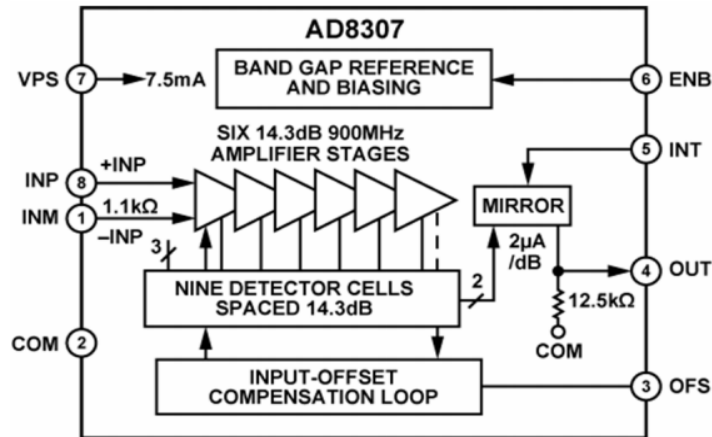


Figura 4 - Esquemático Interno do circuito integrado AD8307
Fonte: Analogic Devices, 2015.

Algumas das características do circuito integrado AD8307 são (ANALOGIC DEVICES, 2015):

- Frequência máxima de operação de 500MHz;
- Tensão de alimentação de 2,7V a 5,5V;
- Consumo de energia de apenas 24mW, quando alimentado com 3V.

O AD8307 oferece uma combinação de baixo custo, tamanho pequeno, baixo consumo de energia, alta precisão e estabilidade e tempo de resposta rápido, além de possuir demodulação com base progressiva, ou seja, utiliza técnica de detecção sucessiva (ANALOGIC, 2015).

A finalidade essencial de um amplificador logarítmico não é amplificar, embora seja utilizado para isso. Sua função é comprimir um sinal de grande faixa dinâmica ao seu decibel equivalente. Um termo melhor utilizado seria conversor logarítmico, pois sua função básica é a conversão de um domínio de representação para outro por meio de uma transformação não linear (ANALOGIC, 2015).

3.1.5 Relógio de Tempo Real

Um relógio de tempo real ou RTC (*Real Time Clock*) é um dispositivo que provê informações temporais, tais como calendário e horário. O módulo RTC DS1307 possui 56 bytes de memória SRAM (*Static Random Access Memory*), ou seja, é um tipo de memória estática, que mantém os dados armazenados desde que seja mantida sua alimentação. É capaz de armazenar e fornecer informações

completas de data, como dia da semana e do mês, mês, ano e as funções de horas, minutos e segundos nos formatos de 12 ou 24 horas. Meses com menos de 31 dias e anos bissextos são ajustados automaticamente (MAXIM, 2015).

O módulo RTC DS1307 opera em conjunto com uma bateria de lítio que garante que os dados sejam preservados mesmo sem alimentação externa. Também possui um circuito que detecta as falhas de energia, acionando automaticamente a bateria para evitar perda de dados. Endereços e informação são transferidos via interface I²C. (MAXIM, 2015).

A Figura 5 apresenta o módulo RTC com vista frontal e posterior. No presente trabalho o módulo é utilizado para salvar a data e hora de cada medição, para que posteriormente os dados sejam analisados.

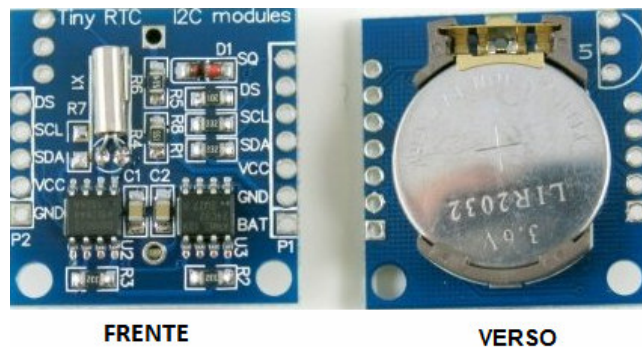


Figura 5 - Real Time Clock DS1307
Fonte: Autoria Própria.

3.1.6 Placa de Circuito Impresso

Uma placa de circuito impresso é constituída por camadas de materiais plásticos e fibrosos, que conta com finas películas metálicas, que formam as trilhas, que são responsáveis pela condução da corrente elétrica. A placa de circuito impresso é utilizada na confecção da sonda para medir a umidade do solo.

Na Figura 6 é apresentada um modelo de sonda utilizada para a medição de umidade do solo. A sonda A foi confeccionada conforme o trabalho do Zhen et al. (2014), com 5 cm de comprimento e 0,5 cm de largura, totalizando uma área total de cobre de 2,5 cm² por sonda, precisando assim de duas sondas como esta, com um espaçamento entre elas de 5 cm.

Figura 6 - Projeto da Sonda A
Fonte: Autoria Própria.

Onde na Figura 7 tem-se o projeto da sonda B que foi projetada com o intuito de análise de resposta do sistema a partir de uma área menor de cobre, com 5 cm de comprimento e 0,2 cm de largura, totalizando 1 cm², com um espaçamento de 0,1 cm entre as áreas.

Figura 7 - Projeto da Sonda B
Fonte: Autoria Própria.

3.1.7 Conversor UBS para UART

O conversor USB para UART atua para converter dados transmitidos por uma interface USB (Universal Serial Bus) para o padrão UART de interface e vice-versa. A comunicação serial é utilizada em sensores, microcontroladores, módulos *bluetooth*, entre outros. No projeto, está sendo utilizado para configurar os módulos de rádio frequência.

Foi utilizado o conversor CP2102 desenvolvido pela *Silicon Labs* que é apresentado na Figura 8. Os sinais de comunicação da interface UART são (SILICON, 2016):

- VCC, GND – Alimentação;
- RXD (Read Data), TXD (Write Data): Linhas de transmissão de dados;
- DTR (Data Terminal Ready): Terminal pronto para receber dados;
- RTS (Request to Send): Requisição para enviar;
- CTS (Clear to Send): Pronto para enviar;
- DSR (Data Set Ready): Dados Prontos para enviar.

Para a interface USB:

- VCC, GND – Alimentação;
- Data + - Comunicação;
- Data - - Comunicação.

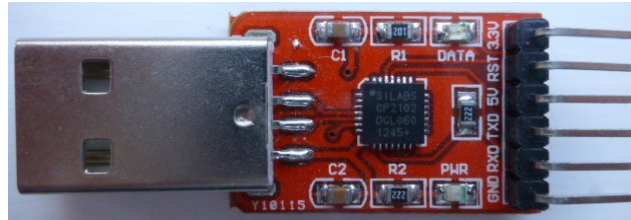


Figura 8 - Converso USB/ Serial - CP2102
Fonte: Autoria Própria.

3.1.8 Ferramenta de Desenvolvimento

A ferramenta de desenvolvimento de firmware para o microcontrolador utilizada foi o *Code Composer Studio* (CCS) fornecido pela *Texas Instruments*, que é um ambiente de desenvolvimento integrado que suporta microcontroladores e processadores embarcados. Este software inclui um conjunto de ferramentas usadas para desenvolver e depurar aplicativos incorporados, possui otimização em C /C++, editor de código fonte e ambiente de construção de projetos, entre outros recursos (CCS, 2016).

3.2 METODOLOGIA

Por se tratar de um sensor de unidade do solo, visando seu uso em plantações ou em até mesmo em sistemas automatizado de irrigação, o mesmo foi projetado para ter uma bateria de alimentação, facilitando o uso no meio agrícola pela possível dificuldade de energia elétrica no local de medição.

O projeto foi dividido em duas partes, a Unidade Sensora que é composta pela sonda, pelo sistema microcontrolado 1 e o módulo RF 1 e a Unidade de Monitoramento que é composta pelo sistema microcontrolado 2 onde será analisada a saída do sistema, o módulo RF 2 e um computador trabalhando como servidor para que o usuário tenha acesso às informações recebidas da unidade sensora, conforme apresenta o diagrama de blocos mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama do sistema de medição proposto
Fonte: Autoria Própria.

3.2.1 Unidade Sensora

O sensor é composto por um circuito oscilador, duas sondas e um amplificador de sinal. O circuito oscilador é responsável geração do sinal senoidal de amplitude 2 V e frequência de 100 Mhz. Este sinal é aplicado no solo a ser analisado através de duas sondas como mostra a Figura 10. O sinal é convertido pelo amplificador logarítmico e amostrado com uma tensão contínua que varia entre 1 V e 2 V. Através da variação da capacitância entra as sondas, o sinal é atenuado ou amplificado de acordo com o valor da capacitância do solo. A partir dessa tensão é possível analisar a umidade do solo.

Figura 10 - Diagrama de Blocos do Sensor
Fonte: Autoria Própria.

O microcontrolador da Unidade Sensora é responsável pela aquisição de dados do sensor e os envia para o modulo RF, além de verificar se o sistema possui bateria suficiente para operar.

A verificação da tensão da bateria é realizada da seguinte forma, caso a tensão da bateria esteja abaixo do primeiro limiar que é meia carga de bateria, o sistema faz uma segunda verificação, se a tensão está abaixo do segundo limiar o sistema considera que não tem bateria suficiente para o devido funcionamento e é desligado.

Esse estado pode ser verificado através de um *led* externo, se o mesmo estiver desligado significa que o sistema não está operando. Caso o sistema continue seu funcionamento e a acontecesse da bateria acabar durante esse processo, pode ocorrer falha no envio dos dados e até mesmo a perda. Logo se a resposta do segundo limiar seja negativa, o sistema segue a sua rotina.

A rotina do sistema microcontrolado começa com o recebimento de um pacote da unidade de monitoramento via UART, caso o pacote é valido é verificado o comando recebido, se o comando é reconhecido como comando de leitura é realizada uma leitura de referência do sensor e com base no valor lido é calculado a tensão que os conversores devem produzir, para a referência positiva e a referência negativa do conversor analógico digital. Em seguida é realizada uma leitura do sensor, essa leitura é realizada 10 vezes onde são gravadas em um vetor, após todas as leituras é realizada a média das mesmas. Com o resultado do cálculo da média os dados são montados em um pacote com base no protocolo definido para garantir a integridade dos dados e são enviados via módulo de rádio frequência. O fluxograma de inicialização do sistema pode ser observado no Apêndice A. E no Apêndice D é apresentado o fluxograma da tarefa de leitura do sistema.

Quando o sistema é inicializado do *reset* e a cada 10 segundos o microcontrolador envia o comando “+++” ao XBee e aguarda uma resposta do módulo, este comando tem a finalidade de fazer com que o XBee entre em comando AT, o XBee deve retornar uma resposta igual a “OK<return>”, o microcontrolador aguarda por até 2 segundos pela resposta do módulo, caso não tenho resposta é gerado um pulso no pino *reset* e o módulo é reuniciado e aguarda novamente os 10 segundos para realizar um novo teste. Quando a unidade sensora não está operando a mesma entra em estado de baixa potência. No Apêndice C é

apresentado o fluxograma da interrupção para estabelecer requisitar a tarefa “Comteste” que é responsável pela verificação de conexão com o XBee.

3.2.2 Unidade de Monitoramento

A unidade de monitoramento está diretamente ligada ao servidor onde é possível visualizar em tempo real os dados obtidos pela unidade sensora.

O sistema microcontrolado da unidade de monitoramento é responsável em identificar o comando recebido do servidor, com isso é gerada uma resposta sobre esse comando, se o comando é identificado ou não. Caso o comando de leitura seja reconhecido é estabelecida uma conexão com o sensor, e requisitado os dados da leitura do sensor assim aguarda a resposta do sensor. Após um determinado tempo e não seja obtida a resposta do sensor uma resposta de falha na conexão ao servidor é gerada e enviada ao usuário.

Se foi possível obter os dados do módulo remoto é verificada a integridade do pacote, caso o pacote seja intrigo, obtém-se o tempo em que o sistema recebeu essa leitura através do relógio de tempo real que está conectado ao microcontrolador via conexão I2C e os envia para o servidor. Onde o usuário poderá visualizar a saída do sistema.

3.2.3 Comunicação sem Fio

Os módulos XBee são configurados através de comandos AT, esses comandos são utilizados para configurar ou ler parâmetros no módulo local.

Para configurar o XBee, é necessário utilizar somente os pinos 2-TX, 3-RX e o GND do módulo. Com o módulo conectado via conversor UBS/Serial é possível configurar o módulo através do programa X-CTU, disponibilizado pela fabricante. Essa configuração pode ser feita através da aba “*Terminal Console*”, digitando os comandos manualmente, como também através da aba “*Modem Configuration*”.

Para acessar o modo comando, é necessário digitar os três caracteres “+++”, se o módulo recebeu o comando corretamente, o mesmo é confirmado enviando a mensagem “OK”, após essa confirmação o módulo está apto para

receber os comandos de escrita ou leitura. O Apêndice E apresenta o fluxograma da tarefa (Comteste) que é responsável pela verificação de conexão com o módulo XBee.

Para garantir a totalidade dos dados recebidos foi criado um protocolo de integridade. Esse protocolo é verificado da seguinte forma: Assim que é recebido um pacote o módulo verifica o primeiro e o último caractere do pacote se esses caracteres são asterisco e sustenido respectivamente é lido e realizado o comando, caso algum do caractere não seja ao correspondido o módulo envia como resposta "Comando Inválido". O comando para realização da medição do sensor é *GET_DATA#, onde "GET_DATA" está configurado para inicializar a captura do sensor. O fluxograma da verificação do protocolo de integridade poder ver analisado no Apêndice B.

4 RESULTADOS

4.1 SONDA

As sondas são responsáveis pela captura dos dados, pois as mesmas estão diretamente ligadas ao solo. A variação da capacitância pode ser alterada de acordo com a sua geometria, distância entre as sondas ou o tipo de material utilizado (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2001).

Para a realização dos testes, foram confeccionadas 12 sondas, 6 do tipo A e 6 do tipo B, conforme mostra a Figura 11. O sensor utiliza apenas duas sondas para a aquisição dos dados, porém optou-se por ter sondas extras devido a possíveis danos nos experimentos. As sondas foram impermeabilizadas com resina epóxi para uma maior resistência a umidade e objetos cortantes no solo (pedras pontiagudas, vidro, etc).

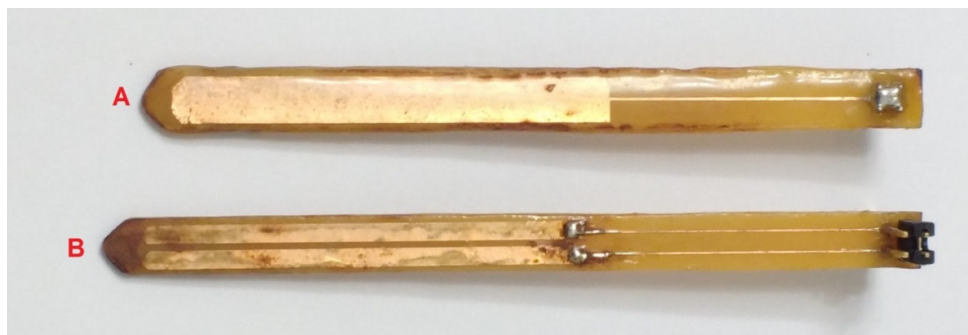


Figura 11 – Sondas tipo A e B desenvolvidas para aquisição da umidade do solo
Fonte: Autoria Própria.

Para a verificação da eficiência de cada sonda, ou seja a qual produz maior variação de capacitância, foi realizado um teste de variação da capacitância entre o solo seco e o solo encharcado. Com as sondas inseridas no solo, foi utilizado um RCL Meter para a medição de capacitância. A capacitância da sonda A em solo seco apresentou 4 pF e em solo encharcado 20 pF, resultando em uma variação de 16 pF. A sonda B apresentou uma capacitância de 6pF em solo seco e 16pF em

solo encharcado, levando a uma variação de 10 pF. Além disso, a distância entre as sondas A que possui uma melhor variação de capacitância ficou entre 3 cm e 5 cm.

Em Zhen et al. (2014) esses testes são comprovados e validados.

A implementação do sensor em PCI se deu através da elaboração de um *layout* do circuito oscilador junto com o amplificador logarítmico através do *software* EAGLE®. Depois do *layout* pronto, foi realizada a confecção da PCI, conforme mostra a Figura 12.

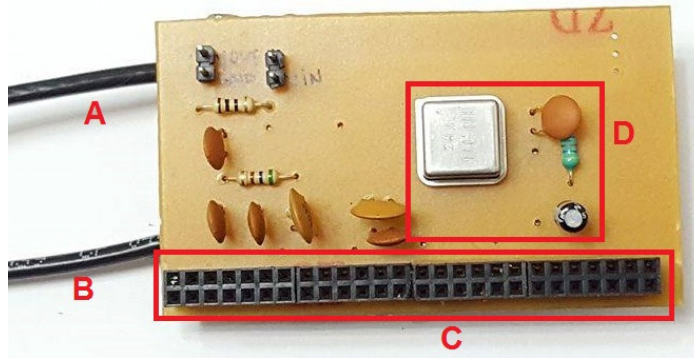


Figura 12 - Sensor em PCI
Fonte: Autoria Própria.

Pode ser observada na Figura 142a utilização de dois cabos blindados, sendo o cabo “A” responsável pela alimentação do sensor e o cabo “B”, a saída do sensor. Verificou-se a necessidade de cabos blindados para eliminar ruídos e interferências externas no sistema e por se tratar de um sensor que está ligado diretamente ao solo e poder ter contato com água (ex. chuva, solo molhado).

O sensor foi projetado para realizar de uma maneira simples e rápida a variação de distância entre as sondas. Para isso, foram utilizadas duas barras de 13 pinos duplos fêmea, conforme apresenta a Figura 12 “C”. Na Figura 12 “D” está o circuito oscilador.

4.2 AVALIAÇÃO DO CRISTAL OSCILADOR

Para o teste do cristal oscilador, o dispositivo foi montado em uma placa de circuito impresso, conforme a Figura 13 “B”. Devido ao sinal de alta frequência resultante e para evitar possíveis interferências, esse circuito não foi montado em

proto-board. De acordo com a Figura 13 “A”, observa-se um sinal com frequência de 100 MHz e amplitude de 2 Vpp.

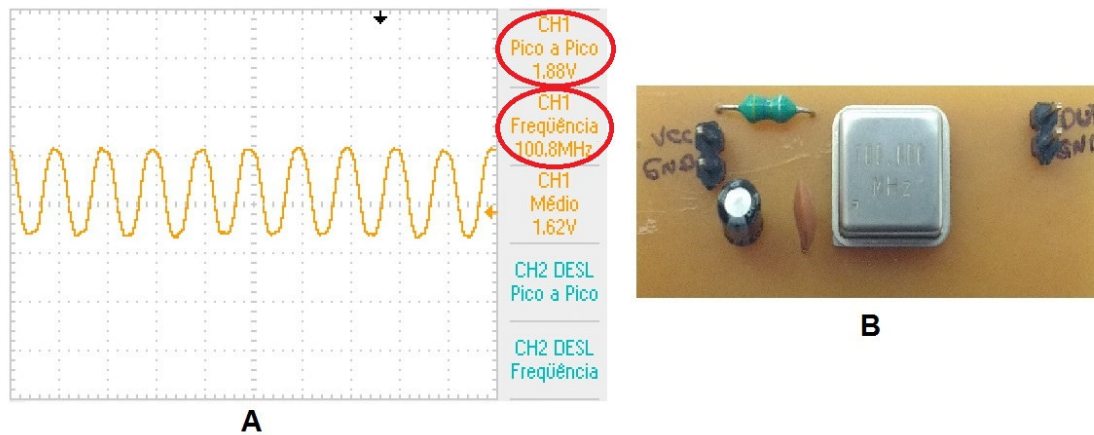


Figura 13 - Avaliação da resposta do cristal oscilador
Fonte: Autoria Própria.

4.3 SISTEMA DE DRENAGEM

Para a realização de testes no Laboratório Automação e Controle de Processos Agroindustriais junto a UTFPR – Câmpus Pato Branco, verificou-se a necessidade da confecção de um sistema de drenagem do solo. Para facilitar o escoamento e a evaporação da água presente no solo, foi confeccionado um sistema que é composto por uma garrafa pet (2 litros) e um filtro de papel, como pode ser verificado na Figura 14.

Primeiramente, foi cortado o cone da garrafa e furos diversos foram feitos para que a terra encharcada possa escoar a água acumulada e, também, para não interferir no processo natural de evapotranspiração do solo. Na parte inferior do sistema, também foram feitos furos com a mesma finalidade e algumas frestas maiores, tendo uma boa circulação de ar.



Figura 14 - Sistema de filtragem do solo
Fonte: Autoria Própria.

4.4 TESTES EM LABORATÓRIO

Foram realizados testes no Laboratório Automação e Controle de Processos Agroindustriais (LAPA). Primeiramente, foram executadas medições de tensão em solo seco e em solo encharcado para a verificação da variação da resposta do sistema. O solo seco descrito em todos os testes representa um solo com baixo teor de umidade e não um solo com umidade igual a zero.

Um capacitor variável foi adicionado entre as sondas com a finalidade de ajustar a capacitância do circuito para uma faixa de tensão de saída do circuito, considerando que a variação da capacitância da sonda era ínfima (em torno de 100 mV) em relação à tensão de saída. Com essa calibração, obteve-se uma variação de, aproximadamente, 390 mV.

4.4.1 Variação da tensão com relação a umidade do solo

Este teste tem a finalidade de avaliar a variação de saída do sistema no decorrer do processo de perda da umidade. Em paralelo a este teste foi analisada a variação da massa do solo durante o processo de evapotranspiração.

Todos os materiais utilizados durante os testes foram pesados com uma balança de precisão da marca Rochelle, com capacidade máxima de 5 Kg e precisão de 0,001 Kg. Esses dados são apresentados no Quadro 3.

MATERIAL	Peso (Kg)
Copo Descartável	0,002
Tampa de Recuso da Água Saturada	0,018
Sistema	0,043
Sistema com Tampa	0,061
Sonda com Cabo	0,007
Sonda sem Cabo	0,005
Terra Seca	0,200
Sensor	0,046
Água Total	0,200
Água Utilizada	0,105
Sistema com Terra Seca	0,261
Sistema com Terra Seca e Sonda	0,268
Sistema com Terra Encharcada e Sonda	0,373
Água Saturada	0.005

Quadro 3 - Pesagem do material utilizado nos testes
Fonte: Autoria Própria.

O procedimento empregado no primeiro teste de análise da tensão de saída do sistema a partir da variação da capacitância do solo ocorreu da seguinte forma: com o sistema com a terra seca e a sonda inserida, foi medida a tensão inicial. Após isso, foi adicionada água aos poucos no sistema até atingir o ponto de saturação do solo, quando a água não é mais absorvida pelo solo, sendo escoada pelo filtro.

Como o sistema estava montado em cima de uma balança com 0,001 Kg de precisão, foi possível observar que uma quantidade de 0,200 Kg de solo seco foi saturado com 0,105 Kg de água. Essa relação pode ser observada com a diferença das pesagens do sistema com terra seca e o sistema com terra encharcada. Assim

que o sistema parou de escoar a água saturada, a mesma foi retirada da balança e foi possível concluir que o solo ficou saturado com 0,100 Kg de água.

No primeiro instante, em solo seco a tensão de saída do sistema foi de 1,3V. Após a adição de água, essa tensão subiu para 1,62V. Com isso, é possível concluir que variação de capacitância do solo está diretamente ligada ao teor de umidade do solo. No Quadro 4 são apresentadas as medições do sistema enquanto este estava no processo de evaporação da água, ou seja, perdendo a umidade. O processo de perda total da umidade da água não foi atingido, devido à falta de equipamentos (estufa para forçar a evapotranspiração) no laboratório utilizado, sendo assim realizados esses testes posteriormente junto ao laboratório de física do solo da UTFPR campus Pato Branco do curso de agronomia.

Medição	Tensão (V)	Massa (Kg)
1	1,300	0,200
2	1,620	0,305
3	1,600	0,301
4	1,570	0,271
5	1,560	0,262
6	1,450	0,253
7	1,370	0,251
8	1,300	0,249
9	1,280	0,248
10	1,150	0,244
11	1,130	0,241

Quadro 4 - Resultados Obtidos no Teste 1
Fonte: Autoria Própria.

Nos resultados mostrados no Quadro 4 é possível observar a variação da tensão de saída do circuito e a massa ao longo da perda de umidade. A variação entre uma medição e outra não é proporcional, pois as medições não foram feitas de maneira cronológica, devido à temperatura e clima no dia que o teste foi realizado, tornando o processo natural mais lento. Com isso, foram feitas algumas intervenções externas, para acelerar o processo, como manter o ambiente aquecido e forçar vento em direção do sistema.

No gráfico da Figura 15 pode ser observada a variação da massa do solo enquanto está perdendo umidade. No decorrer do tempo enquanto a água realiza o

seu processo natural de evaporação, a massa do solo tende a diminuir, e estabilizar na quantidade de massa quando estava no estado seco.

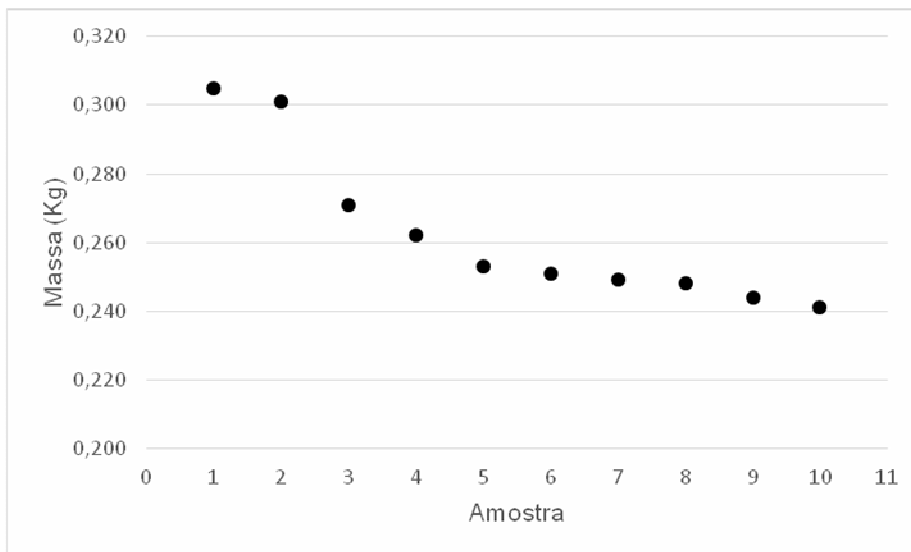


Figura 15 - Variação da massa no processo de perda da umidade
Fonte: Autoria Própria.

Também foi observado que a tensão diminui no decorrer do processo de perda da umidade e essa variação pode ser visualizada no gráfico da Figura 16.

Com esses testes pode-se concluir que a variação de tensão de saída do sensor varia com a mudança de capacitância do solo, ou seja, quando o solo está perdendo água a tensão de saída também diminui como resultado da queda no valor da capacitância do solo.

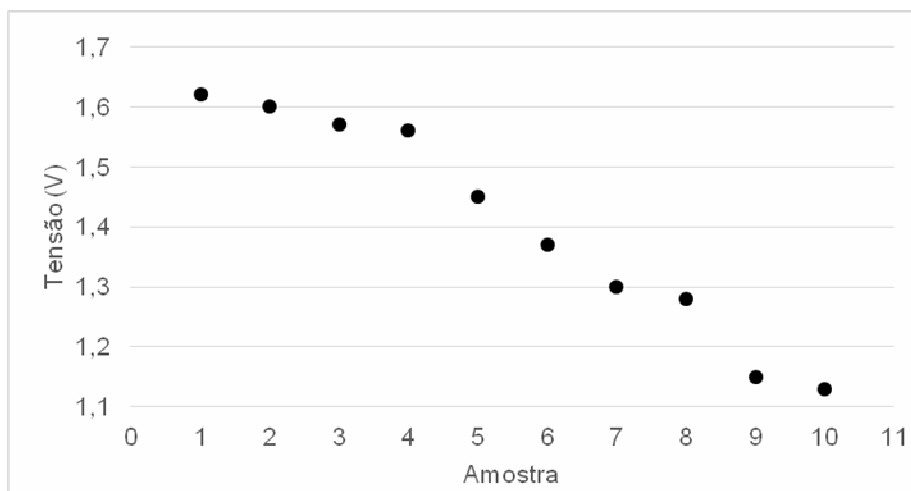


Figura 16 - Variação da tensão no processo de perda da umidade
Fonte: Autoria Própria.

O segundo teste foi realizado de forma inversa ao primeiro. Neste caso, o objetivo é apresentar a variação do sistema quando está recebendo água, ou seja, quando o solo está ficando úmido ou encharcado. Foi realizado o mesmo processo de pesagem da terra e da água, porém os 100g de água foram divididos em 5 partes. Nesse teste foi possível realizar as medições de forma periódica, no intervalo de 10 min foram adicionados 20g de água. Com isso foram realizadas 6 medições. A variação obtida pode ser analisada no gráfico da Figura 17.

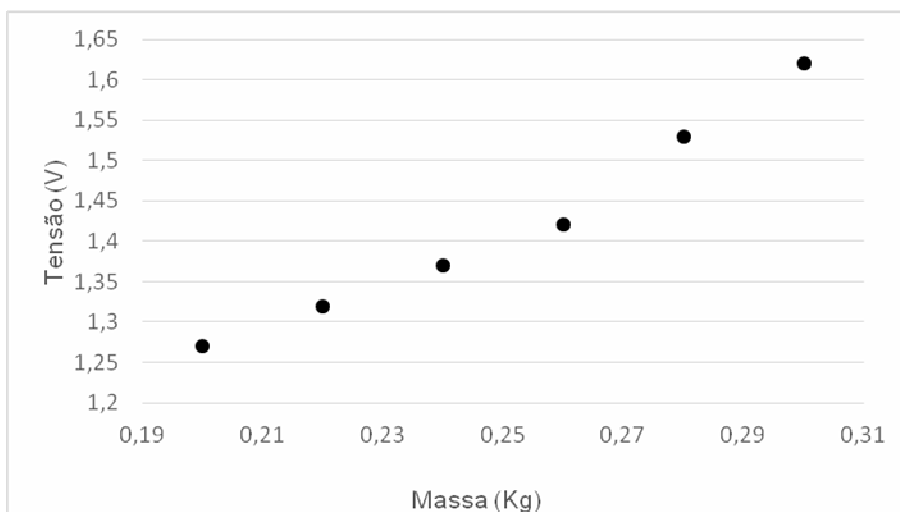


Figura 17 - Variação da tensão e da massa no processo de ganho de umidade
Fonte: Autoria Própria.

4.4.2 Teste Comparativo com o Método Gravimétrico

A realização deste teste tem por finalidade a comparação da tensão de saída do sistema com os resultados obtidos através do método gravimétrico. A partir desta comparação é possível identificar a linha de tendência do sistema.

Neste teste foram preparadas 10 amostras semelhantes, com 110g de solo e uma variação de 5ml de água em cada amostra. Após a estabilidade do solo foi medida a tensão de cada amostra, após essa medição o solo úmido foi pesado e armazenado na estufa por 24h a 105°C. Com a secagem do solo, o mesmo foi pesado novamente, a partir da Equação 1 pode-se conhecer a umidade de cada amostra, que pode ser observado no Quadro 5.

Amostra	Tensão	Massa de Solo Úmido	Massa de Solo Seco	Umidade
1	1,19 V	110,52g	93,73g	18,14%
2	1,32 V	116,52g	92,07g	26,89%
3	1,40 V	121,03g	91,88g	32,09%
4	1,48 V	125,05g	93,02g	34,85%
5	1,50 V	130,63g	94,78g	38,31%
6	1,52 V	135,26g	96,77g	40,26%
7	1,55 V	140,19g	99,31g	41,65%
8	1,57 V	145,71g	101,97g	43,40%
9	1,60 V	150,62g	102,78g	47,07%
10	1,66 V	155,69g	103,52g	50,93%

Quadro 5 - Resultados obtidos através do método gravimétrico
Fonte: Autoria Própria.

Com os resultados obtidos com o teste de pesagem dos solos foi possível comparar a tensão de saída do sistema com o resultado do percentual de umidade do solo. Essa comparação pode ser observada no gráfico da Figura 18.

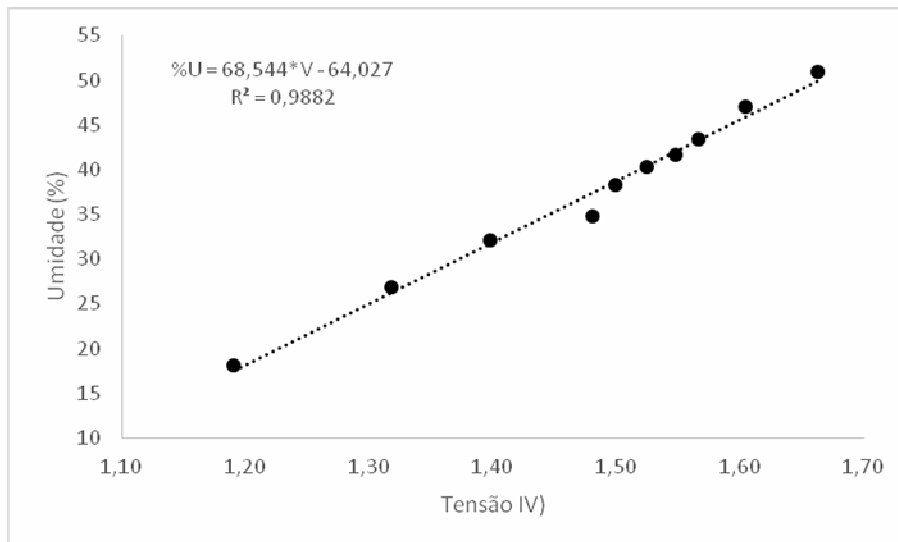


Figura 18 - Correlação da Tensão e Umidade obtida no teste de pesagem do solo
Fonte: Autoria Própria.

A equação resultante é:

$$\%U = 68,544 * V - 64,027 \quad (3)$$

Onde $\%U$ é o percentual de umidade e V a tensão de saída do sistema.

Com os resultados adquiridos neste teste nota-se a curva de tendência do sistema que resultou em um coeficiente de correlação de 0,988. Com isso é possível concluir que a variação de tensão do solo está diretamente relacionada com a variação de umidade do solo.

No Quadro 6 pode-se verificar os valores obtidos com o método gravimétrico e os valores calculados a partir da equação resultantes da curva de tendência.

Amostra	Tensão	Umidade Gravimétrica	Umidade Calculada
1	1,19V	18,14%	17,70%
2	1,32V	26,89%	25,96%
3	1,40V	32,09%	31,13%
4	1,48V	34,85%	36,50%
5	1,50V	38,31%	37,71%
6	1,52V	40,26%	39,36%
7	1,55V	41,65%	40,86%
8	1,57V	43,40%	42,07%
9	1,60V	47,07%	44,55%
10	1,66V	50,93%	48,33%

Quadro 6 - Comparativo do percentual de umidade do solo entre o método gravimétrico e a umidade calculada pelo sistema
Fonte: Autoria Própria.

A correlação dos dados resultantes a partir do cálculo da umidade do solo com o método gravimétrico e a umidade do solo calculada pelo sistema. Como é exibido no gráfico da Figura 19.

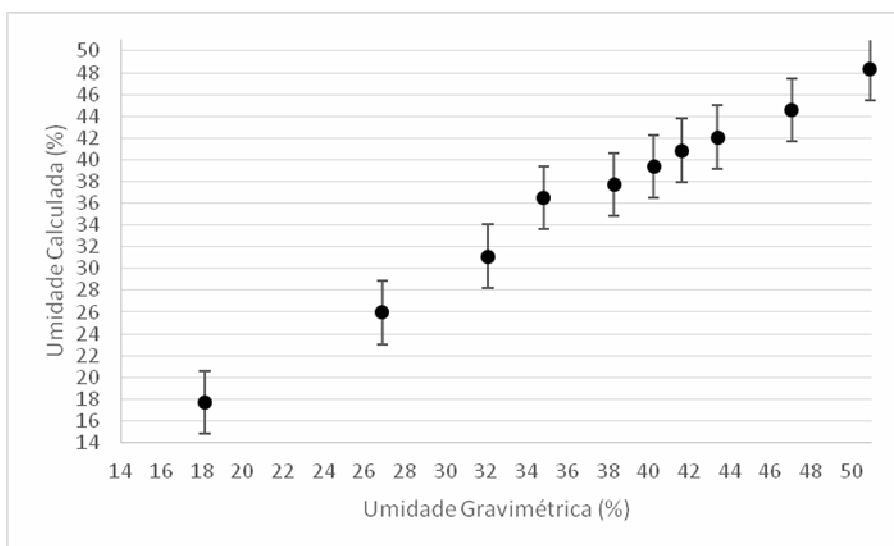


Figura 19 - Correlação da umidade medida com o método gravimétrico com a umidade calculada.

Fonte: Autoria Própria.

A partir do gráfico acima pode-se constatar que o sistema possuiu um erro de $\pm 3\%$ em cada medição.

4.4.3 Teste em Campo

O teste em campo foi realizado na área experimental do curso de agronomia da UTFPR Câmpus Pato Branco.

Primeiramente foram preparadas duas áreas de solo, o Solo A com baixo teor de umidade e o Solo B com teor de umidade mais elevado em relação ao Solo A, com isso é possível analisar a perda de umidade natural do solo de cada amostra. Junto a este teste foram coletas as amostras de cada solo para a realização do teste gravimétrico a fim de comparar os resultados obtidos.

As duas primeiras amostras foram coletas no período da manhã, a terceira amostra no fim da tarde a fim de obter uma maior variação devido a presença do sol e a quarta amostra foi coletada no outro dia. Os dados obtidos do Solo A e Solo B são apresentados respectivamente no Quadro 7 e Quadro 8.

Solo A					
Amostra	Tensão	Massa do Solo Úmido	Massa do Solo Seco	Umidade Gravimétrica	Umidade Calculada
1	1,46 V	128,81g	94,92g	35,70%	36,04%
2	1,45 V	99,38g	73,98g	34,33%	35,36%
3	1,39 V	103,54g	78,57g	31,78%	31,24%
4	1,66 V	114,31g	75,54g	51,32%	49,76%

Quadro 7 – Resultados obtidos no teste em campo com o Solo A

Fonte: Autoria Própria.

Solo B					
Amostra	Tensão	Massa do Solo Úmido	Massa do Solo Seco	Umidade Gravimétrica	Umidade Calculada
1	1,62 V	106,71g	73,01g	46,15%	47,01%
2	1,59 V	116,32g	80,46g	44,56%	44,95%
3	1,54 V	109,81g	77,69g	41,34%	41,53%
4	1,68 V	132,33g	87,14g	51,86%	51,13%

Quadro 8 - Resultados obtidos no teste em campo com o Solo B

Fonte: Autoria Própria.

Com os dados obtidos através das três primeiras amostras coletas do teste em campo é possível analisar a queda de umidade durante o dia, logo na amostra quatro a umidade aumentou devido ao fato que na noite que antecedeu a coleta dessa amostra choveu, deixando assim o solo encharcado novamente. No gráfico da Figura 20 e no gráfico da Figura 21 é apresentada a correlação entre a umidade medida através do método gravimétrico e a medida obtida através do sensor da amostra coletada do Solo A e Solo B respectivamente.

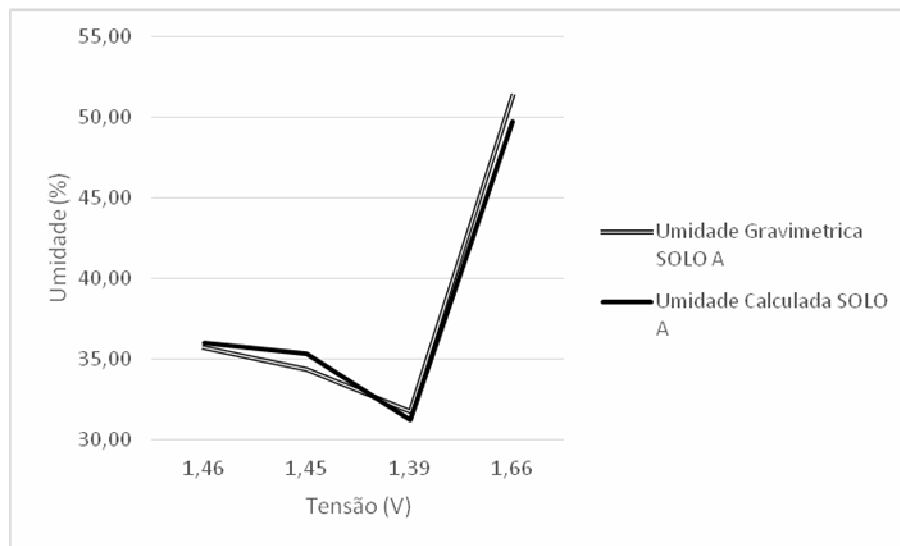


Figura 20- Comparação entre umidade gravimétrica e umidade calculada do Solo A
Fonte: Autoria Própria.

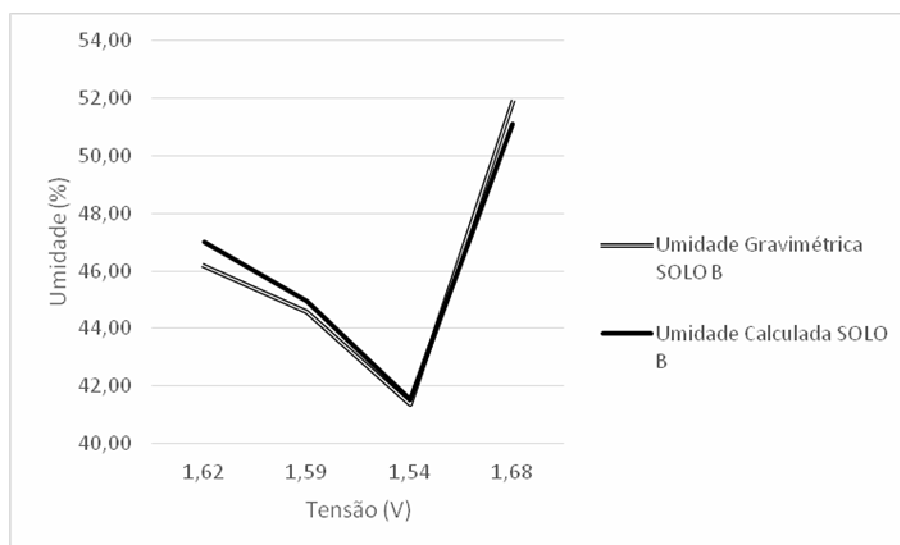


Figura 21- Comparação entre umidade gravimétrica e umidade calculada do Solo B
Fonte: Autoria Própria.

Este resultado mostra que o sensor e sonda apresentam valores de voltagem muito próximo aos calculados pela Equação 3, obtidos em períodos e sob condições climáticas diferentes.

Como a mesma quantidade de água foi adicionada nas duas áreas que estavam sendo coletadas as amostras o teor de umidade resultante do Solo A e do Solo B tenderam ao 51%.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sensor digital de umidade do solo com uma unidade remota de monitoramento sem fio, já que na maioria das vezes essa medição é realizada manualmente necessitando de laboratórios especializados.

Do estudo realizado sobre os métodos existentes para essa medição, foi optado por desenvolver o sensor com o método capacitivo, que consiste em detectar a variação da umidade do solo através da alteração da capacitância do solo.

Com a utilização do módulo de rádio frequência XBee S1 verificou-se que 100 metros de distância entre o sensor e a unidade de monitoramento em ambientes externos e 30 metros em ambientes internos foram satisfatórias considerando sua utilização em pequenas áreas de plantio e em laboratórios.

O projeto da sonda desenvolvido é apropriado, pois obteve uma variação adequada de capacitância em solo seco e solo úmido atendendo as necessidades do sensor.

Na montagem do protótipo do sensor, alguns problemas foram encontrados. Por se tratar de um sistema operando em alta frequência, a maior dificuldade foi diminuir a interferência externa, pois afetava diretamente na saída do sensor, as interferências foram sanadas utilizando cabos blindados e isolando todo o sistema.

Com a realização dos testes pode-se concluir que a tensão de saída do sensor está relacionada com o teor de umidade presente no solo, resultando um coeficiente de correlação de 0,988. Com isso é comprovado que a utilização de alta frequência e sondas em placa de circuito impresso para a medição da umidade do solo é aplicável.

Os testes realizados em campo comprovaram que o sistema está funcionando como o esperado, pois em um único teste foi possível verificar o ganho e a perda da umidade. No decorrer do teste o clima mudou ocasionando a chuva, logo o solo voltou a ser encharcado e o percentual de umidade resultante pelo teste da pesagem dos solos e a umidade calculada pelo sistema detectaram esse ganho de umidade.

Foi possível verificar com o protótipo construído que o sistema atendeu os objetos definidos. A implementação do protótipo e a realização dos testes utilizaram diversas áreas abrangidas pelos cursos de Engenharia de Computação, Engenharia Elétrica e Agronomia.

Como trabalhos futuros, sugerem-se melhorias no tratamento dos dados adquiridos, possibilitando uma modelagem ou simulação do sistema, assim como refinamentos no sensor para melhorar sua resposta e estabilidade. E, ainda, a realização de testes em diferentes tipos de solos para verificar ajustes que possam ser necessários.

REFERENCIAS

ANALOGIC DEVICES INC. **AD8310**. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/rf-power-detectors/non-rms-responding-detector/ad8310.html#product-samplebuy>> Acesso em: 15 jun. 2015.

ARVUS. (s.d.). **Agricultura de Precisão**. Disponível em: http://www.arvus.com.br/publicacoes_exibe.html?id=1. Acesso em: 04 abr. 2015.

AWE, International. **Soil Moisture Sensores and Applications**, 2010. Disponível em AWE Magazine: http://www.aweimagazine.com/article.php?article_id=220. Acesso em: 20 mar. 2015.

CARPENA, Rafael Muñoz. Field Devices for Monitoring Soil Water Content. **Southern Regional Water Program**, 2005, p. 1 - 15.

CCS. **Code Composer Studio Integrated Sevelopment Environment**, 2016. Disponível em: <http://www.ti.com/tool/ccstudio>. Acesso em: 06 jun. 2016.

CHANG, Zu-you; ILIEV, Blagoy P.; MEIJER, Gerard C.; GROOT, Frank J. Extending the limits of a capacitive soil-water-content measurement. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2007, v. 56, p. 2240-2244.

DIGI INTERNATIONAL INC. **XBee Multipoint RF Modules**. Disponível em: <http://www.digi.com/pdf/ds_xbeemultipointmodules.pdf>. Acesso em : 15 jun. 2015.

DURSUN, Mahir; OZDEN, Semih. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. **Scientific Research and Essays**, 2011, v. 6, p. 1573-1582.

ELETRONICS TUTORIALS. **Basic Eletronics Tutorials for beginner and beyond**. Disponível em: <<http://www.electronics-tutorials.ws/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

FRADEN, Jacob **Handbook of Modern Sensors: physics, designs and application** 4. ed. Springer, 2010

GANSELLI, Tiago Trevisani; BRANQUINHO, Omar Carvalho. Implementação de Rede sem Fio para Monitoramento de Grandezas Físicas In: **Anais de XIV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas**, 29 e 30 de setembro de 2009 em Campinas.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 6. ed. Rio de Janeiro. 3v, 2001.

IDOETA, Paula Adamo. **A agricultura é vilã ou vítima na crise hídrica?**, 2015. Disponível em: http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2015/03/150302_agua_agricultura_pai. Acesso em: 03 abr. 2015.

MASOUND, Rezaei; EMAD, Emad; SASAN, Naseh; MEHDI, Mmehdi. A New 1.4-GHz Soil Moisture Sensor. **Journal of the International Measurement Confederation**, 2012, v. 45, p. 1723-1728.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **I2C Real-Time Clock**. Disponível em: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

MENDES, Paulo Cesar de Souza. **Caracterização de um Sensor para Medição de Umidade do Solo com Termo-resistor a Temperatura Constante**, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Fereal da Bahia.

MONTOVANI, Eduardo C.; BERNARDO, Salassier; PALARETTI, Luiz F. **Irrigação: Princípios e Métodos**. 2. ed. Viçosa. UFV, 2007.

PARIVA, Dobriyal; ASHI, Qureshi; RUCHI, Badola; SYED, Ainul Hussain. A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and its Implications for Water Resource Management. **Journal of Hydrology**, 2012, v. 458-459, p. 110 - 117.

PAZ, Vital Pedro da Silva; TEODORO, Reges Eduardo; MENDONÇA, Fernando Campos. Recursos Hídricos, Agricultura Irrigada e Meio Ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2000, v. 4, p. 465-473.

PEREIRA, Fábio. **Miconcontroladores Família MSP430 Teoria e Prática**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2005.

PINHAL. **O que é epóxi?** 2009. Disponível em: <http://www.colegiodearquitetos.com.br/dicionario/2009/02/o-que-e-epoxi>. Acesso em: 14 abr. 2015.

SILICON LABS. **CP2102/9 Single-Chip USB to UART Bridge**. Disponível em: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/CP2102-9.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2016.

SILVA, Joana. **Novos sensores evitam desperdícios de água na agricultura e jardinagem**, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2546070/novos-sensores-evitam-desperdicio-de-agua-na-agricultura-e-jardinagem>. Acesso em: 04 abr. 2015.

SILVEIRA, Priscila Silva; BRUSAMARARELLO, Valner. **Utilização de Sensores Capacitivos para Medir Umidade do solo**, 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

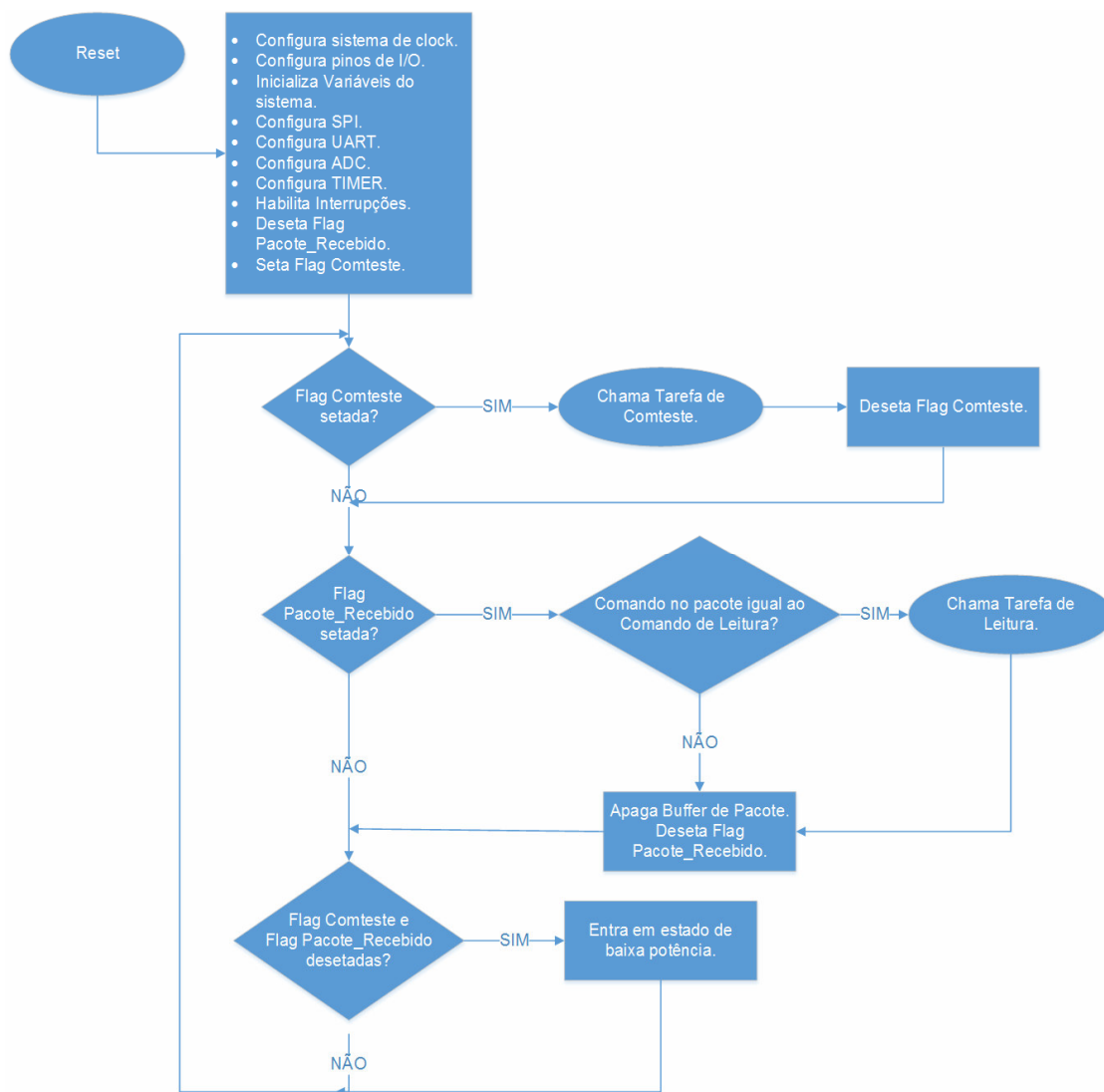
WALBERT, Allan. **Agricultura é quem mais gasta água no Brasil e no mundo**, 2013. Disponível em: <http://www.ebc.com.br/noticias/internacional/2013/03/agricultura-e-quem-mais-gasta-agua-no-brasil-e-no-mundo>. Acesso em: 03 abr 2015.

WJR. **JDB Treinamento Empresarial**, 1997. Disponível em: <http://www.jdbte.com.br/wjrteleco/estudo%20dos%20osciladores.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2015.

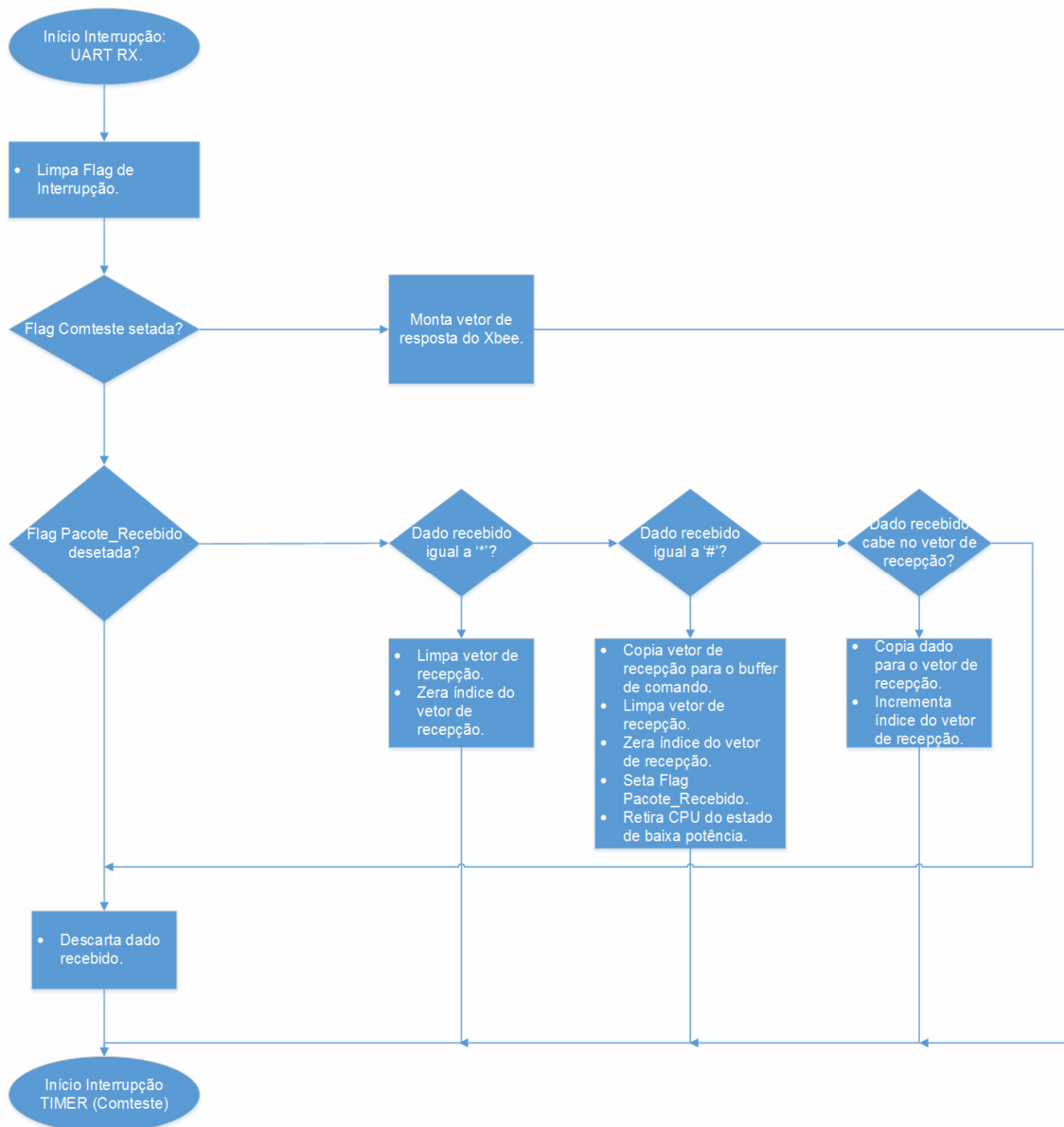
ZHEN, Xing; CHANGJUN, Shen; HUA, Yan; SHIRUI, Zhang. Research and Design of Soil Water Content Sensor Basead on Hight-frequency Capacitive. **Sensors & Transducers**, 2014, v. 26, p. 56-60.

APÊNDICES

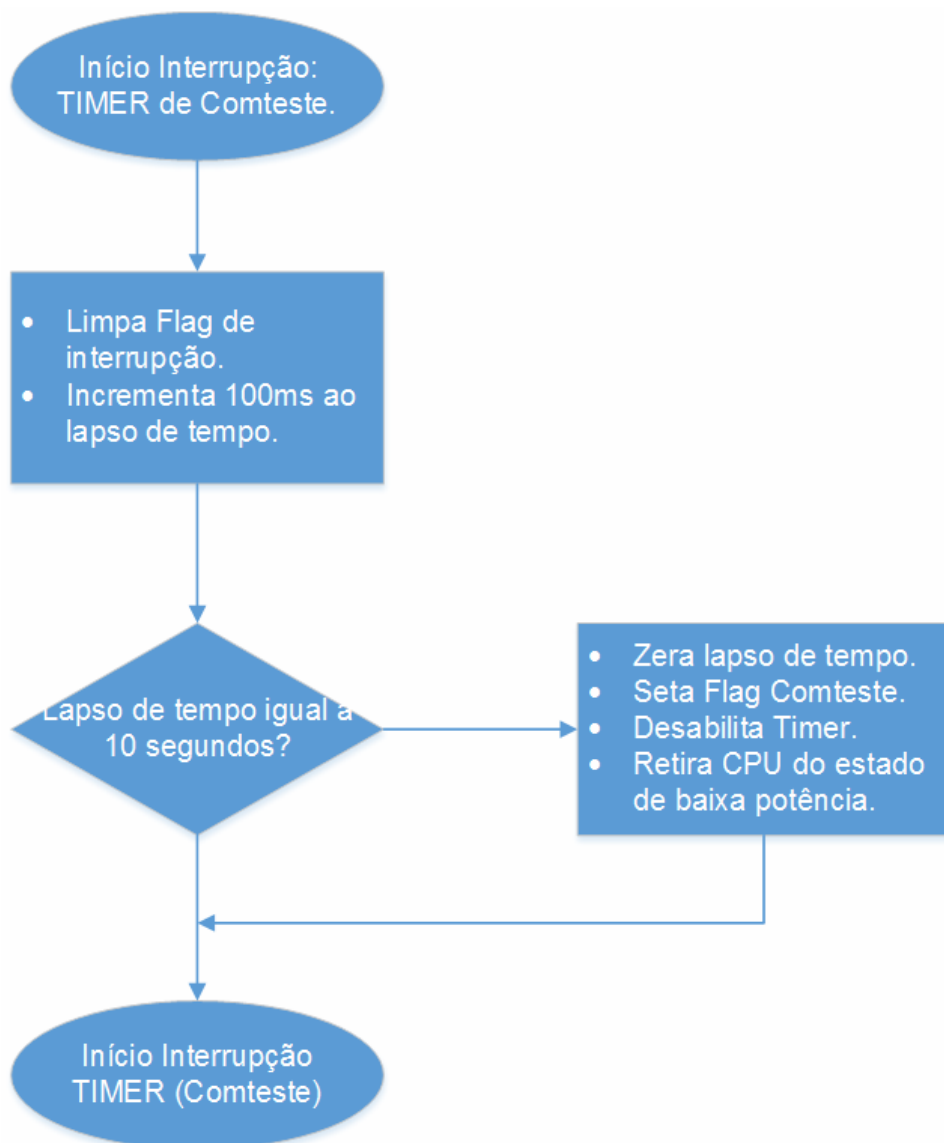
Apêndice A – Fluxograma de Inicialização do Sistema



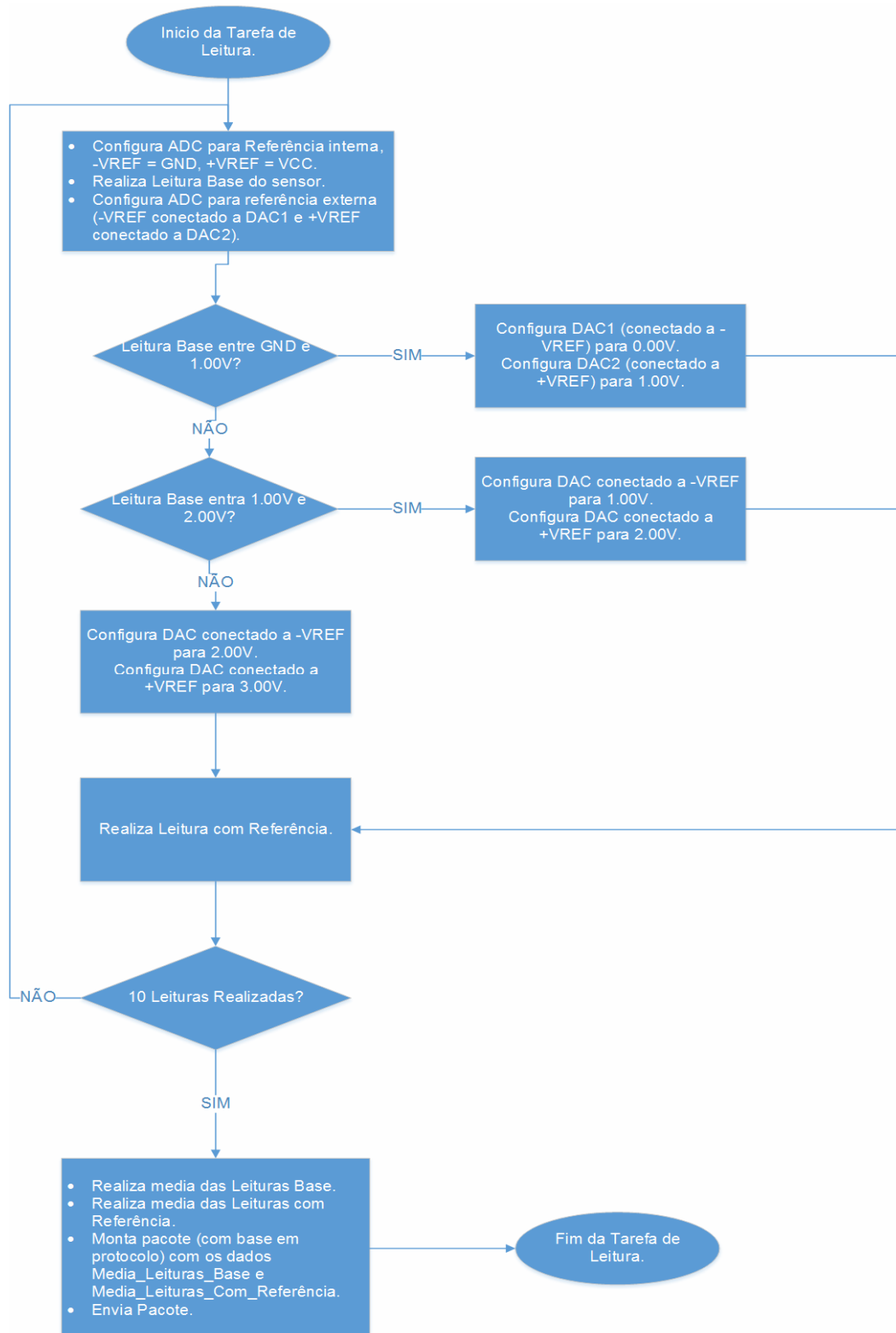
APÊNDICE B – Fluxograma para verificação do protocolo de integridade



APÊNDICE C – Fluxograma da interrupção para acionamento da tarefa (Comteste)



APÊNDICE D – Fluxograma da realização do comando de leitura do sensor



APÊNDICE E – Fluxograma da tarefa (Comteste) que verifica a comunicação com o XBee

